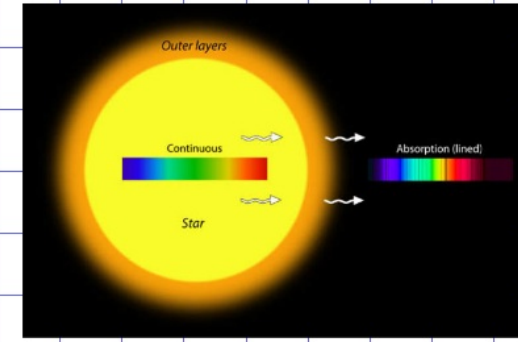
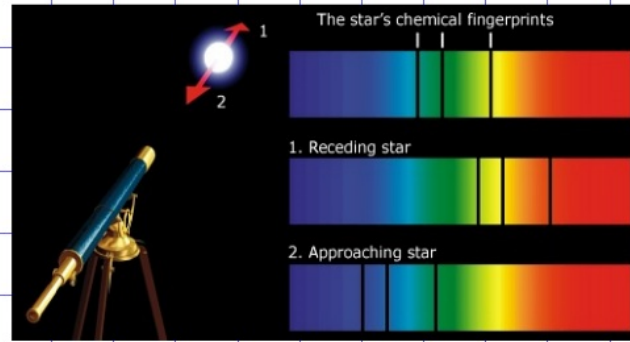
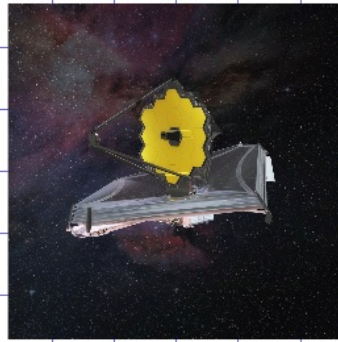
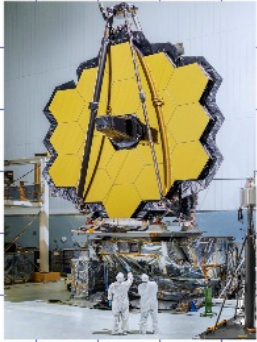
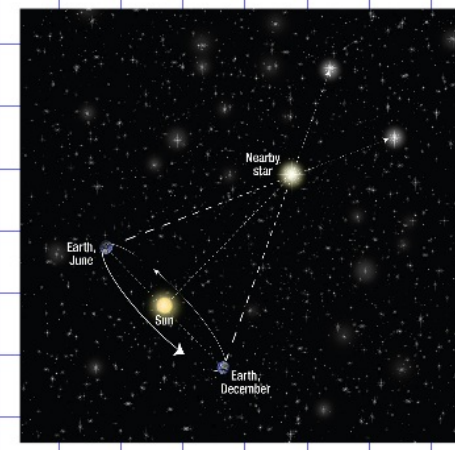
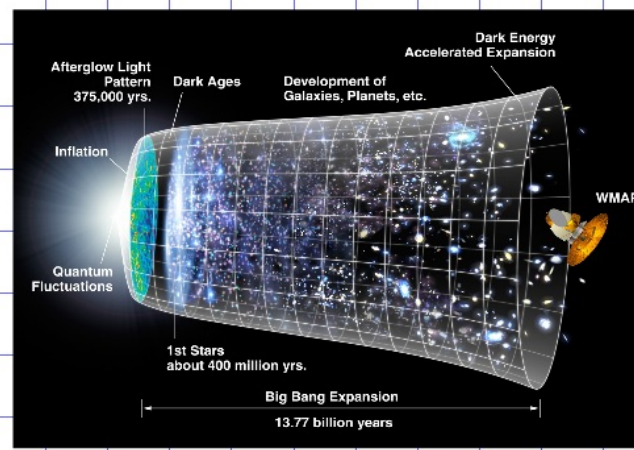
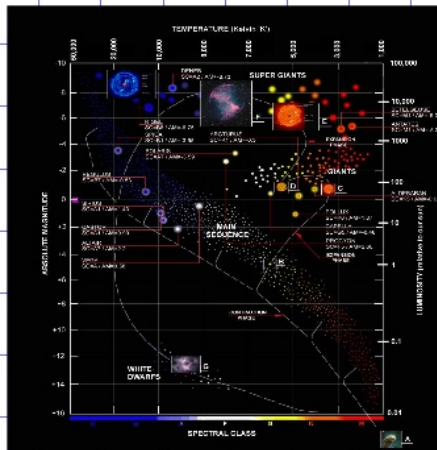




Hoofdstuk 18 Astrofysica



Leerdoelen

- §18.1 A. Je kunt uitleggen hoe de **verschillende golflengte-gebieden** (bijv. infrarood, radio en UV) van EM-straling voor astronomie gebruikt worden en welke kenmerken daarbij een rol spelen.
- B. Je kunt rekenen aan **golfsnelheid, frequentie, golflengte en fotonenergie** van EM-straling.
- C. Je weet wat **onderscheidend vermogen** van een optisch systeem is en je kunt er aan rekenen met deze formule:

$$\lambda = v \cdot T = \frac{c}{f}$$

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

$$S = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} \cdot \frac{180}{\pi}$$

- §18.2 D. Je kunt uitleggen welke **kenmerken van het zonnenspectrum** ontstaan in welke lagen van de **zonne-**
- E. Je kunt sterren indelen in **spectraaltypen** en naar **lichtsterkteklasse**.
- F. Je rekenen aan relatieve snelheden tussen waarnemer en lichtbron met **Dopplerverschuiving** voor EM-straling.

- §18.3 G. Je kunt rekenen aan **straling** die sterren uitzenden met deze formules en constanten:

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

$$I_{\text{opp}} = \sigma \cdot T^4$$

$$P_{\text{bron}} = I_{\text{opp}} \cdot A$$

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

$$P_{\text{ontv}} = I_r \cdot A$$

constante v. Wien:
 $2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$P_{\text{bron}} = \sigma \cdot T^4 \cdot A$$

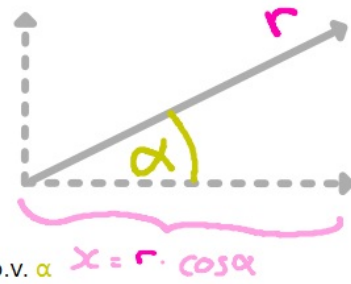
- §18.4 H. Je kunt het **Hertzsprung-Russeldiagram** aflezen met oog voor r, L, T, spectraaltype en lichtsterkteklasse van sterren.
- I. Je kunt rekenen aan **waterstoffusie** in sterren met $E = mc^2$.
- J. Je weet welke fasen de zon door zal maken in diens **levensloop**.

$$L = P_{\text{bron}} = \sigma \cdot T^4 \cdot 4\pi r^2$$

Welke wiskundige technieken kunnen van pas komen bij dit hoofdstuk?

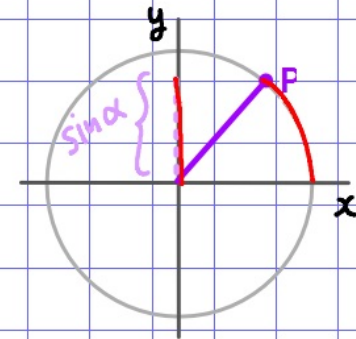
HERHALING GONIOMETRIE

$y = r \cdot \sin \alpha$
overstaande
component van r
t.o.v. α
aanliggende
component van r t.o.v. α



kleine hoeken-

"Voor hoeken α tot 0,2 rad
(oftewel 10 graden) geldt: $\sin \alpha = \alpha$
en ook $\tan \alpha = \alpha$." LET OP: Dit
geldt alleen als je in radialen
werkt.



lineairiseren van functies

opgave 24

b) rechte lijn, want:

$$T^2 = (2\pi)^2 \cdot \frac{m}{C}$$

$$T^2 = 4\pi^2 \cdot \frac{m}{C}$$

c) $T^2 = \frac{4\pi^2}{C} \cdot m$

$$y = a \cdot x + b$$

de afgeleide v.e. functie

$$u = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$$

$$\frac{du}{dt} = v = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \cdot \frac{2\pi}{T}$$

wordt maximaal 1 dus $v_{\max} = 2\pi \cdot \frac{A}{T}$

Welke basistypen van opgaven keren elk hoofdstuk terug?

$$\sigma = \frac{2 \cdot (3,14)^5 \cdot (1,38 \cdot 10^{-23})^4}{15 \cdot (3,00 \cdot 10^8)^2 \cdot (6,626 \cdot 10^{-34})^3}$$

$$\sigma = \frac{610 \cdot 1,38^4 \cdot (10^{-23})^4}{15 \cdot 3,00^2 \cdot (10^8)^2 \cdot 6,626^3 \cdot (10^{-34})^3}$$

$$\sigma = \frac{2212 \cdot (10^{-92})}{135 \cdot (10^{16}) \cdot 291 \cdot (10^{-102})}$$

$$\sigma = \frac{2212}{135 \cdot 291} \cdot \frac{10^{-92}}{10^{16} \cdot 10^{-102}}$$

$$\sigma = 0,0563 \cdot 10^{-6} = 5,63 \cdot 10^{-6}$$

natuurconstante uit binas narekenen

$$J = \text{kg} \cdot \left(\frac{\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}}{\text{J} \cdot \text{s}} \right)^2$$

$$J = \text{kg} \cdot \left(\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{J} \cdot \text{s}} \right)^2$$

$$J = \text{kg} \cdot \left(\frac{\cancel{\text{N}} \cdot \text{m}^2}{\cancel{\text{N}} \cdot \cancel{\text{m}} \cdot \text{s}} \right)^2$$

$$J = \text{kg} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$J = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m}$$

tabel 3A en 4

uit binas:

$$J = \text{N} \cdot \text{m}$$

en

$$\text{N} = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

dimensie-analyse (aantonen dat een bepaalde eenheid bij een bepaalde grootheid hoort)

Welke natuurkundige principes keren regelmatig terug?

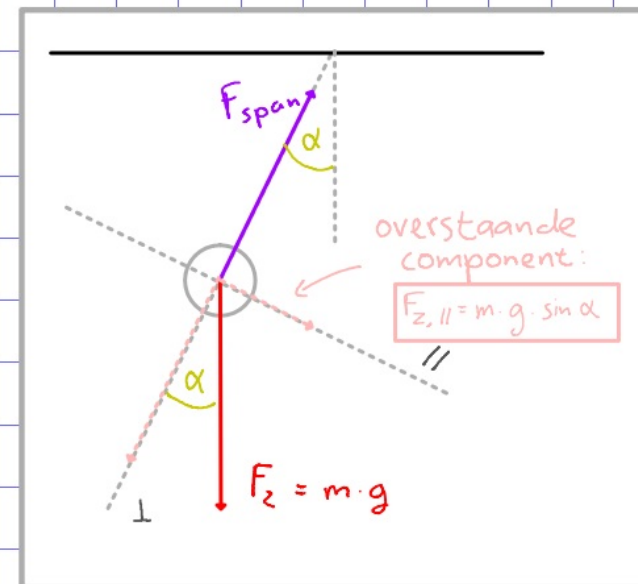
behoud van energie



nettokracht en eerste wet van Newton

"Als de **nettokracht** op een voorwerp nul is, dan beweegt het voorwerp **eenparig** of staat het

nettokracht in twee dimensies
(x/y) en krachten onder hoeken

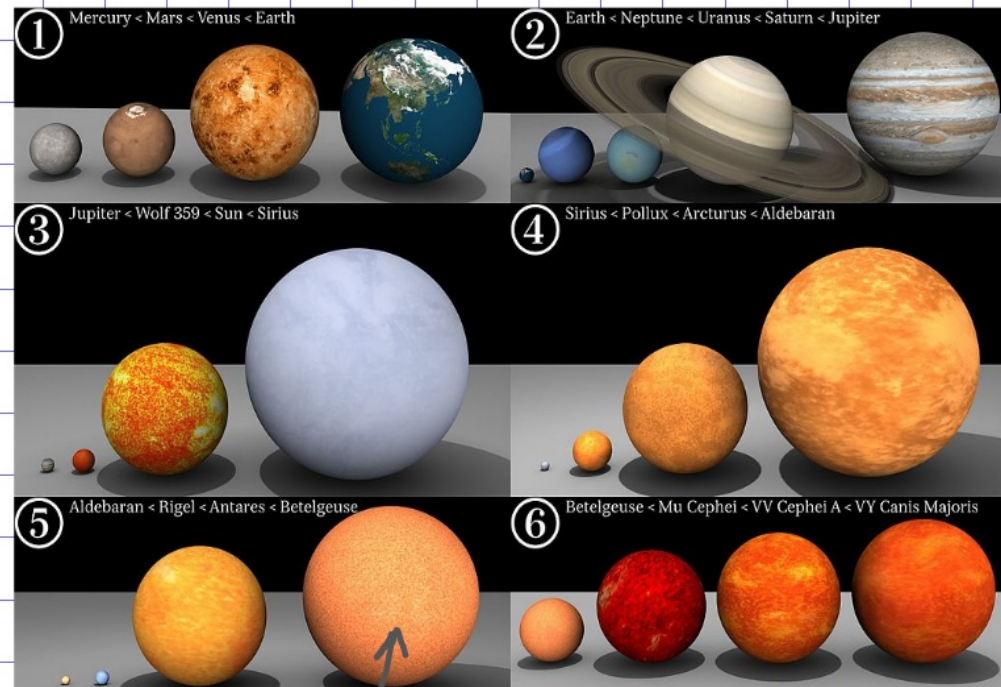
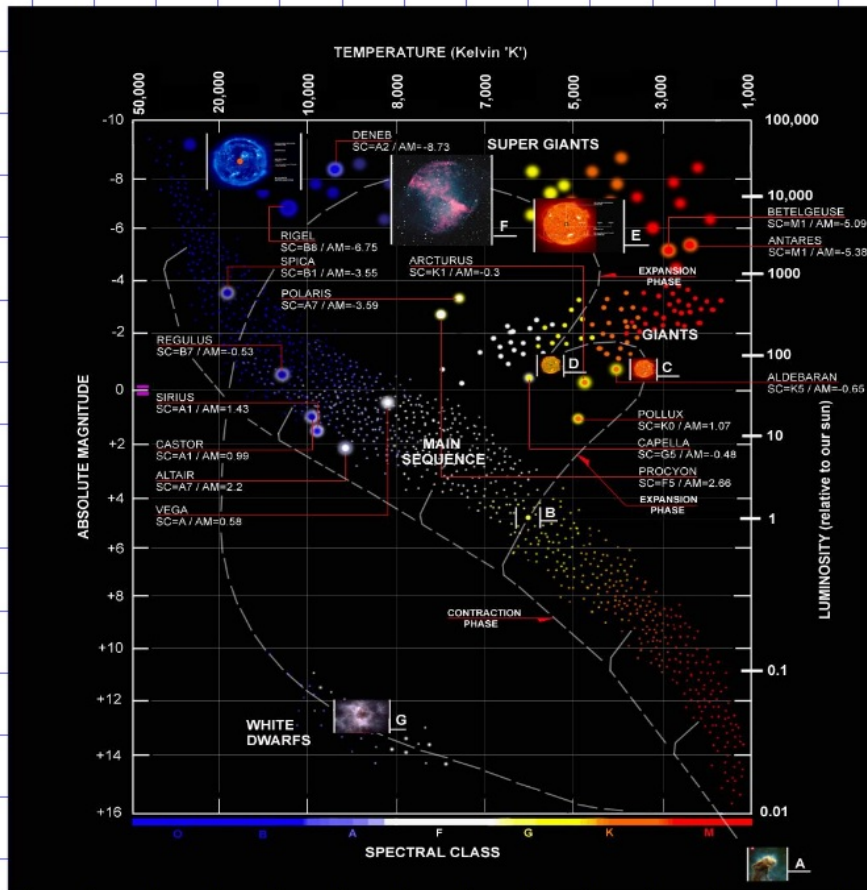


Hoofdstuk 18: Astrofysica

- *CONTEXT* -

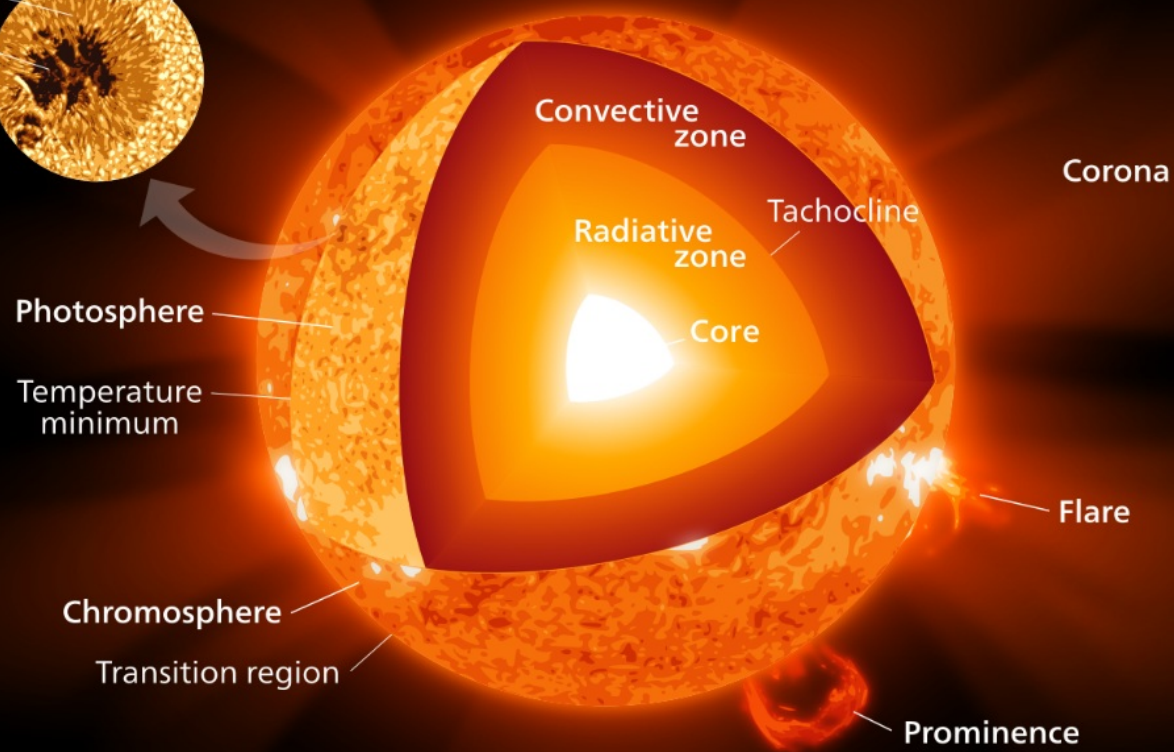
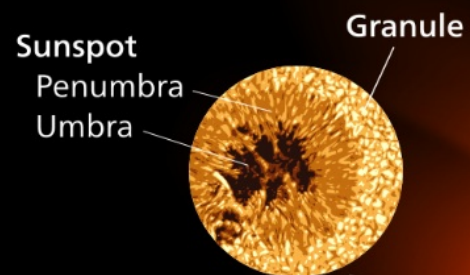
De volgende pagina's geven interessante achtergrondinformatie bij de stof van dit hoofdstuk zoals voorbeelden uit de natuur van de verschijnselen of technische toepassingen van de natuurkundige inzichten bij deze verschijnselen. Zulke achtergrond informatie heet ook wel context. Het is niet noodzakelijk om deze pagina's te bestuderen voor het proefwerk maar het is wel interessante kennis!

"Welke soorten en maten sterren bestaan er?"



BINAS: 700 x de straal v.d. Zon

"Uit welke lagen bestaat de zon?"

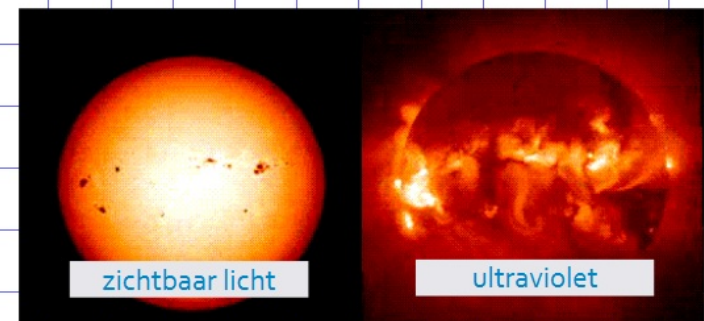
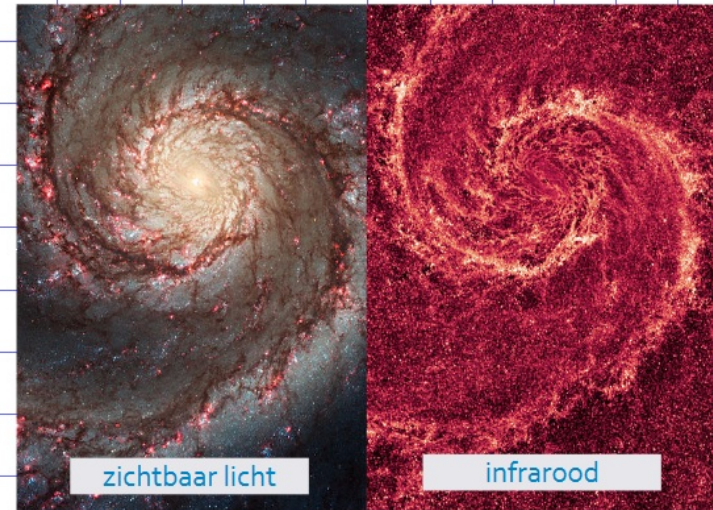
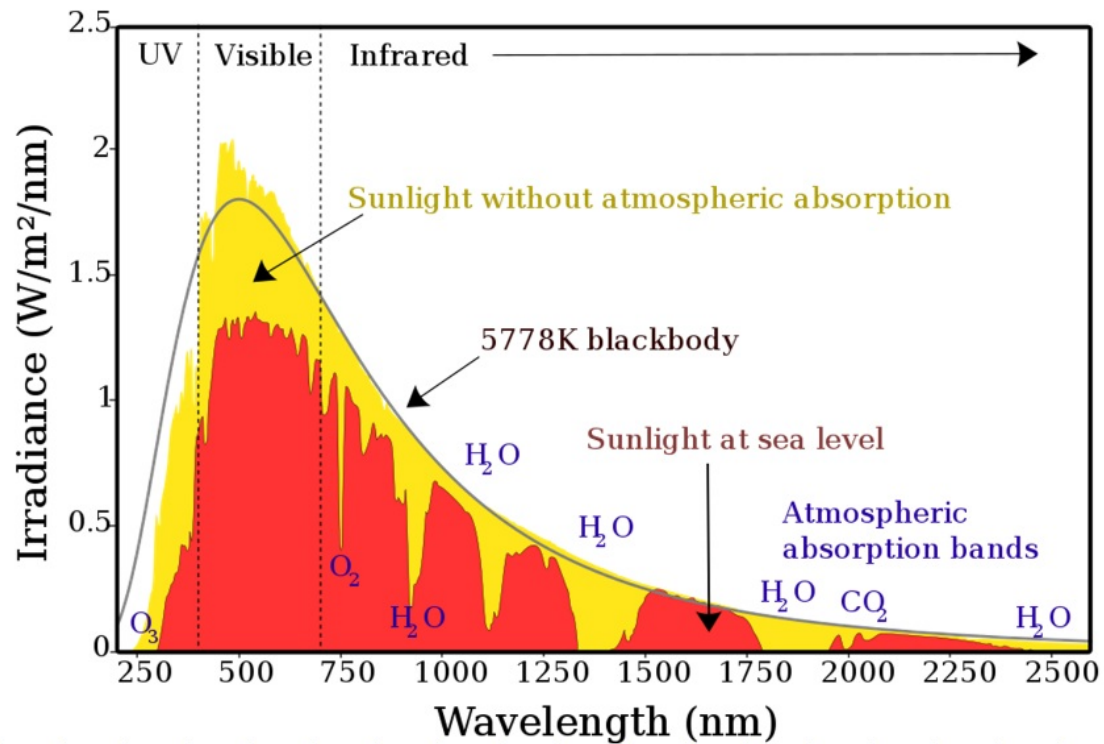


Solar wind

The Sun
All features drawn to scale

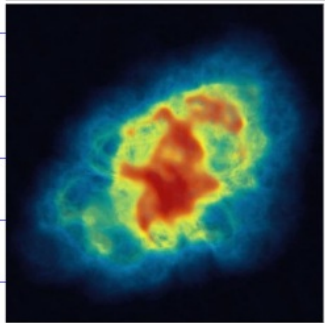
"Welke golflengten zenden sterren uit?"

Spectrum of Solar Radiation (Earth)



"Welke golflengten van EM-straling worden uitgezonden voor astronomische objecten?"

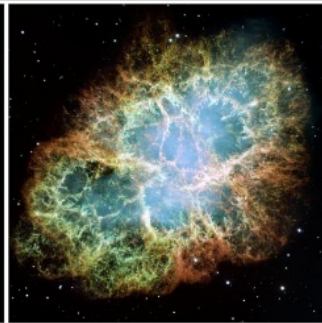
CRAB NEBULA



RADIO



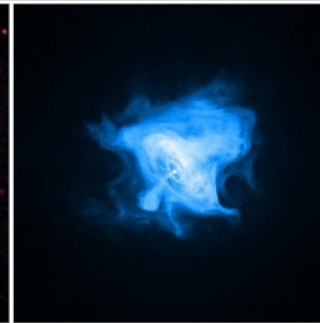
INFRARED



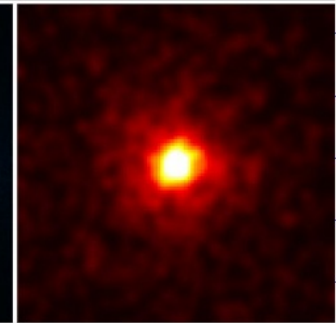
VISIBLE LIGHT



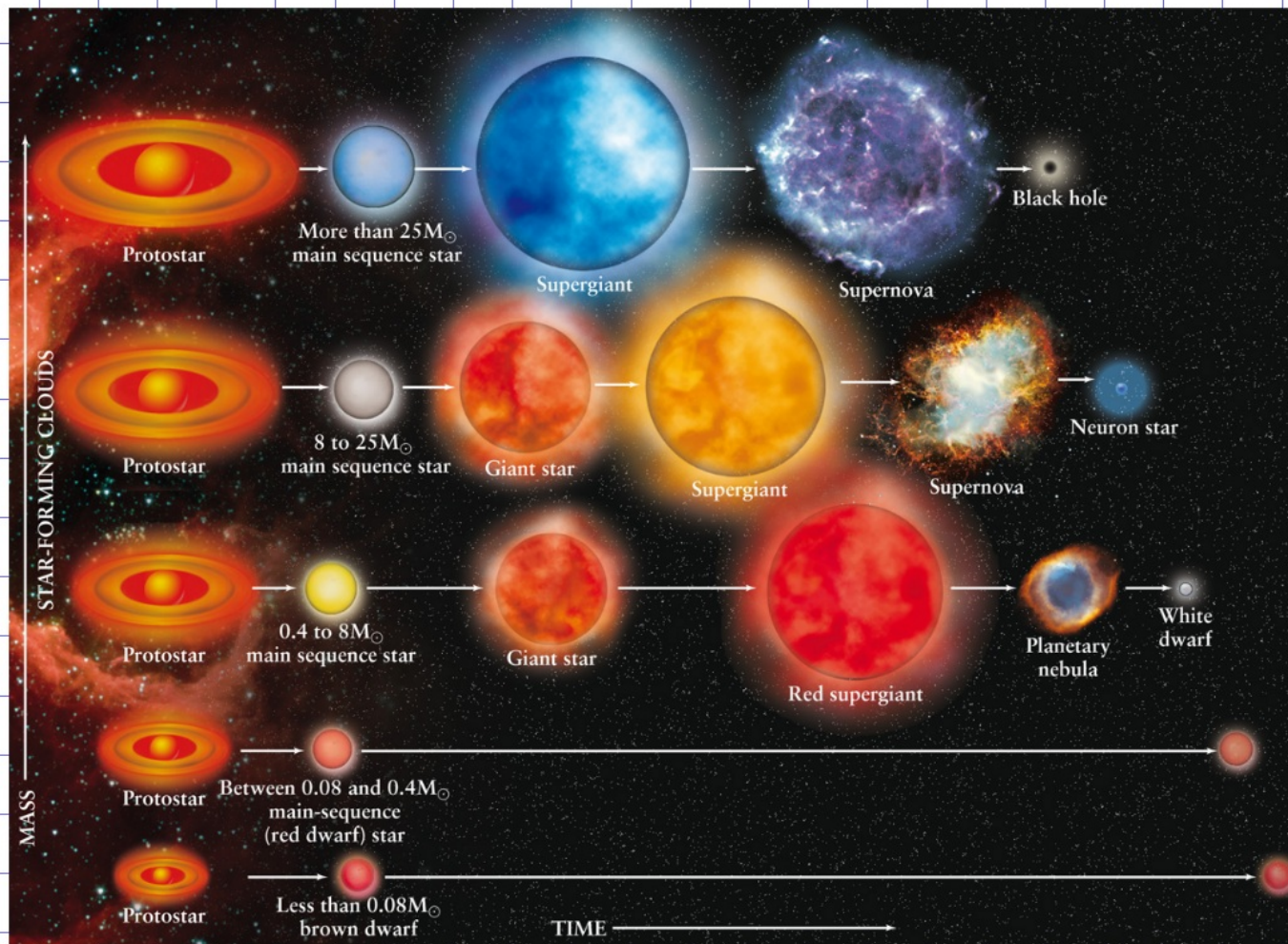
ULTRA VIOLET



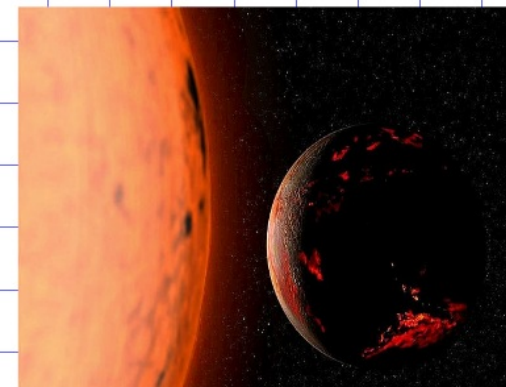
X-RAYS



GAMMA RAYS



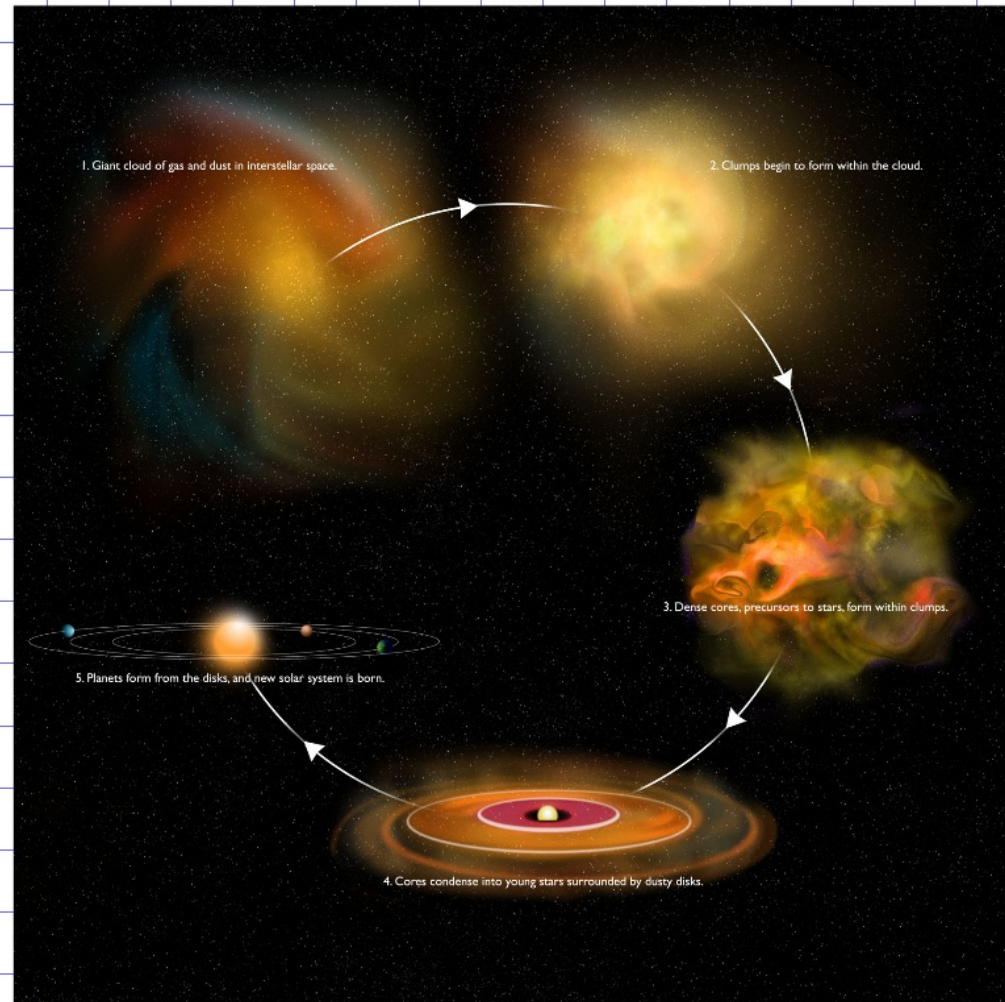
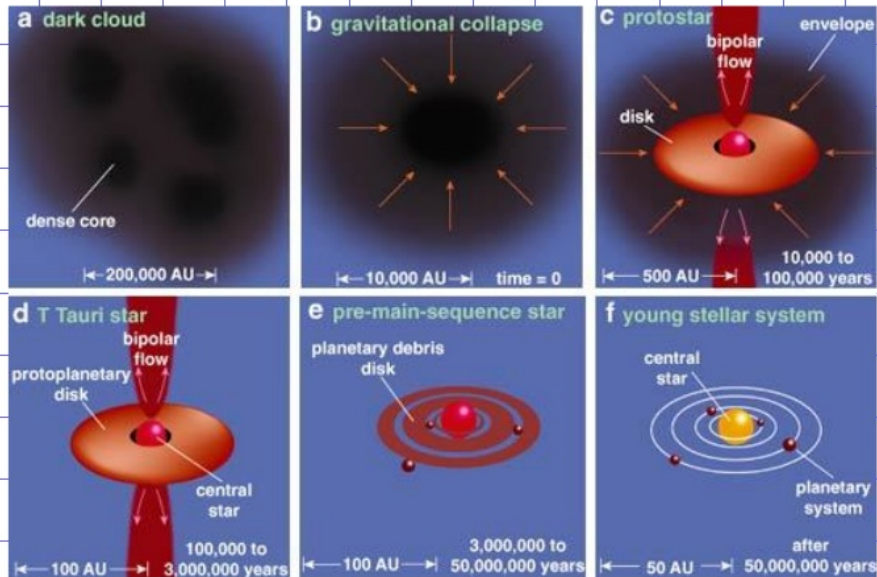
*"Hoe ontwikkelen
sterren zich
gedurende hun
bestaan?"*



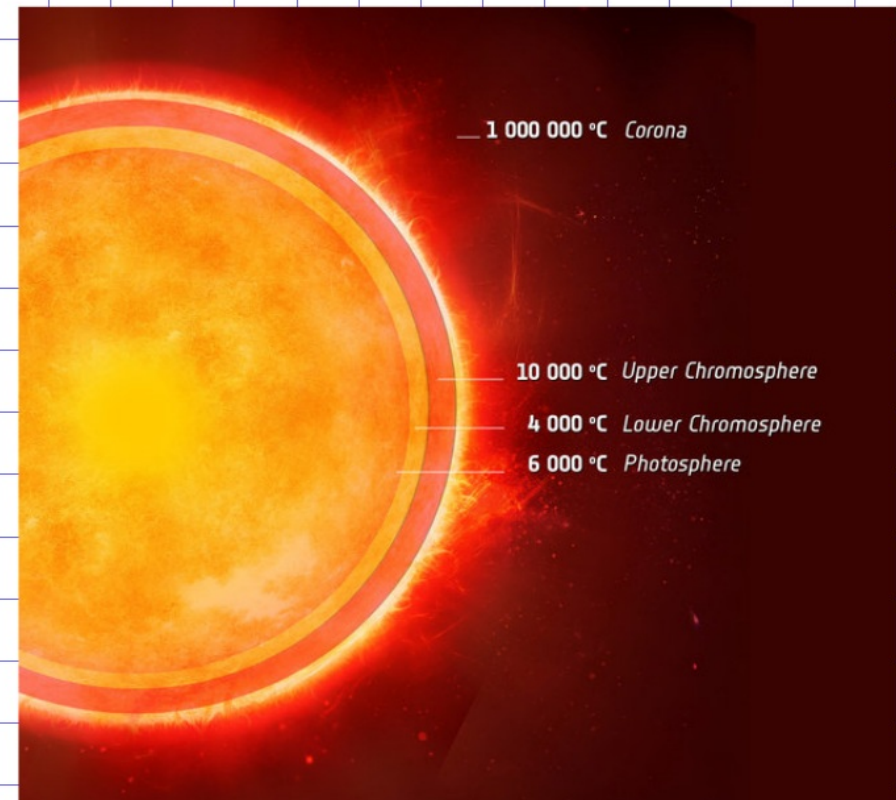
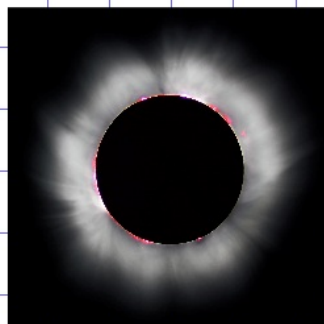
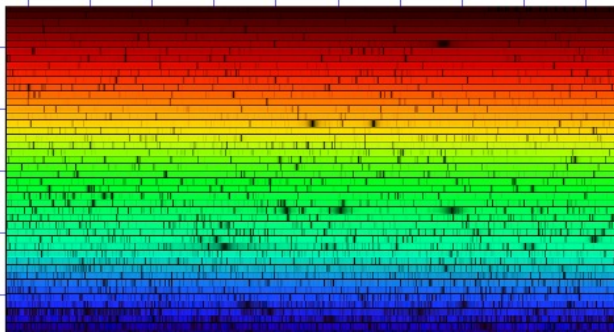
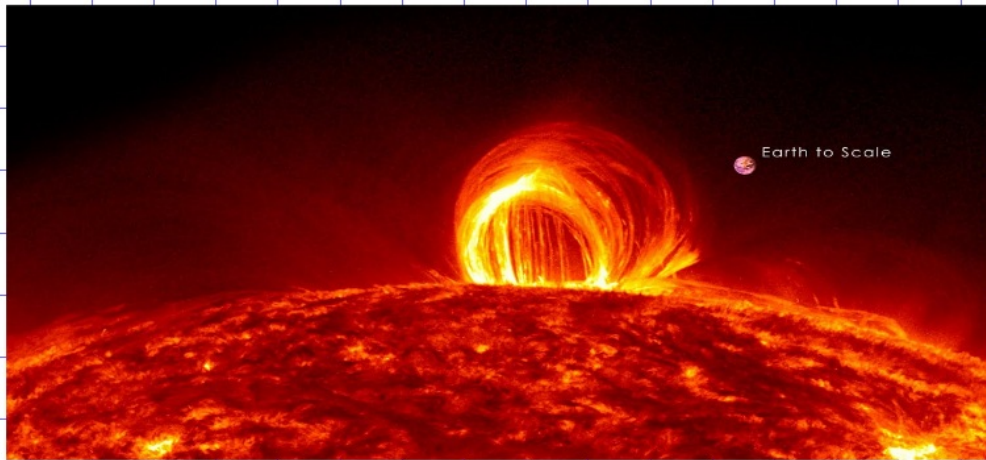
"Wat doen sterrenkundigen met dit soort antennes?"



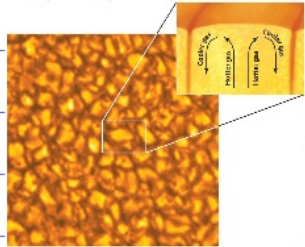
"Hoe ontstaan sterren?"



"Uit welke stoffen bestaat de zon?"



"Uit welke lagen bestaat de zon?"



Sunspot

Fotosfeer: non-transparante laag. Soort van het oppervlak (als in: waar we niet doorheen kunnen kijken).

diameter zon: $7,0 \times 10^8$ m

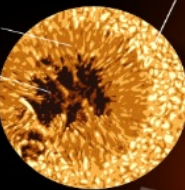
diameter zonne-atmosfeer: 1×10^6 m

Gammafotonen die in de kern ontstaan worden in de **stralingszone** vlot geabsorbeerd en weer uitgezonden en verliezen daarbij netto wat energie. Uiteindelijk duurt het tot 10^5 jaar voor de straling de fotosfeer te bereiken. In dit proces kunnen alle mogelijke golflengten van fotonen ontstaan waardoor de zon het continu spectrum van een zwarte straler (zie Hfd12) produceert. Dit komt mede omdat deze zone een plasma in thermisch evenwicht is waardoor de deeltjes daar een Maxwell-Boltzmann-snelheidsverdeling hebben.

Stromingszone: geen plasma meer, transparant

De **tachocline** is de grens tussen de stralingszone en de stromingszone. De temperatuur is hier inmiddels gedaald tot 1,5 miljoen K.

Geestig: voorbij de stromingszone wordt de temperatuur weer hoger. Men weet niet precies waarom.



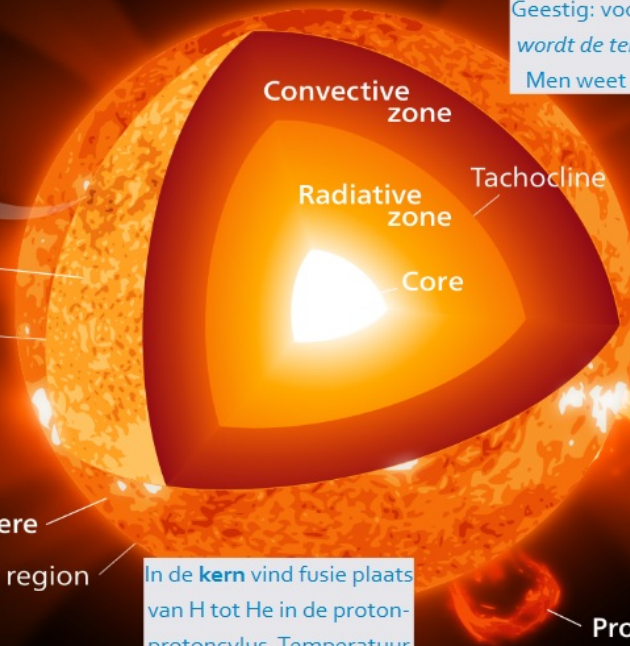
Photosphere

Temperature minimum

Chromosphere

Transition region

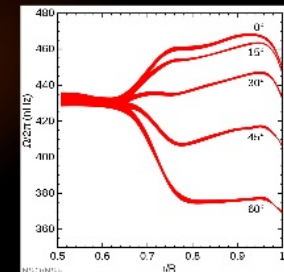
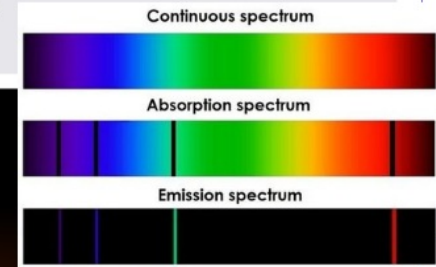
In de **kern** vind fusie plaats van H tot He in de proton-protoncyclus. Temperatuur hier is 15 miljoen K.



Corona

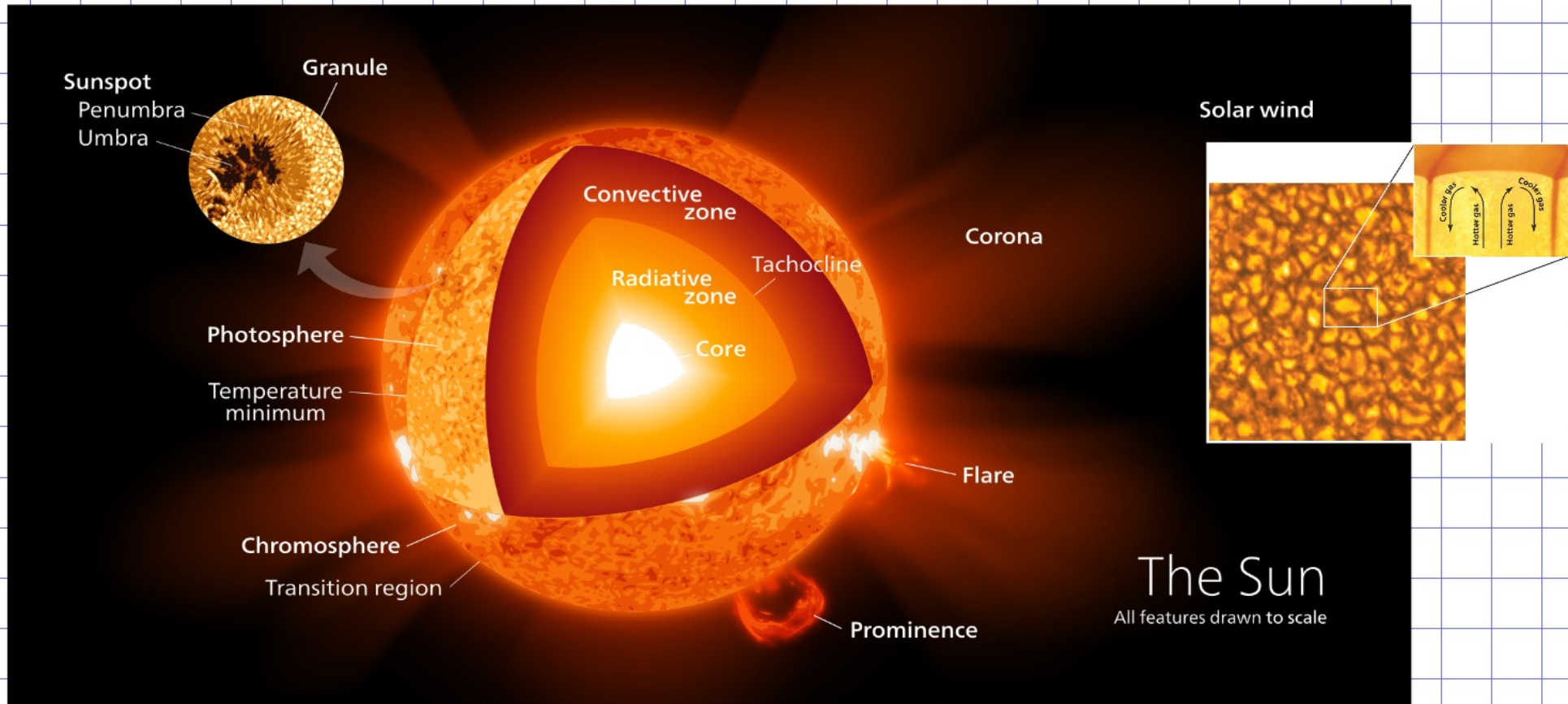
Flare

Prominence



The Sun
All features drawn to scale

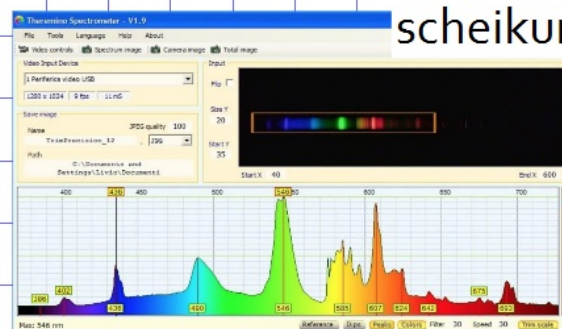
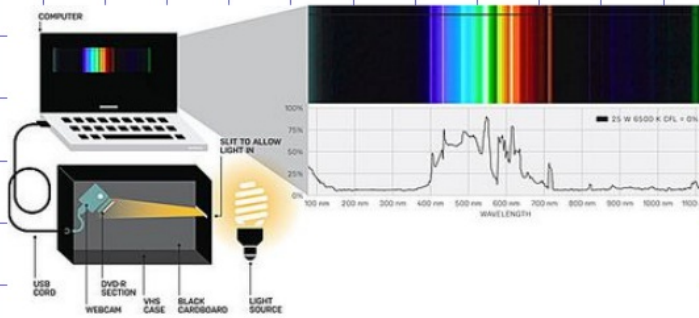
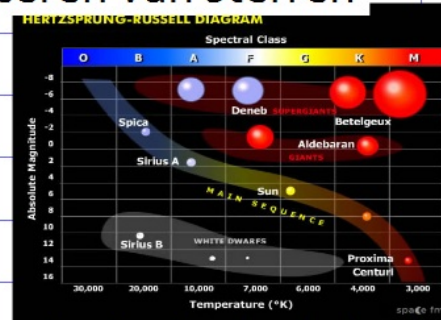
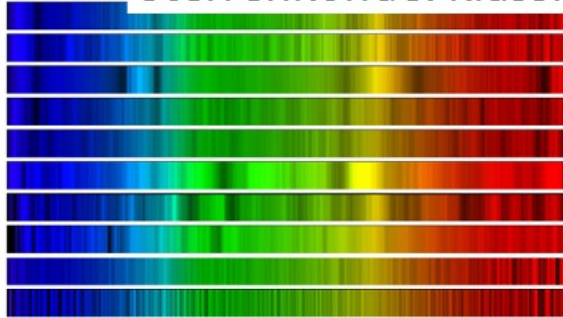
"Uit welke lagen bestaat de zon?"



"Waar wordt spectrometrie toegepast?"

sterrenkunde: klassificeren van sterren

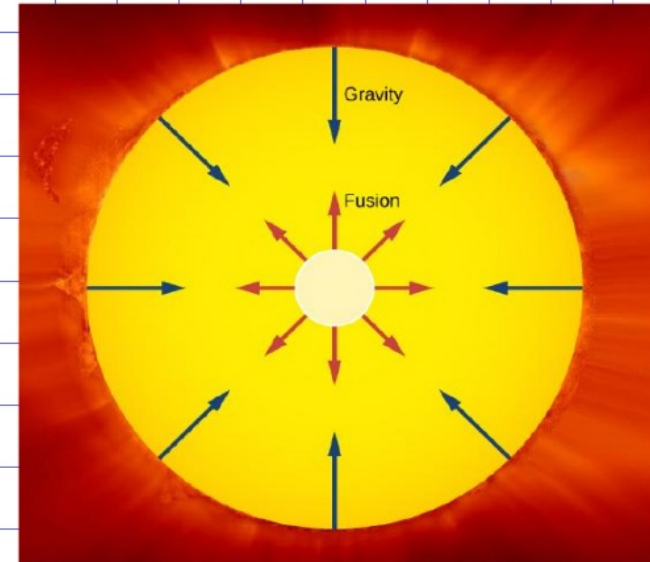
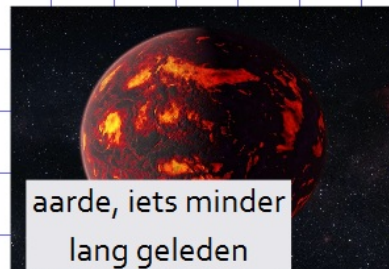
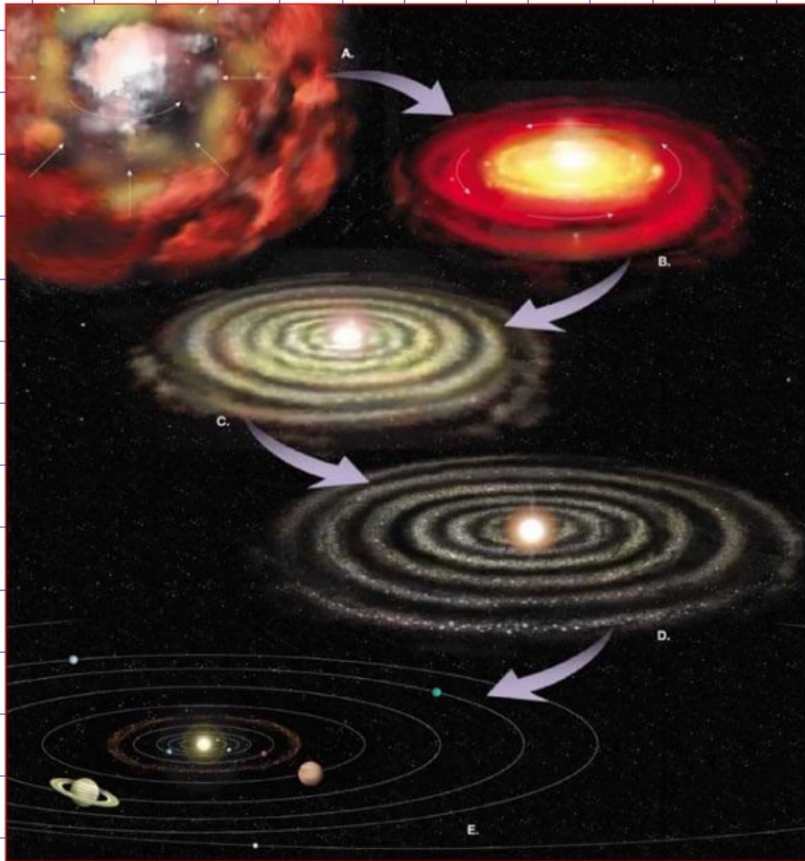
HIP 81377	Type: O9.5V
Spica	Type: B1v
HIP 66474	Type: A2v
Mizar	Type: F5iv
HIP 66378	Type: G0iv
Procyon	Type: K2II
HIP 31219	Type: M3III
Muphrid	Type: C
HIP 67927	Type: SdF2
Arcturus	Type: WC+
HIP 69673	
HIP 30343	
HIP 52009	
HIP 49882	
HIP 100287	



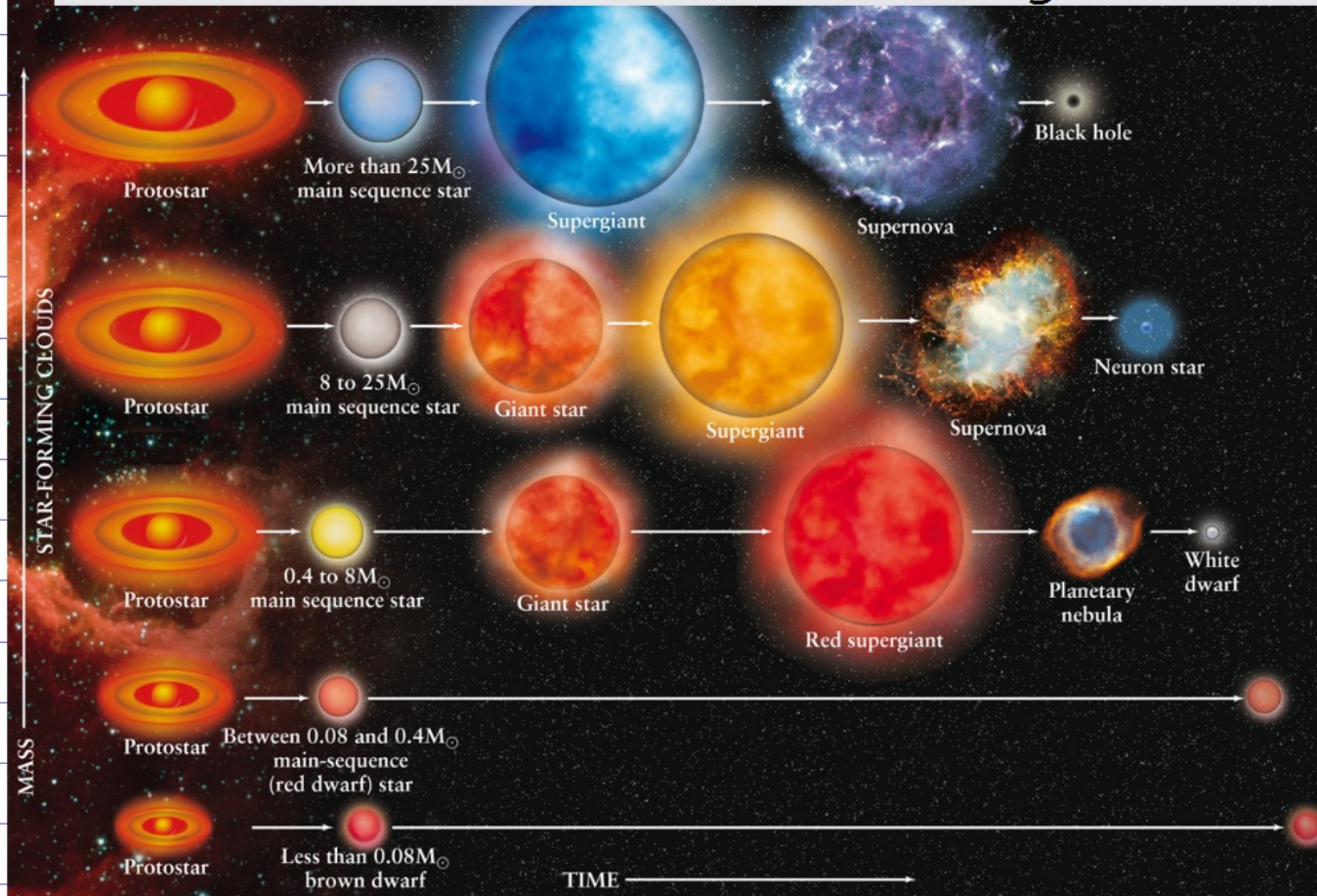
scheikunde: meten van concentraties



"Hoe is het zonnestelsel ontstaan?"



"Hoe ontwikkelen sterren zich gedurende hun bestaan?"

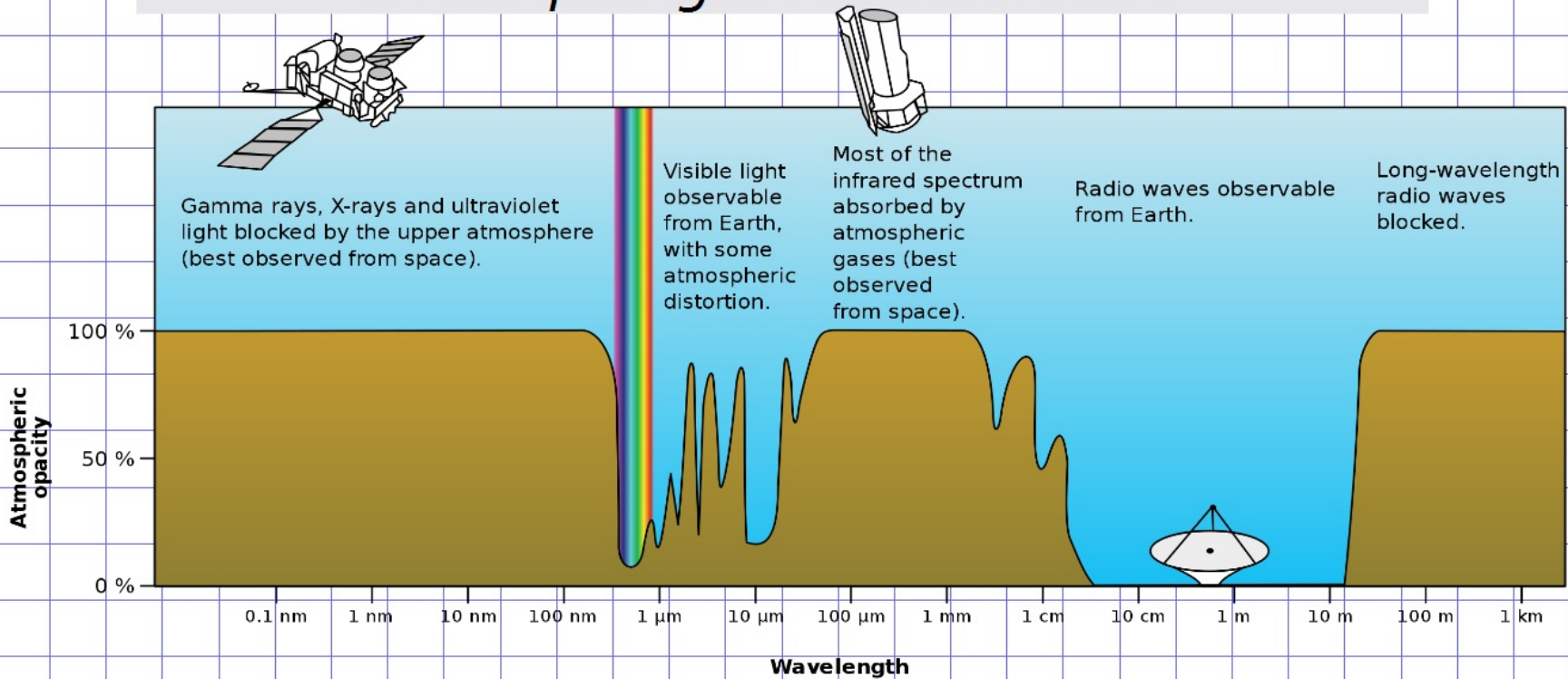


Gele dwerg: door radiatieve zone geïsoleerde kern. Kern wordt helium, stopt fusie. Laag om kern heen gaat waterstoffuseren. Zon wordt daardoor steeds heter en expandeert. Intensiteit aan oppervlak gaat wel omlaag dus wordt roder. Door uitzetting is g aan het oppervlak kleiner waardoor buitenste lagen worden uitgestoten als een super-zonnewind. Verliest 1/3e van zijn massa. Wordt zo heet dat Helium in de kern kan gaan fuseren. Kern houdt energie voor zichzelf, buitenste zonnelagen krimpen weer. Als het Helium opgefuseerd is tot koolstof herhaalt het zwellen, wegblazen en krimpen zich totdat de kern uit koolstof bestaat. De rest van de zon is inmiddels weggeblazen, alleen de kern is nog over.

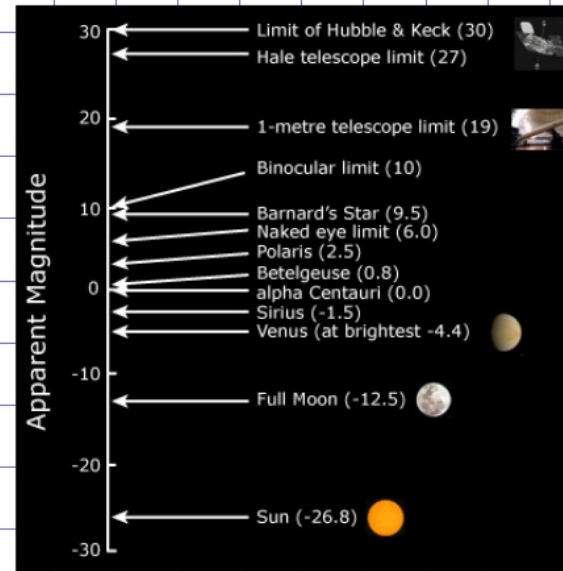
Rode dwerg: zo klein dat ie langzaam door zijn waterstof heen stookt en door convectie is ook alle waterstof beschikbaar. Levensduur: 10^{12} j. Geen radiatieve zone, maar meteen convectieve zone.

Bruine dwerg: niet heet genoeg voor waterstoffusie, maar wel wat deuteriumfusie.

"Welke golflengten van EM-straling komen door de dampkring heen en waarom?"



"Hoe worden astronomische objecten ingedeeld naar felheid?"

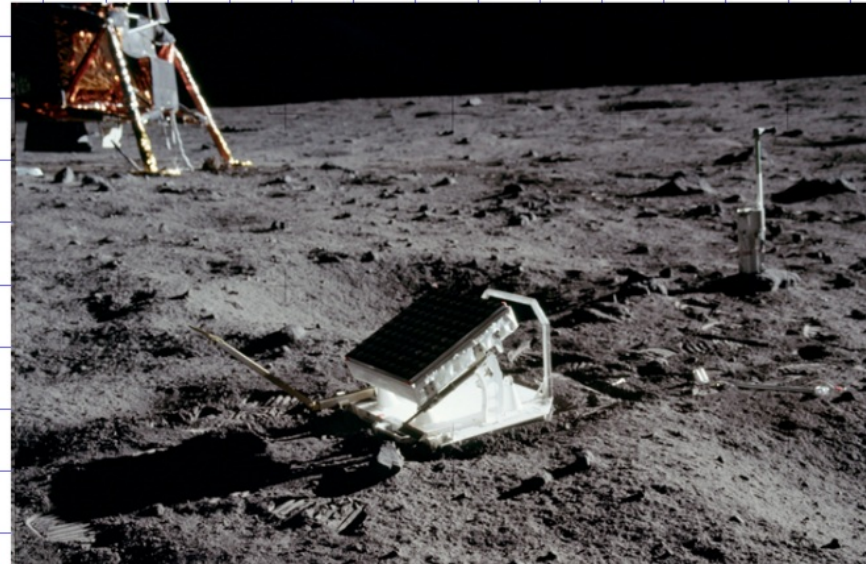
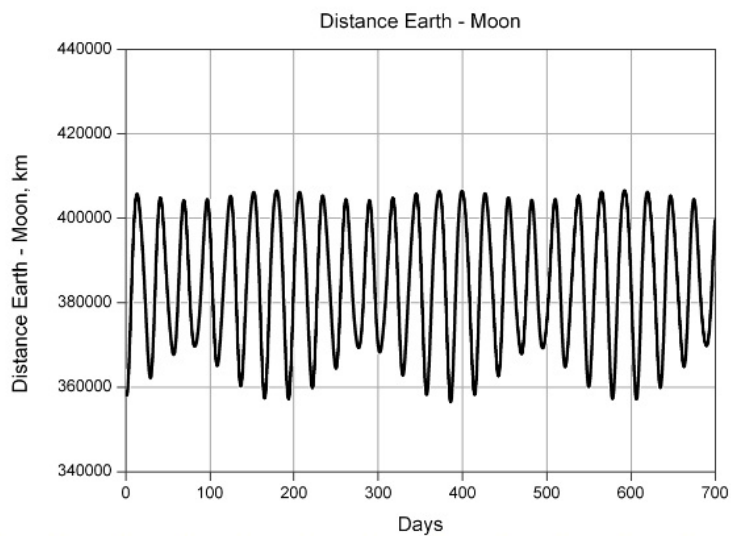


Schijnbare magnitude:

- Een grotere waarde staat voor een lagere lichtsterkte.
- Om een object met een grote magnitude te zien heb je dus een sterke telescoop nodig.
- Met het blote oog kun je tot magnitude 6,0 zien.



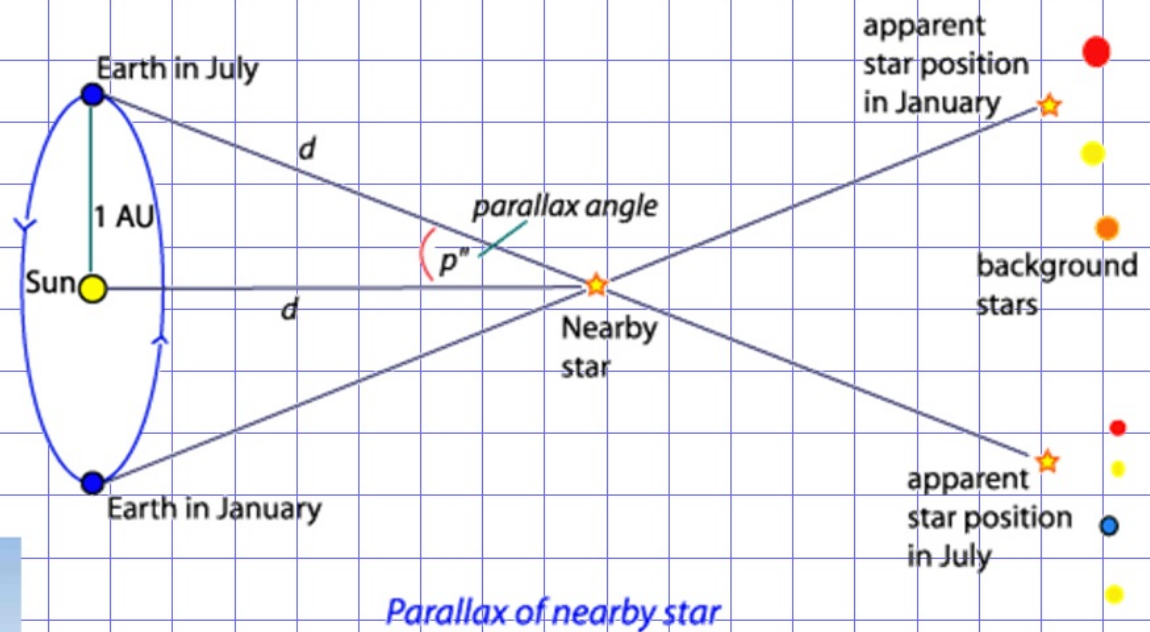
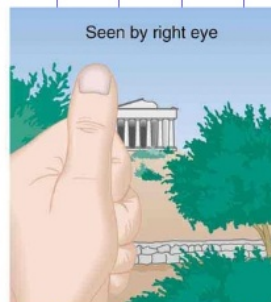
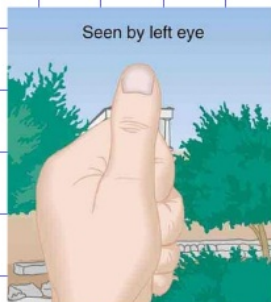
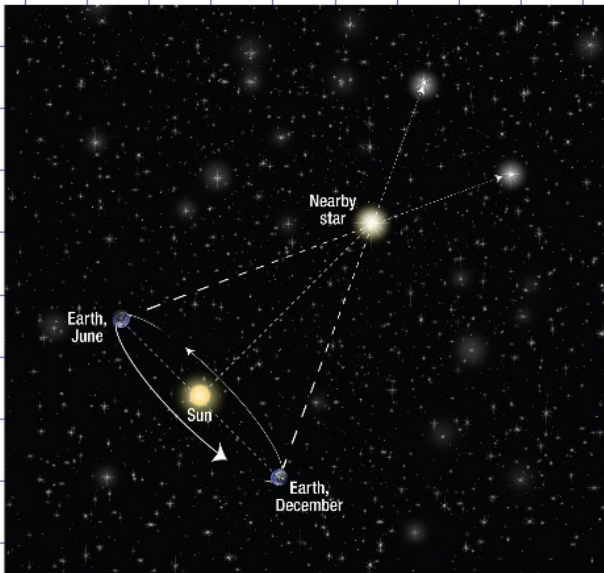
"Hoe meten astronomen afstanden in het heelal?"



radar

geschikt voor afstanden tot +/- 10 AE

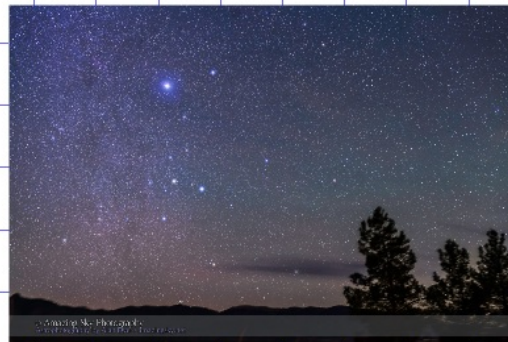
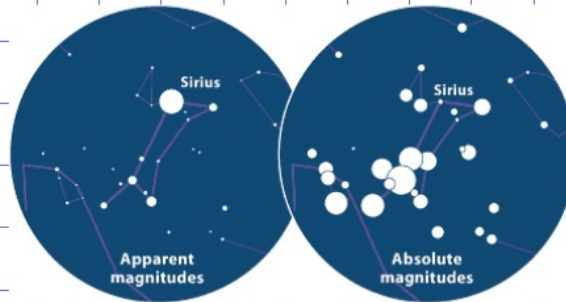
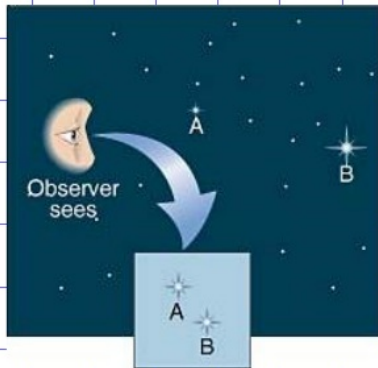
"Hoe meten astronomen afstanden in het heelal?"



Parallax of nearby star

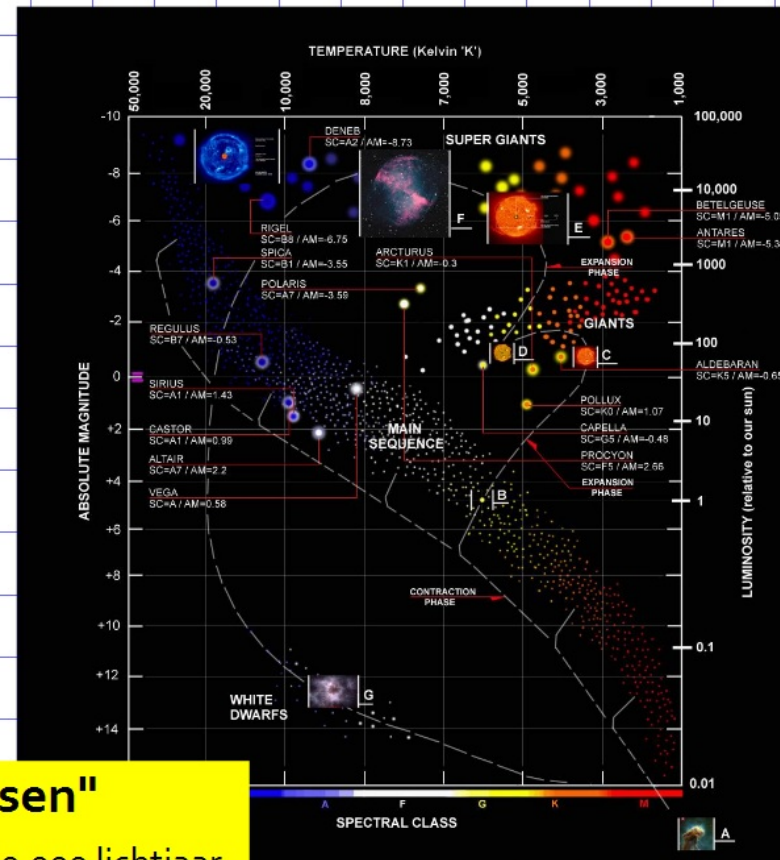
de parallax-methode
geschikt voor afstanden tot 5000 lichtjaar

"Hoe meten astronomen afstanden in het heelal?"

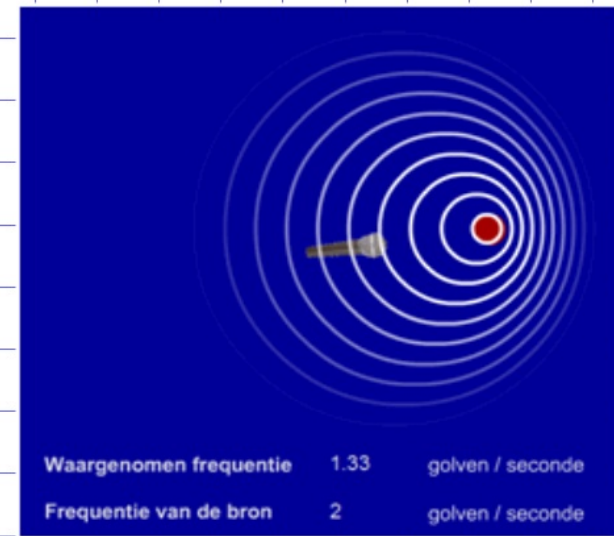
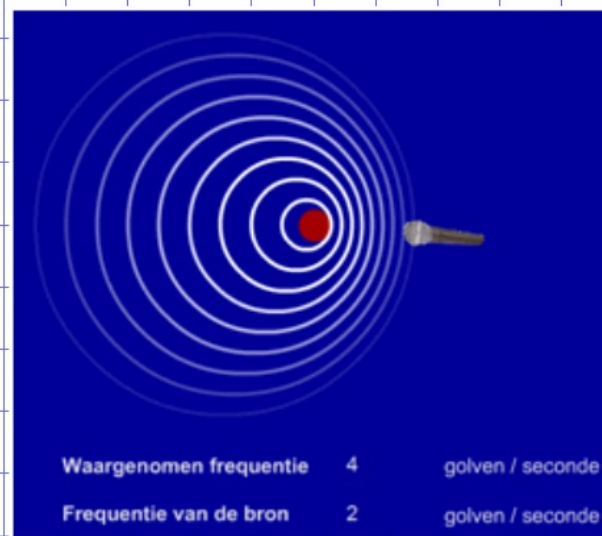
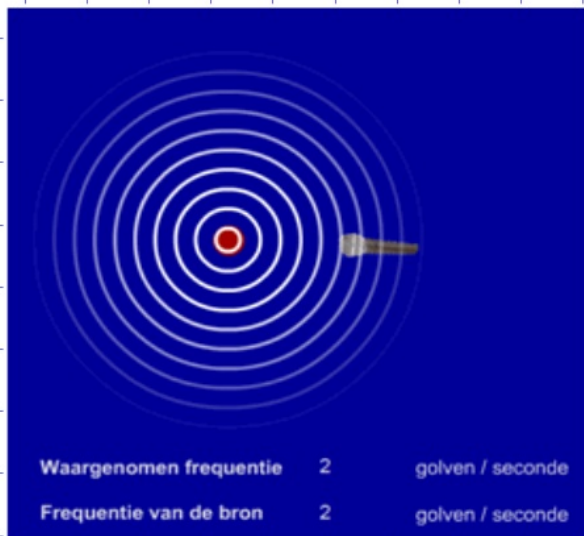


"standaardkaarsen"

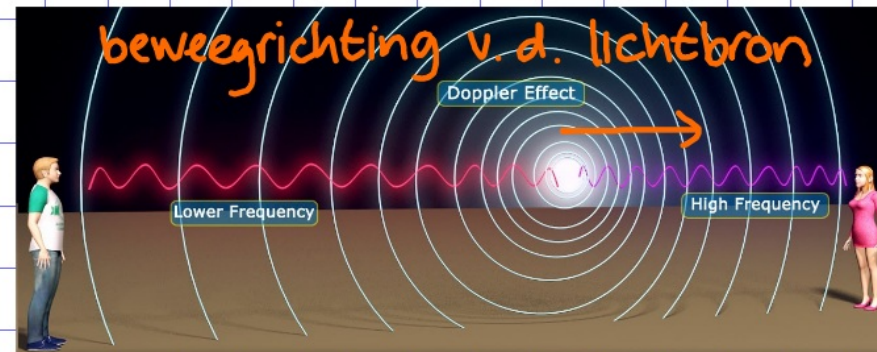
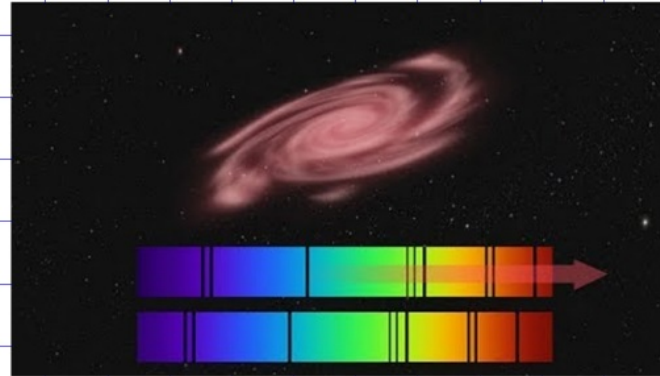
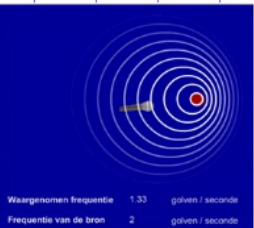
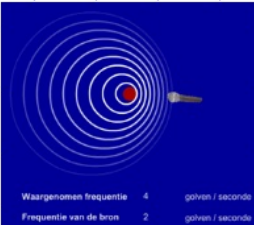
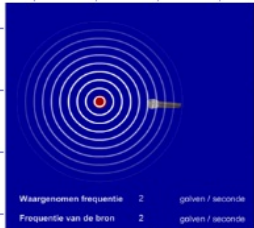
geschikt voor afstanden tot 100.000 lichtjaar



"Hoe ontstaat het Doppler-effect?"



"Hoe meten astronomen afstanden in het heelal?"



Doppler (Animatie, Emb)

Doppler-effect (Youtube, 16s)

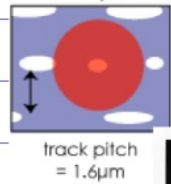
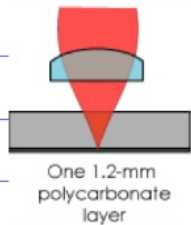
"roodverschuiving"

geschikt voor afstanden tot andere sterrenstelsels en verder

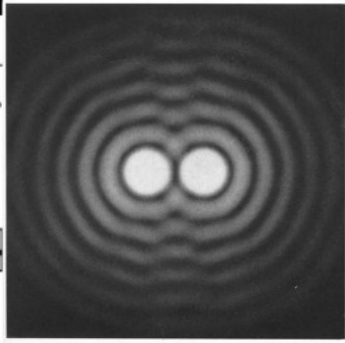
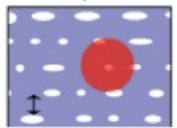
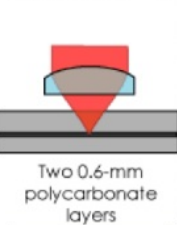
"Welke natuurlijke grenzen heeft resolutie?"

CD vs. DVD vs. Blu-ray Writing

CD
780-nm Red Laser
Lens Aperture = 0.45



DVD
650-nm Red Laser
Lens Aperture = 0.6



Getrennte Bilder von zwei punktförmigen, inkohärenten Lichtquellen
• Images séparées de 2 sources ponctuelles incohérentes
• Separated images of 2 incoherent point sources

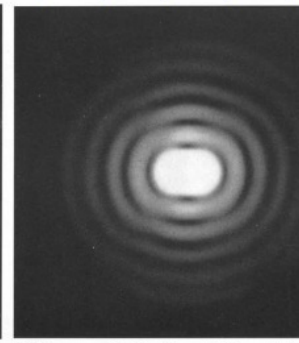
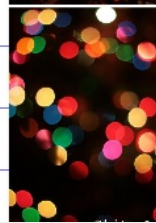
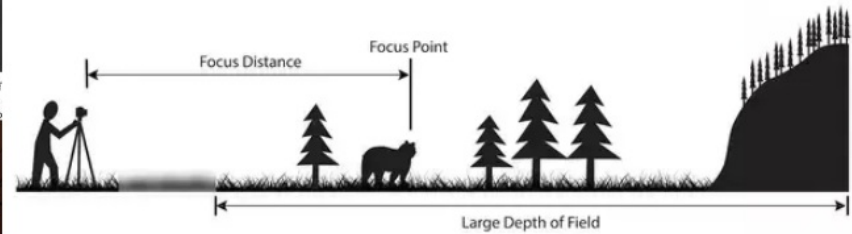
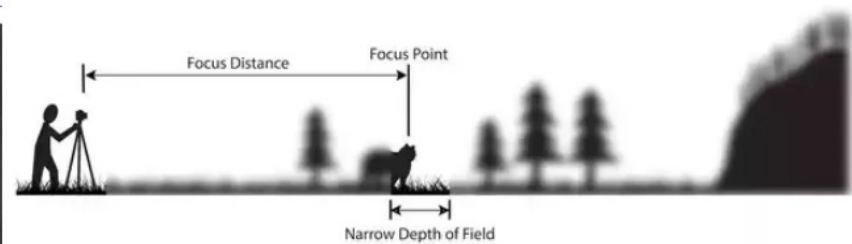
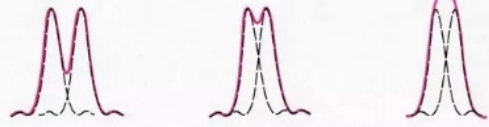
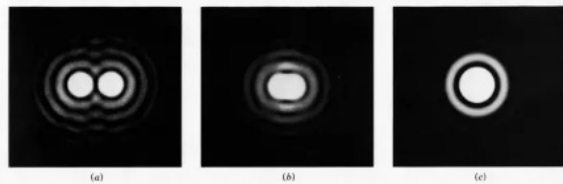


Abbildung von zwei Lichtpunkten an der Grenze der Auflösung
• Images des 2 sources incohérentes à la limite de séparation
• of a pair of incoherent point sources at the limit of resolution

$$s = \frac{\lambda}{D}$$



"Wat is het verschil tussen kracht, energie, vermogen en intensiteit?"



Tony Robbins, motivational speaker

$$W = F \cdot s$$

$$P = \frac{E}{\Delta t}$$

$$I = \frac{P}{A}$$

"Tony is a **intense** speaker."

$$I = ? \text{ (W/m}^2\text{)}$$

"Tony is a **forceful** speaker."

$$F = ? \text{ (N)}$$

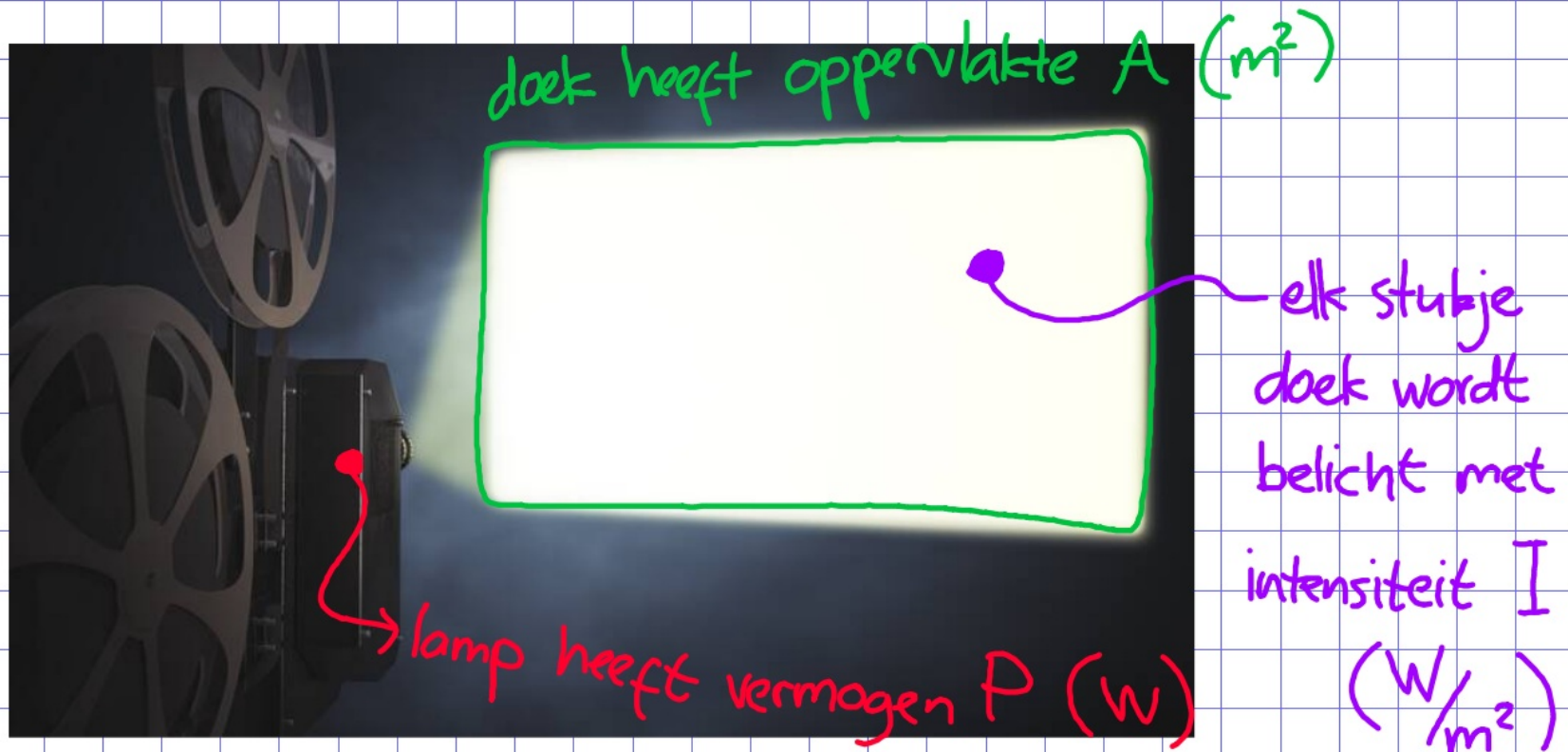
"Tony is an **energetic** speaker."

$$E = ? \text{ (J)}$$

"Tony is a **powerful** speaker."

$$P = ? \text{ (W)}$$

"Wat is het verschil tussen kracht, energie, vermogen en intensiteit?"



"Welke objecten kom je tegen in het heelal?"

sterren

rode reuzen

pulsars

quasars

zwarte gaten

neutronensterren

nevels

Hoofdstuk 18: Astrofysica

- ***BONUSVRAGEN*** -

Hier staan de bonusvragen bij dit hoofdstuk. Deze vragen zijn bedoeld om je te laten nadenken over wat je geleerd hebt. Soms moet je kennis reproduceren of een geoefende techniek laten zien. Ook zitten hier inzichtvragen tussen waarvoor je geleerde kennis op een nieuwe en creatieve manier moet toepassen. Deze vragen zijn zeer nuttig om voor een proefwerk nog een keer langs te lopen!

"Tekst bonusvraag hier."

- BONUSVRAAG! -

Hoofdstuk 18: Astrofysica

- UITLEG & AANTEKENINGEN -

De volgende dia's zijn de aantekeningen die je in de les overgenomen hebt. Alles wat hier tussen de rode lijnen staat zou ook in je schrift moeten staan. Dit is de essentiële stof voor het proefwerk en deze moet je proberen volledig te begrijpen. Je vindt hier ook de tekst bij de bordoefeningen waarvan je als het goed is alleen de uitwerkingen hebt opgeschreven.

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Het waarnemen van straling uit het heelal

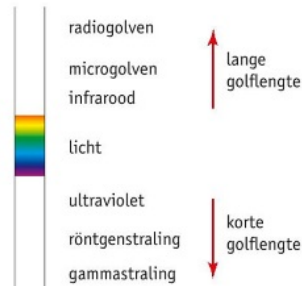
1. Informatie over sterren wordt afgeleid uit het licht dat ze uitzenden. Dit wordt bestudeerd met telescopen. Sterren zenden licht uit over het gehele EM-spectrum. Je kunt kiezen welke soort straling je bekijkt:

grote golflengte

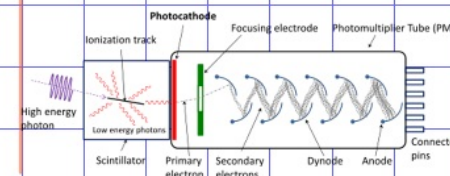
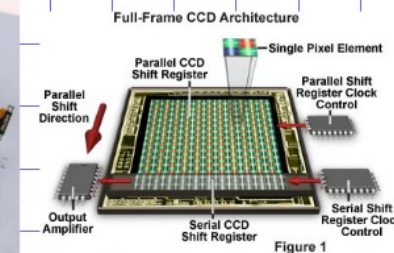
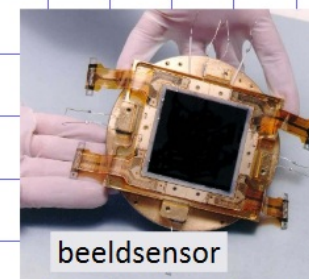
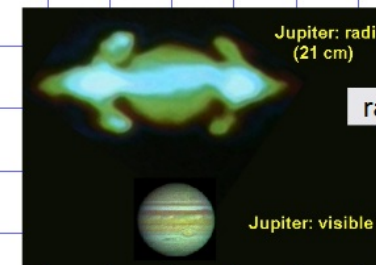
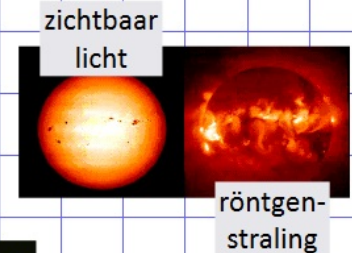
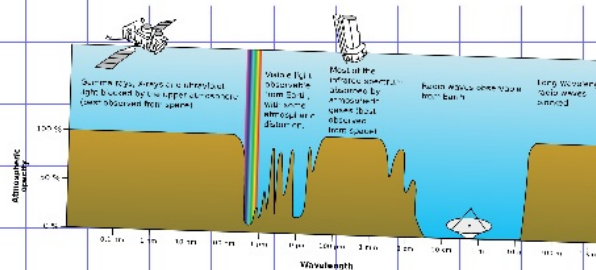
gaat makkelijk door de dampkring
weinig energie per foton: groot detectieoppervlak nodig of lange opnameduur per foto.
wordt uitgezonden door koude bronnen

kleine golflengte

gaat moeilijk door dampkring
makkelijk te detecteren door grote energie per foton
wordt uitgezonden door hete bronnen
moeilijk focusseerbaar door groot doordringend vermogen

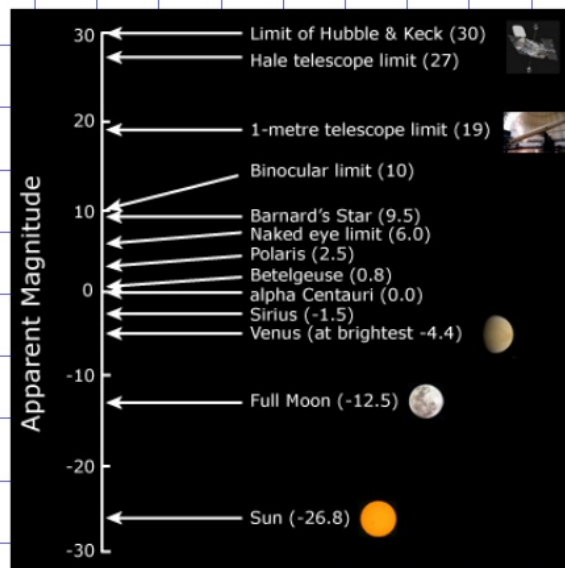


▲ **Figuur 18.5** Het elektromagnetische spectrum kan in verschillende gebieden worden onderverdeeld.



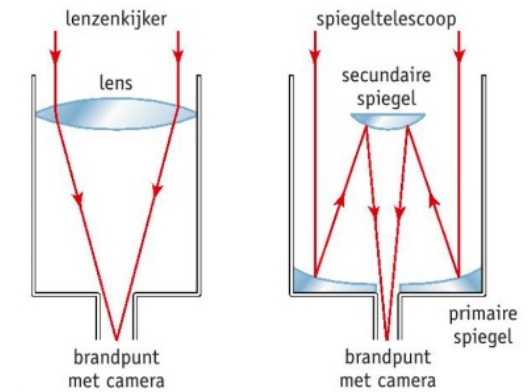
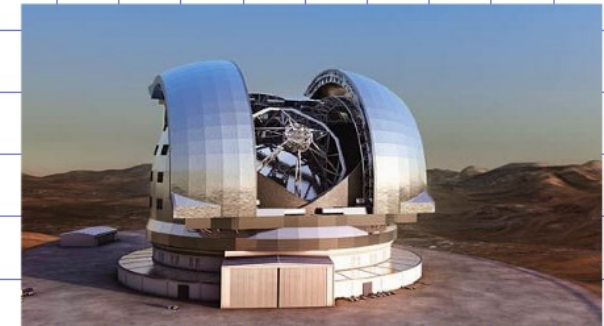
2. Telescopen maken een scherp beeld met lenzen of met spiegels.

Een sterke telescoop heeft een **grote diameter** (en dus een groot oppervlak) zodat ook lichtzwakke objecten te zien zijn.



Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal



▲ **Figuur 18.7** De stralengang door een lenzentelescoop en een spiegeltelescoop, lichtstralen van hemellichamen vormen een evenwijdige bundel.

1a)

$$E = h \cdot f$$

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$s = v \cdot t$$

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} = \frac{4,136 \cdot 10^{-15} \cdot 3,00 \cdot 10^8}{700 \text{ eV}} = 1,77 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

1b) $\left(\rightarrow \frac{1,5 \text{ m}}{1,77 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 8,5 \cdot 10^8 \text{ keer zo weinig} \right)$

het radio-foton heeft: $\frac{1,77 \cdot 10^{-9}}{1,5} = 1,18 \cdot 10^{-9} \text{ keer zo veel energie als het } \gamma\text{-foton}$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

Opdrachten

- 1 a Bereken de golflengte van een foton dat een energie heeft van 700 eV.
- b Bereken hoeveel keer zo weinig energie een radiofoton met een golflengte van 1,5 m heeft.

- 2 Stel dat er een zwakke lichtbron aan de hemel is waarvan in elk golflengtegebied (gamma, röntgen, ultraviolet, zichtbaar, infrarood, microgolf, radio) elke seconde 10 fotonen per m² de aarde bereiken. Stel dat de minimum hoeveelheid energie die je nodig hebt voor de detectie van straling $1,0 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ is.
 - a Bereken de minimale belichtingstijd om deze bron te detecteren via röntgenfotonen met een energie van 70 keV. Je doet de waarneming met een röntgentelescoop met een spiegel van 1,0 m².
 - b Stel dat een optische telescoop een cirkelvormige spiegel heeft met een diameter van 4,0 m. De gemiddelde golflengte van optische fotonen is 500 nm. Bereken hoelang je met een camera achter die telescoop moet belichten om het object te detecteren.

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js of } 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

2a

$$\Delta t = ?$$

$$10 \text{ fot s}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

$$\Delta E = 1,0 \cdot 10^{-13} \text{ J (voor detectie)}$$

$$A = 1,0 \text{ m}^2$$

$$\text{röntgenfotonen, } E = 70 \text{ keV} = 1,12 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

$$\Delta E = P \cdot \Delta t$$

$$P = \frac{\text{fot}}{\text{s}} \cdot \frac{E}{\text{fot}} = 10 \cdot 1,12 \cdot 10^{-14} = 1,12 \cdot 10^{-13} \text{ J s}^{-1}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta E}{P} = \frac{1,0 \cdot 10^{-13} \text{ J}}{1,12 \cdot 10^{-13} \text{ J/s}} = 0,89 \text{ s}$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

Opdrachten

- 1 a Bereken de golflengte van een foton dat een energie heeft van 700 eV.
b Bereken hoeveel keer zo weinig energie een radiofoton met een golflengte van 1,5 m heeft.
- 2 Stel dat er een zwakke lichtbron aan de hemel is waarvan in elk golflengtegebied (gamma, röntgen, ultraviolet, zichtbaar, infrarood, microgolf, radio) elke seconde 10 fotonen per m^2 de aarde bereiken. Stel dat de minimum hoeveelheid energie die je nodig hebt voor de detectie van straling $1,0 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ is.
 - a Bereken de minimale belichtingstijd om deze bron te detecteren via röntgenfotonen met een energie van 70 keV. Je doet de waarneming met een röntgentelescoop met een spiegel van $1,0 \text{ m}^2$.
 - b Stel dat een optische telescoop een cirkelvormige spiegel heeft met een diameter van 4,0 m. De gemiddelde golflengte van optische fotonen is 500 nm. Bereken hoelang je met een camera achter die telescoop moet belichten om het object te detecteren.

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \text{ of } 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV s}$$

2b

$$\Delta t = ?$$

$$d = 4,0 \text{ m} \rightarrow A = \pi \cdot (2,0 \text{ m})^2 = 12,57 \text{ m}^2$$

$$\lambda = 500 \text{ nm}$$

$$10 \text{ fot s}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta E}{P}$$

$$\text{per foton, } E = \frac{h c}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 3,00 \cdot 10^8}{500 \cdot 10^{-9}} = 3,976 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$P = 10 \cdot 12,57 \text{ m}^2 \cdot 3,976 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 4,99 \cdot 10^{-17} \text{ J/s}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta E}{P} = \frac{1,0 \cdot 10^{-13} \text{ J}}{4,99 \cdot 10^{-17} \text{ J/s}} = 2,0 \cdot 10^3 \text{ s}$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

Opdrachten

- 1 a Bereken de golflengte van een foton dat een energie heeft van 700 eV.
b Bereken hoeveel keer zo weinig energie een radiofoton met een golflengte van 1,5 m heeft.
- 2 Stel dat er een zwakke lichtbron aan de hemel is waarvan in elk golflengtegebied (gamma, röntgen, ultraviolet, zichtbaar, infrarood, microgolf, radio) elke seconde 10 fotonen per m^2 de aarde bereiken. Stel dat de minimum hoeveelheid energie die je nodig hebt voor de detectie van straling $1,0 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ is.
 - a Bereken de minimale belichtingstijd om deze bron te detecteren via röntgenfotonen met een energie van 70 keV. Je doet de waarneming met een röntgentelescoop met een spiegel van $1,0 \text{ m}^2$.
 - b Stel dat een optische telescoop een cirkelvormige spiegel heeft met een diameter van 4,0 m. De gemiddelde golflengte van optische fotonen is 500 nm. Bereken hoelang je met een camera achter die telescoop moet belichten om het object te detecteren.

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \text{ of } 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV s}$$

2 (vervolg). Een groot oppervlak is ook nodig voor een groot **onderscheidend vermogen**.

Dit is afhankelijk van de diameter volgens:

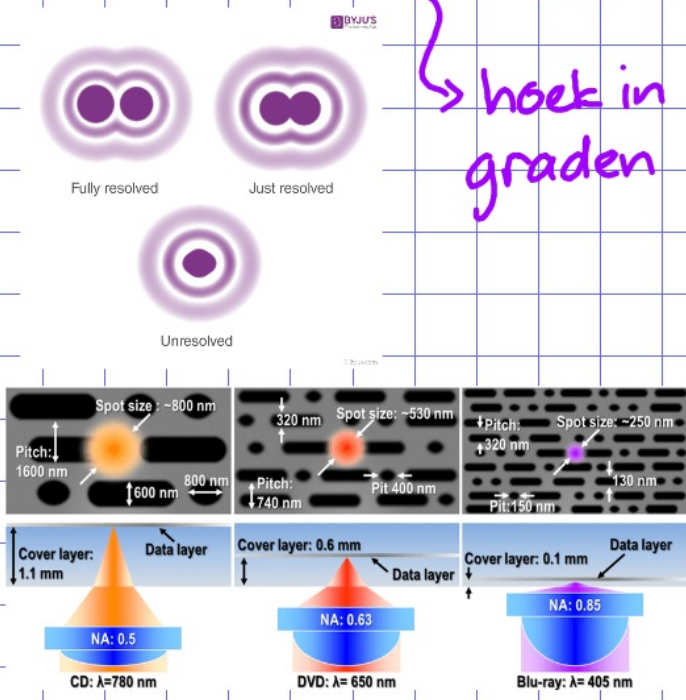
Dit onderscheidend vermogen staat los van de kwaliteit van de lens of spiegel en of de telescoop goed scherpgesteld is.

$$s = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} \frac{180}{\pi}$$

Let op: een kleine s is "beter"!

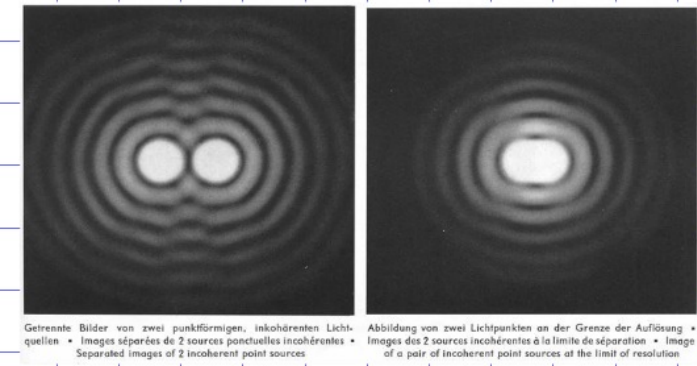
conversie van RAD naar DEG

hoek in graden



Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal



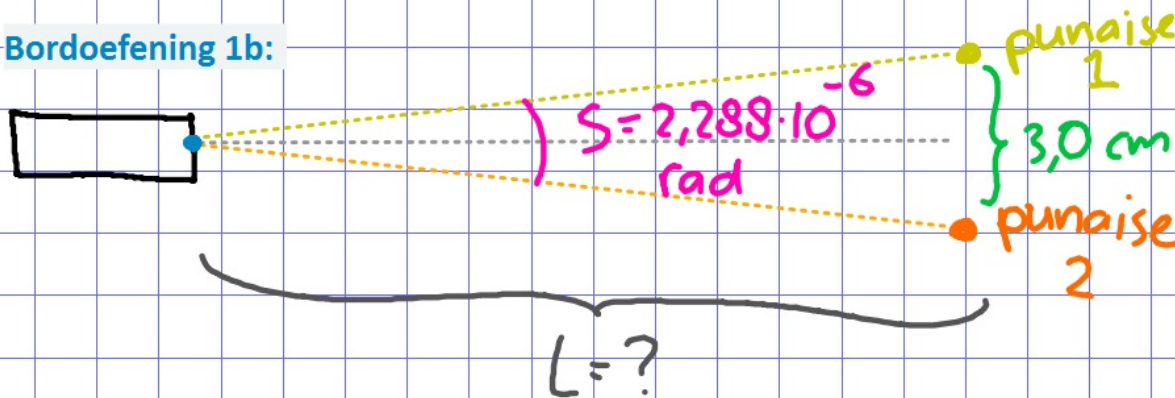
Getrennte Bilder von zwei punktförmigen, inkohärenten Lichtquellen • Images séparées de 2 sources ponctuelles incohérentes • Separated images of 2 incoherent point sources • Abbildung von zwei Lichtpunkten an der Grenze der Auflösung • Images des 2 sources incohérentes à la limite de séparation • Image of a pair of incoherent point sources at the limit of resolution

Bordoefening 1a:

$$S = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} \cdot \frac{180}{\pi} = \frac{1,22 \cdot 600 \cdot 10^{-9}}{0,32} \cdot \frac{180}{\pi} = 1,311 \cdot 10^{-4} \text{ graden}$$

$$S = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} = \frac{1,22 \cdot 600 \cdot 10^{-9}}{0,32} = 2,288 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$

Bordoefening 1b:

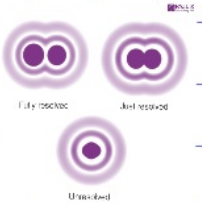


$$\tan S = \frac{0,0300}{L} \rightarrow L = \frac{0,0300}{\tan(2,288 \cdot 10^{-6})} = 13,1 \text{ km}$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

Bordoefening 1a: Bepaal het onderscheidend vermogen S van een optische telescoop met een diameter van 32 cm. Gebruik als golflengte 600 nm. Geef S in radialen en in graden.



Bordoefening 1b: Op een muur zitten twee punaises 3,00 cm uit elkaar. Bereken op welke maximale afstand je met deze telescoop de punaises nog van elkaar kunt onderscheiden.

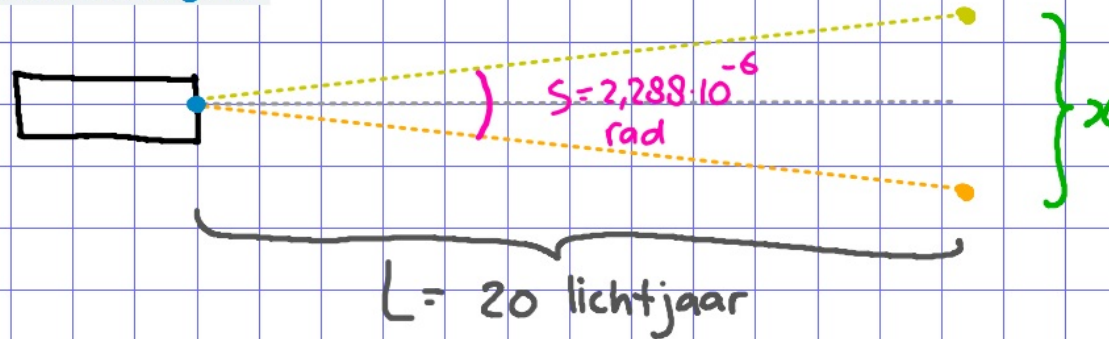
nuttige info

$$1,0 \text{ lj} = 9,461 \cdot 10^{15} \text{ m}$$

$$1 \text{ AE} = 150 \cdot 10^9 \text{ m}$$

kleine hoeken: $\theta = \tan \theta = \sin \theta$

Bordoefening 1c:



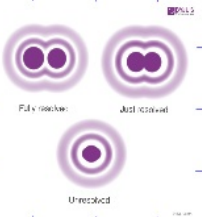
$$\tan S = \frac{x}{L} \rightarrow x = \tan(2,288 \cdot 10^{-6}) \cdot (20 \cdot 9,461 \cdot 10^{15})$$

$$x = 4,329 \cdot 10^{11} \text{ m } (= 2,89 \text{ AE})$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

Bordoefening 1c: Reken uit hoe ver twee sterren in een dubbelstersysteem uit elkaar mogen staan zodat je ze met deze telescoop nog van elkaar kunt onderscheiden. Het stelsel staat 20 lichtjaar hier vandaan. Geef je antwoord in AE.



nuttige info

$$1,0 \text{ lj} = 9,461 \cdot 10^{15} \text{ m}$$

$$1 \text{ AE} = 150 \cdot 10^9 \text{ m}$$

kleine hoeken: $\theta = \tan \theta = \sin \theta$

3 vergrotingsfactor, $k = \frac{10 \text{ m}}{0,010 \text{ m}} = 1,0 \cdot 10^3$

$$A_{\text{telescoop}} = k^2 \cdot A_{\text{pupil}} = 1,0 \cdot 10^6$$

4a
$$S = \frac{1,22 \cdot 1000 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{10 \text{ m}} \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$= 6,99 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ$$

graden

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

- 3 De pupillen van onze ogen hebben in het donker een diameter van hooguit 1,0 cm. De grootste telescoop ter wereld heeft een spiegel met een diameter van 10 m. Bereken hoeveel keer zo veel licht die spiegel per seconde kan opvangen, in vergelijking met onze ogen.
- 4 De beeldscherpte die een telescoop kan bereiken wordt uitgedrukt in het 'scheidend vermogen' dat aangeeft hoe dicht bij elkaar twee lichtpuntjes aan de hemel kunnen staan zodat je ze nog net gescheiden kunt zien. Uit de optica blijkt dat het scheidend vermogen S afhangt van de golflengte λ van het licht en de diameter D van de telescoopspiegel, volgens de formule:

$$S = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} \cdot \frac{180}{\pi}$$

Hier is S uitgedrukt als hoek in graden aan de hemel.

- a Bereken het scheidend vermogen in het infrarood van de Gran Telescopio Canarias, GTC, op La Palma. Deze telescoop heeft een diameter van 10 meter en kan in het infrarood waarnemen bij een golflengte van 1000 nm.

$$4a \quad S = \frac{1,22 \cdot 1000 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{10 \text{ m}} \cdot \frac{180}{\pi} = 6,99 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}$$

b een boogseconde is $2,78 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}$

$$\frac{6,99 \cdot 10^{-6}}{2,78 \cdot 10^{-4}} = 0,025 \text{ ''}$$

← symbool voor boogseconden

GPS COORDINATES OF DAM SQUARE, NETHERLANDS

DOWNLOAD AS JSON

DD COORDINATES

52.373 4.893

DMS COORDINATES

52°22'22.80" N 4°53'34.80" E

GEOHASH COORDINATES

u173zq4y

UTM COORDINATES

31U 628866.66044394 5804211.9516117

52,373° N

52° 22' 22,80" N

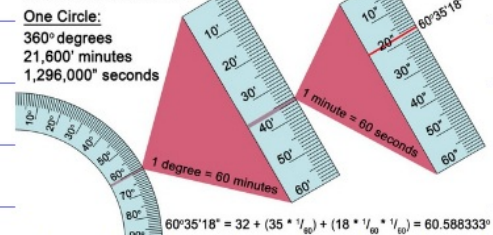
Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

- b Het scheidend vermogen wordt vaak omgerekend naar het aantal boogseconden aan de hemel. Een boogseconde is $\frac{1}{3600}$ graad aan de hemel. Druk het scheidend vermogen uit vraag a uit in boogseconden.
- c Een menselijke haar van 0,10 mm dik gezien op een afstand van 20 meter heeft een hoekbreedte van 1,0 boogseconde. Bereken op welke afstand je de haar moet houden zodat je hem met de GTC nog net kunt waarnemen. Ga uit van dezelfde golflengte als in vraag a.

- 5 Geef minstens twee redenen waarom een telescoop als de European Extremely Large Telescope nooit in Nederland gevestigd zal worden.

Measuring Angles in Degrees, Arcminutes and Arcseconds

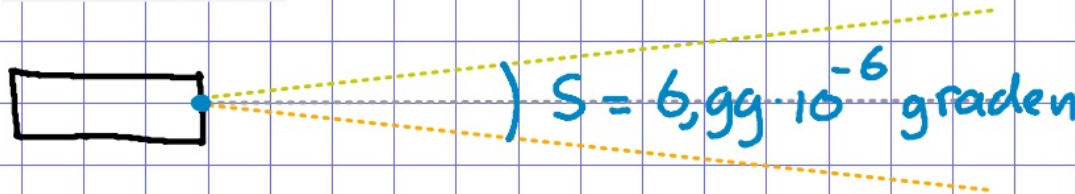


4c

$$S = \frac{1,22 \cdot 1000 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{10 \text{ m}} \cdot \frac{180}{\pi} = 6,99 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}$$

van opg 4a

Bordoeffening 1b:



$$1 \text{ boogseconde} = 2,78 \cdot 10^{-4} \text{ graden}$$

$$\frac{2,78 \cdot 10^{-4}}{6,99 \cdot 10^{-6}} = 39,7 \rightarrow 39,7 \cdot 20 \text{ m} = 8,0 \cdot 10^2 \text{ m}$$

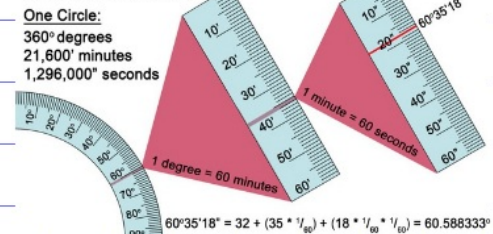
Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

- b Het scheidend vermogen wordt vaak omgerekend naar het aantal boogseconden aan de hemel. Een boogseconde is $\frac{1}{3600}$ graad aan de hemel. Druk het scheidend vermogen uit vraag a uit in boogseconden.
- c Een menselijke haar van 0,10 mm dik gezien op een afstand van 20 meter heeft een hoekbreedte van 1,0 boogseconde. Bereken op welke afstand je de haar moet houden zodat je hem met de GTC nog net kunt waarnemen. Ga uit van dezelfde golf lengte als in vraag a.

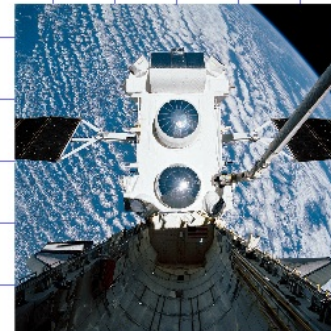
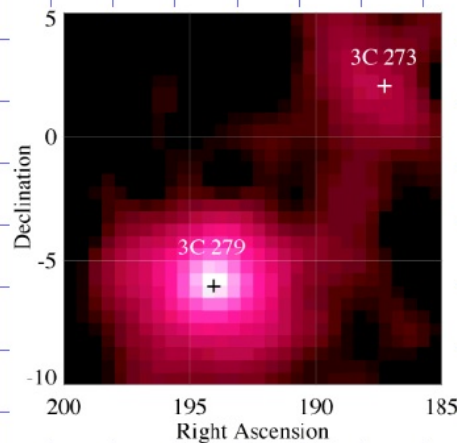
- 5 Geef minstens twee redenen waarom een telescoop als de European Extremely Large Telescope nooit in Nederland gevestigd zal worden.

Measuring Angles in Degrees, Arcminutes and Arcseconds



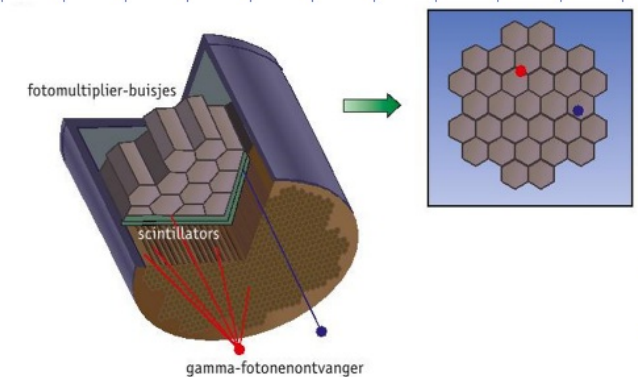
3. Ultraviolet wordt uitgezonden door relatief hete voorwerpen die je met zichtbaar licht anders niet zou zien. Hetzelfde geldt voor bepaalde gebeurtenissen in het heelal die alleen **röntgen- en gammastraling** uitzenden.

Omdat röntgen- en gammastraling een hoog **doordringend vermogen** hebben kan het niet gemanipuleerd worden met lenzen of spiegels. Daarom zijn alleen simpele beelden te maken met **ruimtetelescopen**.

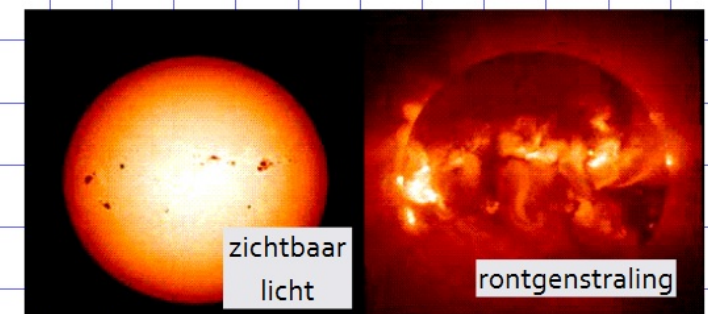


Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal



▲ **Figuur 18.10** Een camera voor gammastraling



6a $d = 0,32 \text{ l.j.}$; dus $r = 0,16 \text{ l.j.}$

$$\Delta r = 0,001 \cdot 0,16 \text{ l.j.} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ l.j.}$$

$$\Delta r = 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m} = 1,51 \cdot 10^{12} \text{ m}$$

$$\Delta t = 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 3,15 \cdot 10^7 \text{ s}$$

$$v = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{1,51 \cdot 10^{12} \text{ m}}{3,15 \cdot 10^7 \text{ s}} = 4,8 \cdot 10^4 \text{ m/s}$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

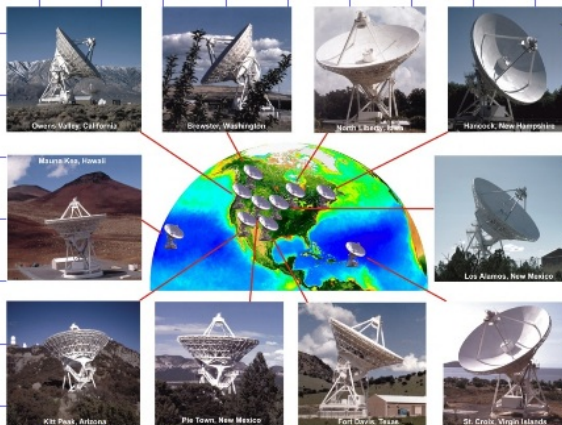
§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

6 Uit vergelijking van opnamen die de Hubble ruimtetelescoop met tussenpozen heeft gemaakt, blijkt dat de afmeting van de Kattenognevel 0,1% per jaar toeneemt.

- a Bereken de snelheid (in km/s) waarmee de nevel uitzet.
- b Bereken het tijdstip van ontstaan van de nevel, ervan uitgaande dat die snelheid altijd dezelfde is geweest.

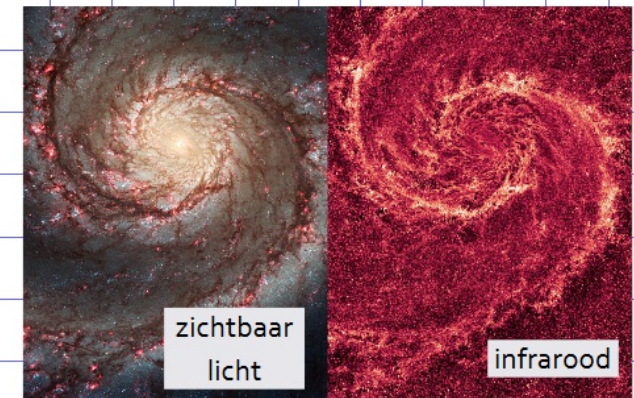
4. Langgolvige straling zoals **infrarood** en **radiogolven** worden uitgezonden door relatief **koele objecten** zoals nevels, gaswolken en (relatief) koude sterren. Radiogolven spelen hierom ook een rol bij **kosmologisch onderzoek**.

Omdat zulke langgolvige straling maar **weinig energie per foton** heeft moeten telescopen een **groot oppervlak** hebben of **langdurige opnamen** maken om toch genoeg fotonen op te vangen voor een goed beeld van een fenomeen.



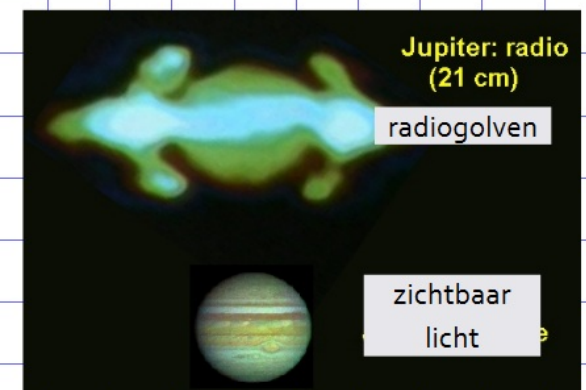
Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal



zichtbaar
licht

infrarood



Jupiter: radio
(21 cm)

radiogolven

zichtbaar
licht

$$\begin{aligned}
 7 \quad \lambda &= \frac{h \cdot c}{E} = \frac{4,136 \cdot 10^{-15} \cdot 3,00 \cdot 10^8}{9,4 \cdot 10^{10} \text{ eV}} \\
 &= 1,3 \cdot 10^{-17} \text{ m} \\
 &= 0,0000000013 \text{ nm}
 \end{aligned}$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

- 7 In april 2013 hebben astronomen een geweldige gammaflits van een ver sterrenstelsel in het sterrenbeeld Leeuw waargenomen. Deze waarneming werd gedaan met de Fermi ruimtetelescoop. De energie van de fotonen die werden opgevangen was $9,4 \cdot 10^{10} \text{ eV}$. Bereken de golflengte van deze fotonen.

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js of } 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

8

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{350 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 0,857 \text{ m} = 85,7 \text{ cm}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{8,3 \cdot 10^9 \text{ Hz}} = 0,0361 \text{ m} = 3,61 \text{ cm}$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

- 8 De Westerbork Synthese Radio Telescoop, kortweg WSRT, kan frequenties waarnemen tussen 350 MHz en 8,3 GHz. Waterstofgas zendt straling uit met een golflengte van 21 cm. Laat zien dat deze straling kan worden waargenomen met de WSRT.

- 9 Ook voor het scheidend vermogen van de WSRT geldt de formule uit opdracht 4:

$$s = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} \cdot \frac{180}{\pi}$$

De twee buitenste telescopen, die 2,7 km uit elkaar staan, bepalen de diameter D van het instrument.

- Bereken het scheidend vermogen als er straling wordt waargenomen met een golflengte van 10 cm.
- Als het scheidend vermogen wordt bepaald door de twee buitenste telescopen, waarom staat er dan toch een hele rij telescopen?
- Hoe komt het dat het scheidend vermogen van de WSRT zoveel slechter is dan van de optische telescoop uit opdracht 4?

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \text{ of } 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

$$g_a \quad s = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} \cdot \frac{180}{\pi} = \frac{1,22 \cdot 0,10 \text{ m}}{2,7 \cdot 10^3 \text{ m}} \cdot \frac{180}{\pi} = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ$$

c $\frac{\lambda}{D}$ is groter voor de WSRT
dan voor de GTC

(die had $S = 1,22 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ$)

kleinere S is beter $\swarrow$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

8 De Westerbork Synthese Radio Telescoop, kortweg WSRT, kan frequenties waarnemen tussen 350 MHz en 8,3 GHz. Waterstofgas zendt straling uit met een golflengte van 21 cm. Laat zien dat deze straling kan worden waargenomen met de WSRT.

9 Ook voor het scheidend vermogen van de WSRT geldt de formule uit opdracht 4:

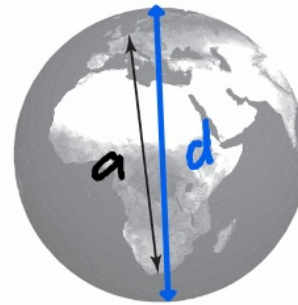
$$s = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} \cdot \frac{180}{\pi}$$

De twee buitenste telescopen, die 2,7 km uit elkaar staan, bepalen de diameter D van het instrument.

- a Bereken het scheidend vermogen als er straling wordt waargenomen met een golflengte van 10 cm.
- b Als het scheidend vermogen wordt bepaald door de twee buitenste telescopen, waarom staat er dan toch een hele rij telescopen?
- c Hoe komt het dat het scheidend vermogen van de WSRT zoveel slechter is dan van de optische telescoop uit opdracht 4?

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \text{ of } 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$$

10a Gebruik de verhouding $\frac{a}{d}$
uit een afbeelding.
Van NL naar ZA is $1,0 \cdot 10^7$ m



$$b \quad S = \frac{1,22 \cdot \lambda}{D} \cdot \frac{180}{\pi} = \frac{1,22 \cdot 0,10 \text{ m}}{1,0 \cdot 10^7 \text{ m}} \cdot 57,32$$

$$= 7,0 \cdot 10^{-7} \text{ graad}$$

$$(d = 1,27 \cdot 10^7 \text{ m})$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

10 Om het scheidend vermogen van radiotelescopen te vergroten, wordt de WSRT in Westerbork vaak gekoppeld aan een groot aantal radiotelescopen in Europa, China en Zuid-Afrika. Westerbork vormt het centrum van deze 'Very Long Baseline Interferometer'. De telescopen nemen tegelijkertijd hetzelfde object waar.

a Bereken de afstand Nederland – Zuid-Afrika zoals je die vanuit de ruimte ziet, dus zonder de kromming van de aarde. Maak ter verduidelijking een schets.

b Bereken het scheidend vermogen van deze VLBI als er straling wordt waargenomen met een golflengte van 10 cm.

11 In figuur 18.14 (zie bron 5) zie je een enkele LOFAR-antenne, een zogeheten dipoolantenne. Het elektromagnetische signaal uit de ruimte wordt opgevangen door de schuine 'scheerlijnen' en vervolgens via de staander onder de grond naar de cabine verderop getransporteerd.

In de cabine komen alle signalen van een antenneveld bij elkaar. Maak een schets van twee LOFAR-antennes die straling opvangen van hetzelfde object. Het object, een ster of sterrenstelsel, wordt onder een hoek van 30 graden met de horizon waargenomen en staat zo ver weg dat de stralen parallel lopen. Bereken hoeveel later de golven aankomen bij de volgende antenne als de antennes 10 meter uit elkaar staan.

11



$$\cos 30^\circ = \frac{x}{10 \text{ m}}$$

$$x = 10 \text{ m} \cdot \cos 30^\circ$$

$$= 8,7 \text{ m}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{8,7 \text{ m}}{3,00 \cdot 10^8} = 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

10 Om het scheidend vermogen van radiotelescopen te vergroten, wordt de WSRT in Westerbork vaak gekoppeld aan een groot aantal radiotelescopen in Europa, China en Zuid-Afrika. Westerbork vormt het centrum van deze 'Very Long Baseline Interferometer'. De telescopen nemen tegelijkertijd hetzelfde object waar.

a Bereken de afstand Nederland – Zuid-Afrika zoals je die vanuit de ruimte ziet, dus zonder de kromming van de aarde. Maak ter verduidelijking een schets.

b Bereken het scheidend vermogen van deze VLBI als er straling wordt waargenomen met een golflengte van 10 cm.

11 In figuur 18.14 (zie bron 5) zie je een enkele LOFAR-antenne, een zogeheten dipoolantenne. Het elektromagnetische signaal uit de ruimte wordt opgevangen door de schuine 'scheerlijnen' en vervolgens via de staander onder de grond naar de cabine verderop getransporteerd.

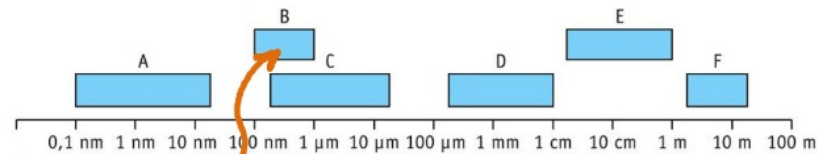
In de cabine komen alle signalen van een antenneveld bij elkaar. Maak een schets van twee LOFAR-antennes die straling opvangen van hetzelfde object. Het object, een ster of sterrenstelsel, wordt onder een hoek van 30 graden met de horizon waargenomen en staat zo ver weg dat de stralen parallel lopen. Bereken hoeveel later de golven aankomen bij de volgende antenne als de antennes 10 meter uit elkaar staan.

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.1 Waarnemen van straling uit heelal

- 12 De supercomputer in Groningen (bron 5) verwerkt 8 terabytes per uur aan binnenkomende gegevens. Bij dit verwerken word de data geschikt gemaakt voor verdere analyse.
- a Hoeveel byte is een terabyte?
 - b Bereken hoeveel schijven van 500 GB je nodig hebt om een dagje aan LOFAR-metingen op te slaan.

- 13 In figuur 18.13 zijn de waarnemingsvensters van de volgende telescopen weergegeven: VLT, Hubble, ALMA, Chandra, LOFAR (zie bron 5) en WSRT. Bepaal met behulp van informatie op internet welk venster bij welke telescoop hoort.



▲ **Figuur 18.13** Waarnemingsvensters van telescopen

hubble

§ 18.2 Het spectraalonderzoek van licht

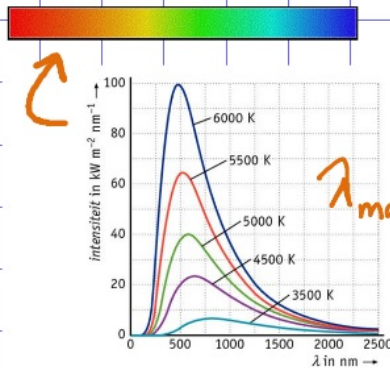
6. Licht van sterren (zoals de zon) is een **combinatie** van continue spectra, absorptiespectra én emissiespectra:

A. Binnenste van de zon + fotosfeer
productie van continu spectrum als zwarte straler met temperatuur vd fotosfeer.

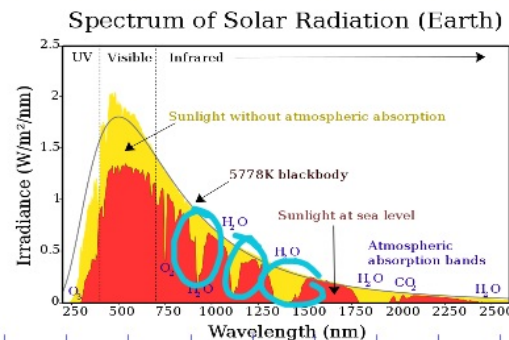
B. Chromosfeer:
absorptie door elementen dus lijnenspectrum

C. Corona:
emissie door elementen dus lijnenspectrum (zwak)

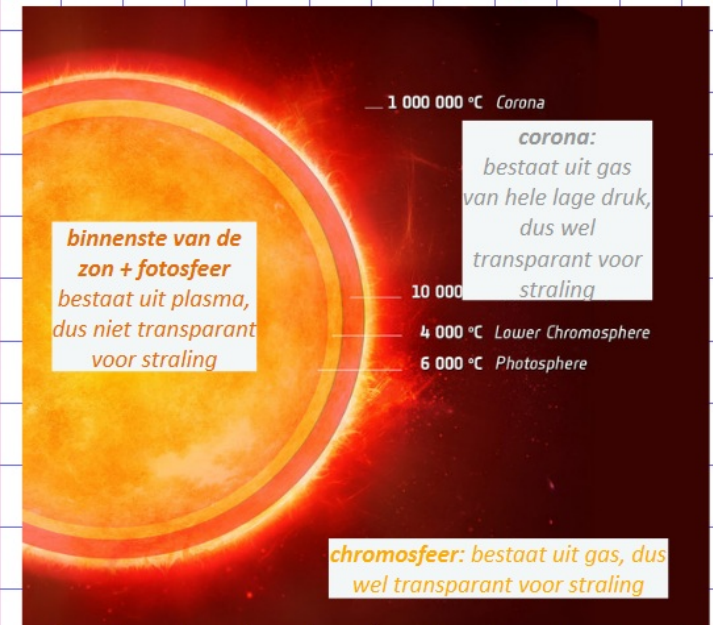
D. Dampkring aarde:
absorptie door moleculen



▲ Figuur 12.8 Verschillende stralingsspectra



Hoofdstuk 18: Astrofysica



geel: zonnenspectrum zoals je het zou meten buiten de dampkring van de aarde

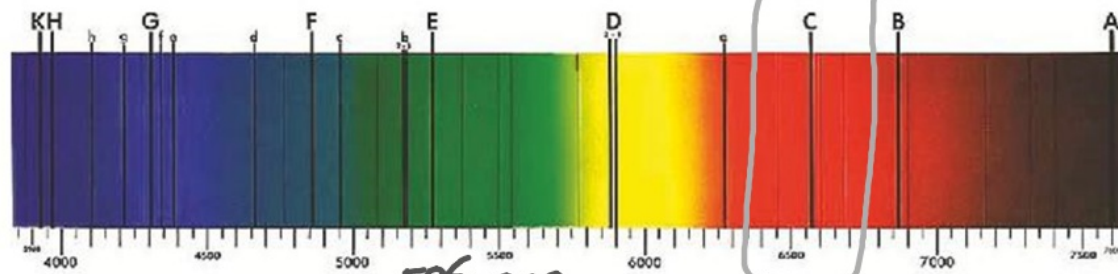
rood: zonnenspectrum zoals je het zou meten aan het aardoppervlak (dus binnen de dampkring)

Hoofdstuk 18: Astrofysica

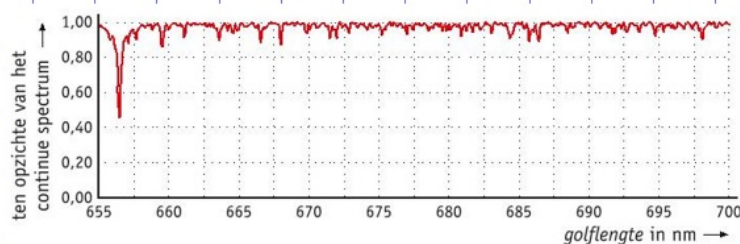
§ 18.2 Spectraalonderzoek van licht

Bordoeffening 2: Kijk in binas tabel 20 welk element verantwoordelijk kan zijn voor de absorptie van lijn E in het zonnenspectrum.

Fe



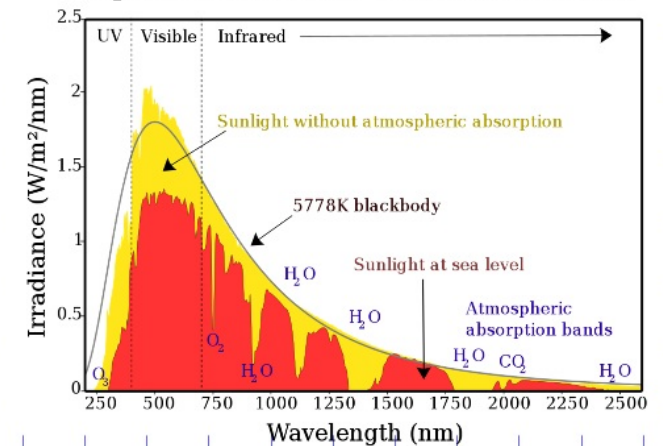
▲ **Figuur 18.23** Zonnenspectrum met de letteraanduiding van belangrijke absorptielijnen



▲ **Figuur 18.22** Een grafiek van een deel van het zonnenspectrum

absorptielijnen van de chromosfeer zijn niet absoluut, maar hebben een sterkte afhankelijk van hoeveel van het bijbehorende element zich in de chromosfeer bevindt

Spectrum of Solar Radiation (Earth)

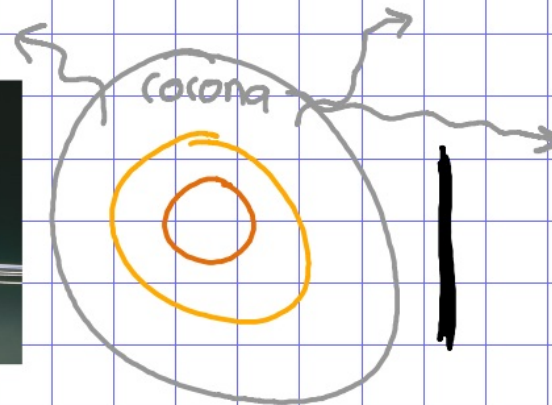


15a 430 nm en 486 nm zijn van H

b 590 nm zijn van Na

16 Dit zijn absorptielijnen van de dampkring van aarde.

14



Hoofdstuk 18: Astrofysica

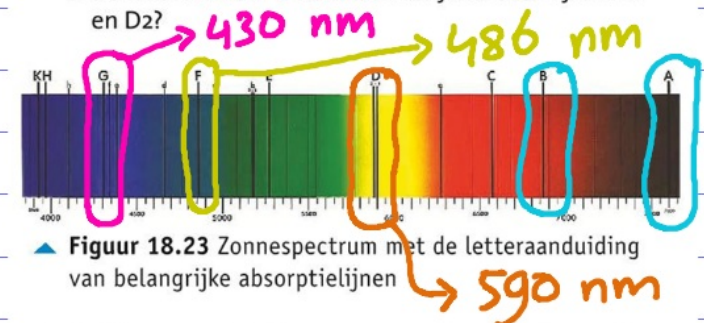
§ 18.2 Spectraalonderzoek van licht

Opdrachten

14 Zie je de spectraallijnen in de corona bij een zonsverduistering als absorptie- of emissielijnen? Leg uit.

15 a Onderzoek figuur 18.23 en gebruik *Binas* om erachter te komen welk element verantwoordelijk is voor de lijnen G en F.

b Welk element is verantwoordelijk voor de lijnen D1 en D2?

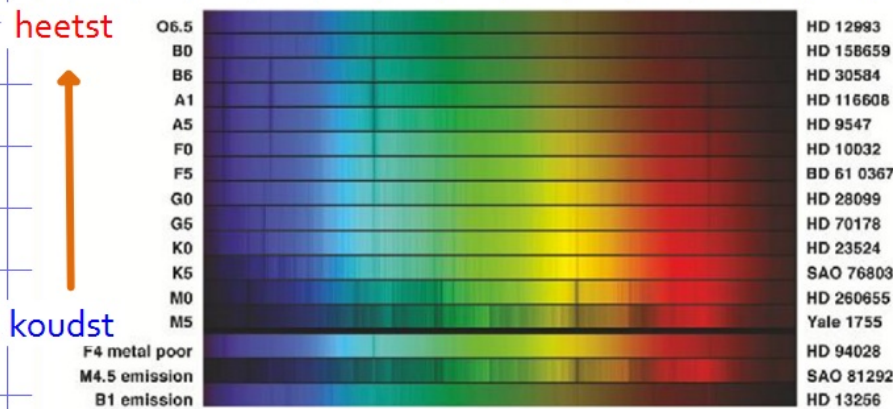


▲ **Figuur 18.23** Zonnespectrum met de letteraanduiding van belangrijke absorptielijnen

16 De lijnen A en B in het zonnespectrum van figuur 18.23 zijn absorptielijnen van het zuurstofmolecuul O_2 . Het oppervlak van de zon is echter zo heet dat dit molecuul daar niet kan bestaan; het zou opbreken in atomair zuurstof. Waarom nam Fraunhofer dan toch lijnen van O_2 waar in het zonnespectrum?

7. Sterren worden ingedeeld naar **twee criteria**:

A. Welke golflengten (dus welk spectrum) ze uitzenden. Hangt vd temperatuur vd ster af. Dit bepaalt het **spectraaltyp**.



▲ **Figuur 18.24** Spectraaltypen en hun lijnenspectrum

B. Het vermogen dat ze uitstralen. Dit bepaalt de **lichtsterkteklasse**.

lichtsterkteklasse	naam
I	superreuzen
II	heldere reuzen
III	reuzen
IV	subreuzen
V	dwergen

Let op: lichtsterkteklassen (I meest helder, V minst helder) zijn een relatieve indeling binnen een spectraaltyp. Je kunt dus niet meteen zeggen dat elke ster van klasse I feller schijnt dan elke ster van klasse II.

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.2 Spectraalonderzoek van licht

Bordoeffening 3: Zoek de sterren Achernar, Agena en Sirius A op in binas tabel 32. Noteer van alle drie het spectraaltyp en rangschik ze van heet naar koud.

Agena: B1 III

Achernar: B3 V

Sirius A: A0 V

Bordoeffening 4: Zoek de sterren Zon en Capella op en bepaal welke de grootste lichtsterkteklasse heeft.

Zon: G2 V

Capella: G8 III

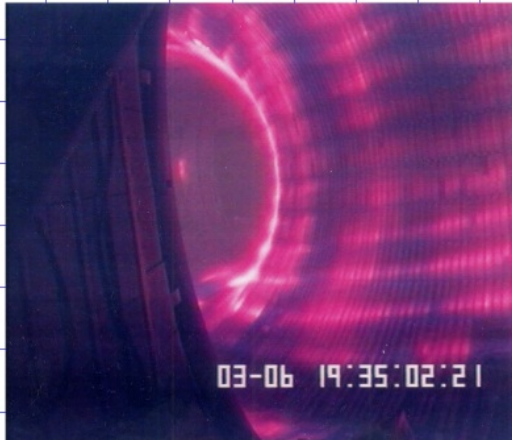
18 a	Achernar	B3 V	16000 K
	Wega	A0 V	10000 K
	Procyon A	F5 IV-V	6700 K
	Rigil Kent A	G2 V	5700 K
	Zon	G2	5800 K
	Arcturus	K2 III	4400 K
	Barnard	M4 V	3000 K

- b** Zie a. Als ook opgave 19 gemaakt is, weet je nu dat de volgorde van heet naar koud is:
O (ongeveer 50000 K) B A F G K M (ongeveer 2000 K). Je kunt dit onthouden met het zinnetje 'Oh Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me'.

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.2 Spectraalonderzoek van licht

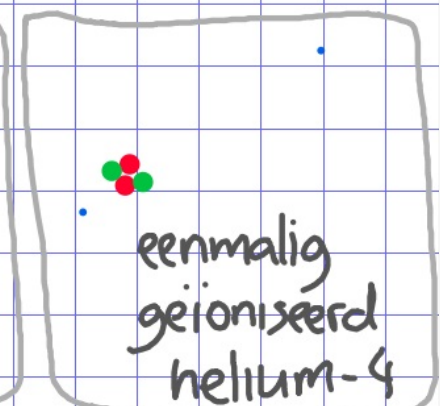
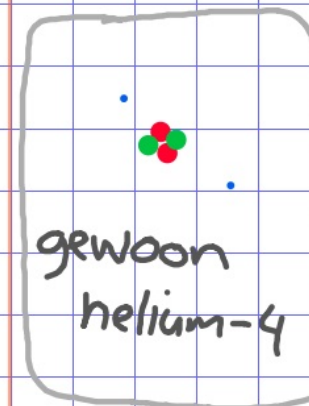
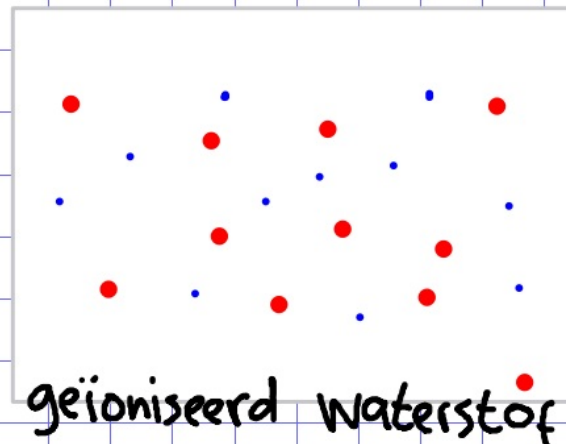
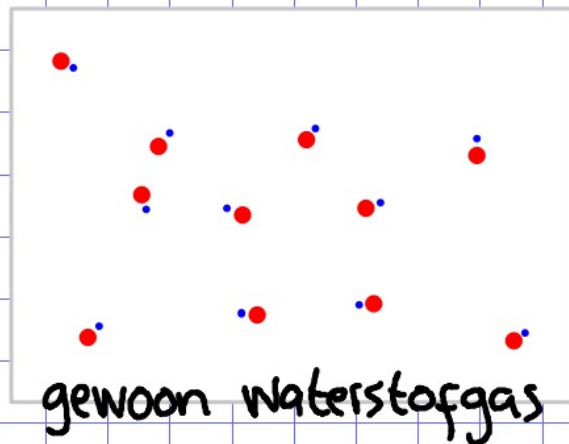
- 17** Lees bron 7. We registreren het spectrum van de maan. De maan is geen ster en je zou kunnen verwachten dat het maanspectrum in het geheel niet lijkt op een sterspectrum. Toch blijkt dat we het maanspectrum een spectrale classificatie kunnen geven.
- a** Waarom kan dat?
- b** Wat is het spectraaltype dat we aan de maan kunnen geven?
- 18 a** Zoek in *Binas* de spectraaltypen (zie bron 7) op van de sterren Achernar, Arcturus, Barnard, Procyon A, Rigil Kent A en Wega. Welke ster lijkt het meest op de zon?
- b** Rangschik deze zes sterren van hoge naar lage effectieve temperatuur. Gebruik *Binas*.



Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.2 Spectraalonderzoek van licht

- 19 a In het spectrum van O-sterren worden lijnen van zowel neutraal helium, He^0 , als geïoniseerd helium, He^+ , gezien. De enige heliumlijnen in de spectra van B-sterren zijn die van neutraal helium, He^0 . Leg hiermee uit dat de O-sterren heter zijn dan de B-sterren. Zie ook bron 7.
- b In de spectra van O3-sterren zijn de He^+ -lijnen sterker (de streepjes zijn 'zwarter') dan de He^0 -lijnen. In de spectra van O9-sterren zijn juist de He^0 -lijnen sterker dan de He^+ -lijnen. Leg uit dat de O3-sterren heter zijn dan de O9-sterren.



8. Door het **Dopplereffect voor EM-straling** lijken spectra **verschoven** als de bronnen (sterren) die het uitzenden van je vandaan of naar je toe bewegen:

Ster beweegt **van je vandaan**: golflengte wordt opgerekt, licht lijkt roder voor waarnemer dan voor de bron. Dit heet **roodverschuiving**.

Ster beweegt **naar je toe**: golflengte wordt ingedrukt, licht lijkt blauwer voor waarnemer dan voor de bron. Dit heet **blauwverschuiving**.

Je kunt deze **Dopplerverschuiving** gebruiken om de snelheid te bepalen waarmee de bron beweegt **t.o.v. een waarnemer** (jij).

$$v = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

met: $\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0$

$\Delta \lambda$: verschil
 λ : gemeten golflengte door waarnemer
 λ_0 : golflengte gemeten door bron

v : snelheid v.d. bron t.o.v. waarnemer

Snelle denkvraag: als $\Delta \lambda$ een positieve waarde heeft, is er dan sprake van *roodverschuiving* of *blauwverschuiving*? En beweegt de bron dan naar je toe of van je vandaan?

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.2 Spectraalonderzoek van licht



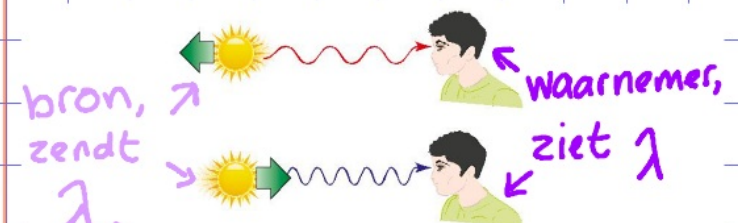
moving toward you: blueshift



at rest



moving away from you: redshift



Figuur 18.25 Rood- en blauwverschuiving

Je kunt deze **Dopplerverschuiving** gebruiken om de snelheid te bepalen waarmee de bron beweegt t.o.v. jou, de waarnemer:

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

v : snelheid v.d. bron t.o.v. waarnemer
 $\Delta\lambda$: verschil
 λ_0 : golflengte gemeten door waarnemer
 λ : golflengte gemeten door bron
 met: $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$

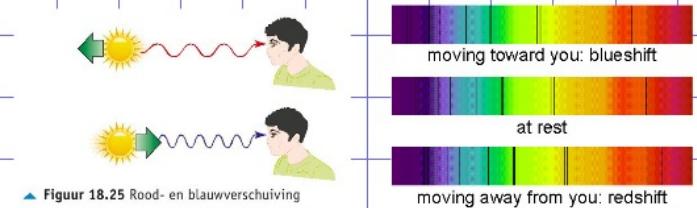
Bordoeffening 4:

$$\Delta\lambda = 590 - 570 = 20 \text{ nm}$$

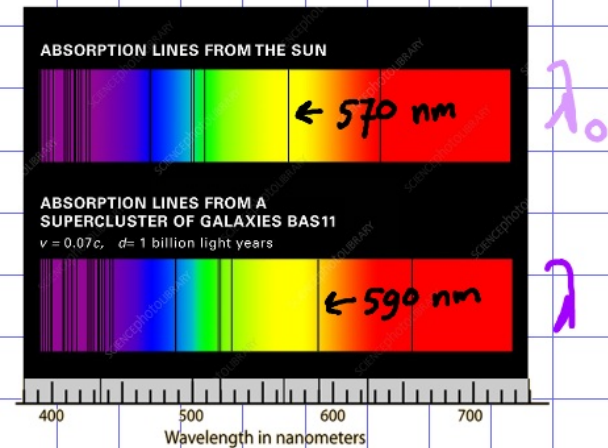
$$v = \frac{20}{570} \cdot 3,00 \cdot 10^8 = 1,0 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

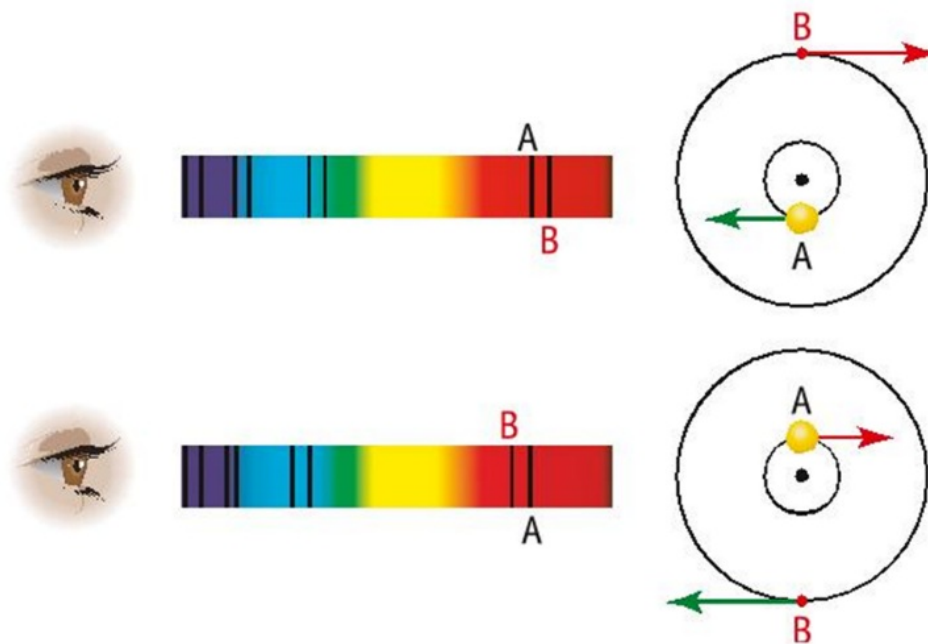
Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.2 Spectraalonderzoek van licht



Bordoeffening 4: Bepaal de Dopplerverschuiving van het spectrum hieronder en bepaal de relatieve snelheid tussen de bron en de waarnemer.





▲ **Figuur 18.26** Dopplerverschuiving bij een dubbelster-systeem

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.2 Spectraalonderzoek van licht

- 20 Je registreert elke nacht een spectrum van een dubbelster. Er gaan 15 dagen voorbij voor de spectraallijnen van elk van de twee componenten opnieuw maximaal verschoven zijn. Hoe groot is de omlooptijd van de dubbelster? Leg uit.
- 21 We nemen het spectrum van een ster en zien een patroon van spectraallijnen dat periodiek verschuift. We zien echter geen tweede patroon van spectraallijnen dat verschuift. Wat zou hiervan de oorzaak kunnen zijn?

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right) \leftarrow \text{start}$$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 \rightarrow \lambda = \Delta\lambda + \lambda_0$$

$$\Delta\lambda + \lambda_0 = \lambda_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

$$\Delta\lambda + \lambda_0 = \lambda_0 + \lambda_0 \frac{v}{c}$$

$$\Delta\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{v}{c}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c} \rightarrow v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

goal:

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.2 Spectraalonderzoek van licht

22 Uit het spectrum van een lichtbron aan de hemel weet je zeker dat je te maken hebt met een dubbelster. Gedurende een periode van een jaar neem je met regelmaat een spectrum waar. Je neemt echter geen dopplerverschuiving van de spectraallijnen waar. Geef een mogelijke oorzaak waardoor je geen dopplerverschuiving ziet.

23 We kunnen de verandering van de golflengte van licht ook beschrijven met de formule $\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$. Hierin is λ_0 de golflengte van het licht dat de bron uitzendt, λ de golflengte van het waargenomen licht, v de snelheid van de bron ten opzichte van de waarnemer, en c de lichtsnelheid.

a Toon aan dat de formule in bron 8 hieruit is af te leiden.

b Een spectraallijn met een golflengte $\lambda_0 = 656,280 \text{ nm}$ wordt waargenomen met een golflengte $\lambda = 656,320 \text{ nm}$. Is hier sprake van roodverschuiving of blauwverschuiving? Leg uit.

c Bereken de snelheid in km/s waarmee de ster beweegt ten opzichte van de waarnemer.

Je kunt deze Dopplerverschuiving gebruiken om de snelheid te bepalen waarmee de bron beweegt t.o.v. jou, de waarnemer:

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

met: $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$

↑
snelheid v.d. bron
t.o.v. waarnemer

↑
verschil

↑
gemeten
golflengte
door waarnemer

↑
golflengte
gemeten
door bron

23b $\lambda > \lambda_0$; dus roodverschuiving

23c $\Delta\lambda = 656,320 - 656,280 = 0,04$

$$v = \frac{0,04}{656,280} \cdot 3,00 \cdot 10^8 = 1,83 \cdot 10^4 \text{ m/s}$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.2 Spectraalonderzoek van licht

22 Uit het spectrum van een lichtbron aan de hemel weet je zeker dat je te maken hebt met een dubbelster. Gedurende een periode van een jaar neem je met regelmaat een spectrum waar. Je neemt echter geen dopplerverschuiving van de spectraallijnen waar. Geef een mogelijke oorzaak waardoor je geen dopplerverschuiving ziet.

23 We kunnen de verandering van de golflengte van licht ook beschrijven met de formule $\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$. Hierin is λ_0 de golflengte van het licht dat de bron uitzendt, λ de golflengte van het waargenomen licht, v de snelheid van de bron ten opzichte van de waarnemer, en c de lichtsnelheid.

a Toon aan dat de formule in bron 8 hieruit is af te leiden.

b Een spectraallijn met een golflengte $\lambda_0 = 656,280 \text{ nm}$ wordt waargenomen met een golflengte $\lambda = 656,320 \text{ nm}$. Is hier sprake van roodverschuiving of blauwverschuiving? Leg uit.

c Bereken de snelheid in km/s waarmee de ster beweegt ten opzichte van de waarnemer.

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren

9. Het binnenste gedeelte van sterren (t/m de fotosfeer) gedraagt zich als een **zwarte straler** (Hfd 12) met een effectieve temperatuur T_{eff} .

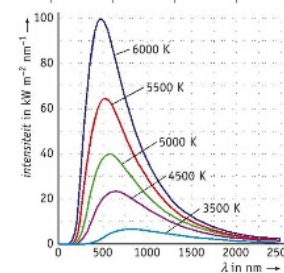
De dominante golflengte kun je uitrekenen met de **(verschuivings)wet van Wien**:

dominante golflengte (m) $\lambda_{\text{max}} \cdot T = k_w$ ← constante v. Wien:
 $\uparrow$ temperatuur (K) $2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$

Bordoeffening 5:

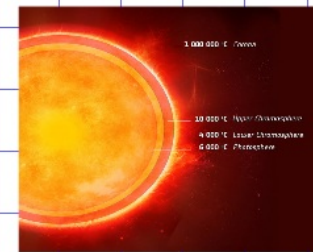
$$T = \frac{k_w}{\lambda_{\text{max}}} = \frac{2,8978 \cdot 10^{-3}}{700 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 4,14 \cdot 10^3 \text{ K (!)}$$

LET OP: temperaturen in formules altijd in **kelvin** invullen.



▲ Figuur 18.28 Intensiteitsverdeling bij verschillende temperaturen

Hoofdstuk 18: Astrofysica



Bordoeffening 5: Reken uit wat de temperatuur van roodgloeiend lava ongeveer zal zijn. Bedenk zelf wat de dominante golflengte waarschijnlijk is (zie ook opg. 1 op blz. 163).

De intensiteit **dicht bij het oppervlak** van een bron hangt alleen van de temperatuur af:

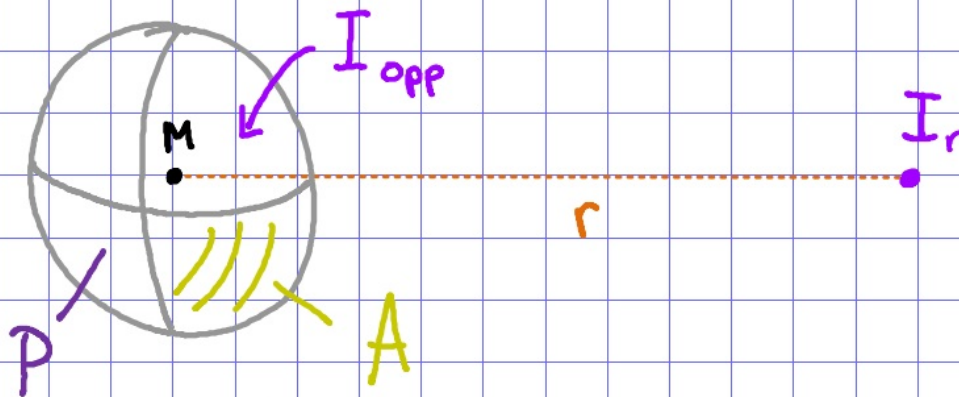
De het **totale uitgestraalde vermogen** van het voorwerp kun je uitrekenen als de de totale oppervlakte weet:

Je kunt vervolgens de **intensiteit op een afstand r** tot het middelpunt van de bron uitrekenen met:

$$I_{\text{opp}} = \sigma \cdot T^4$$

$$P_{\text{bron}} = I_{\text{opp}} \cdot A$$

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



In de astrofysica wordt het uitgestraalde vermogen P_{bron} aangeduid met een L en heet de lichtsterkte.

$$L = P_{\text{bron}}$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren

De **intensiteit dicht bij het oppervlak** van een bron hangt alleen van de temperatuur af:

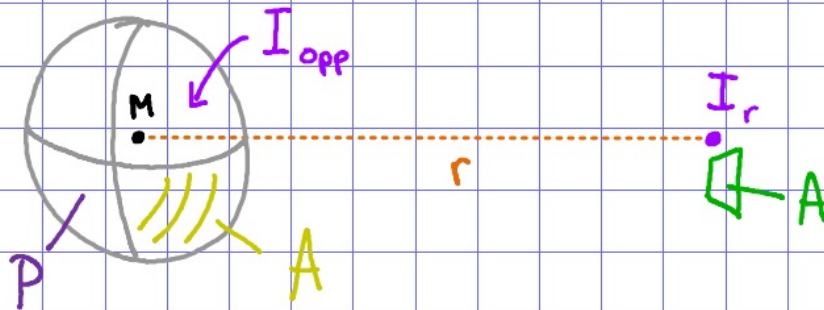
$$I_{\text{opp}} = \sigma \cdot T^4$$

De **totale uitgestraalde vermogen** van het voorwerp kun je uitrekenen als de totale oppervlakte weet:

$$P_{\text{bron}} = I_{\text{opp}} \cdot A$$

Je kunt vervolgens de **intensiteit op een afstand r** tot het middelpunt van de bron uitrekenen met:

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



Tenslotte kun je het **ontvangen vermogen op een afstand r** weer uitrekenen als je het ontvangende oppervlak weet:

$$P_{\text{ontv}} = I_r \cdot A$$

In de astrofysica wordt het uitgestraalde vermogen P_{bron} aangeduid met een L en heet de **lichtsterkte**. De intensiteit op een afstand heet ook wel de **stralingsflux**.

$$L = P_{\text{bron}}$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren

Bordoeffening 6: Reken uit hoeveel stralingsvermogen de zonnepanelen van een satelliet ontvangen. De totale oppervlakte van de panelen is 3360 m^2 . De panelen zijn loodrecht op de zon gericht.

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{max}} \cdot T &= k_W & I_{\text{opp}} &= \sigma \cdot T^4 \\ P_{\text{bron}} &= I_{\text{opp}} \cdot A & I_r &= \frac{P_{\text{bron}}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \\ P_{\text{ontv}} &= I_r \cdot A \\ \text{constante v. Wien: } 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m K} & & \sigma &= 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \\ P_{\text{bron}} &= 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sigma \cdot T^4 \end{aligned}$$

Bordoeffening 6:

$$T = 5,78 \cdot 10^3 \text{ K} \quad R = 6,963 \cdot 10^8 \text{ m}$$

$$I_{\text{opp}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (5,78 \cdot 10^3)^4 = 6,33 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$

$$A_{\text{zon}} = 4\pi r^2 = 12,56 \cdot (6,963 \cdot 10^8 \text{ m})^2 = 6,0896 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$$

$$P_{\text{zon}} = 6,33 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2 \cdot 6,0896 \cdot 10^{18} \text{ m}^2 = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ J/s}$$

$$I_r = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{3,85 \cdot 10^{26} \text{ J/s}}{4 \cdot \pi \cdot (150 \cdot 10^9)^2} = 1364 \text{ W/m}^2$$

$$P_{\text{ont}} = 1364 \text{ W/m}^2 \cdot 3360 \text{ m}^2 = 4,6 \text{ MW}$$

(ISS Solar Array) <https://www.nasa.gov>

Hoofdstuk 18: Astrofysica**§ 18.3 Het continu spectrum van sterren**

Bordoeffening 6: Reken uit hoeveel stralingsvermogen de zonnepanelen van een sateliet ontvangen. De totale oppervlakte van de panelen is 3360 m^2 . De panelen zijn lood-recht op de zon gericht. Doe deze stappen:

- Zoek de temperatuur van de zon op en bereken de intensiteit aan het oppervlakte.
- Zoek de straal van de zon op en bereken de oppervlakte van de zon.
- Reken het vermogen uit dat de zon uitstraalt.
- Bereken de intensiteit van het zonlicht op de afstand waarop de aarde v.d. zon staat.
- Bereken het door de zonnepanelen ontvangen vermogen.

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = k_{\text{W}} \quad I_{\text{opp}} = \sigma \cdot T^4$$

$$P_{\text{bron}} = I_{\text{opp}} \cdot A \quad I_r = \frac{P_{\text{bron}}}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

$$P_{\text{ont}} = I_r \cdot A$$

constante v. Wien: $2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \text{ of } 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

$$24 \text{ a } \lambda_{\max} = \frac{k_w}{T} = \frac{2,8978 \cdot 10^{-3}}{4,5 \cdot 10^4} = 6,44 \cdot 10^{-8} \text{ m} = 64,4 \text{ nm}$$

b UV

$$c \quad \lambda_{\max} = \frac{k_w}{T} = \frac{2,8978 \cdot 10^{-3}}{2500 \text{ K}} = 1,159 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

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

$$I_{\text{opp}} = \sigma \cdot T^4$$

$$P_{\text{bron}} = I_{\text{opp}} \cdot A$$

$$P_{\text{ontv}} = I_r \cdot A$$

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

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren

- 24 a Bereken bij welke golflengte een ster met een temperatuur van $4,5 \cdot 10^4 \text{ K}$ het meeste licht uitzendt. Geef je antwoord in nm.
- b Leg uit of dit in het zichtbare deel van het elektromagnetisch spectrum is. Als dat niet het geval is, in welk golflengtegebied van het elektromagnetisch spectrum dan wel?
- c Beantwoord dezelfde vragen voor een ster met een temperatuur van 2500 K.
- 25 a Leg uit dat de oppervlakte onder de grafiek in figuur 18.28 overeen komt met het stralingsvermogen per vierkante meter.
- b Maak een schatting van de oppervlakte onder de kromme van 6000 K in de grafiek van figuur 18.28 en controleer je schatting met een berekening.
- c Bereken hoeveel keer zo groot de oppervlakte onder een planckkromme van 50 000 K is dan onder een planckkromme van 5 000 K.

constante v. Wien:

$$2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \text{ of } 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

25 a
$$\text{oppervlakte} = \frac{\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}}{\text{nm}} \cdot \text{nm} = \text{kW/m}^2$$

b
$$\text{opp} = \frac{1}{2} \cdot 1500 \cdot 100 = 7500 \text{ W/m}^2$$

$$I_{\text{opp}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (6000 \text{ K})^4 = 7,3 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$

c
$$I_{\text{opp}} = \sigma \cdot T^4 \rightarrow \text{dus als } T \text{ } 10\times \text{ zo groot is, dan is } I_{\text{opp}} \text{ } 10^4\times \text{ zo groot.}$$

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = k_W$$

$$P_{\text{bron}} = I_{\text{opp}} \cdot A$$

$$P_{\text{ontv}} = I_r \cdot A$$

$$I_{\text{opp}} = \sigma \cdot T^4$$

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

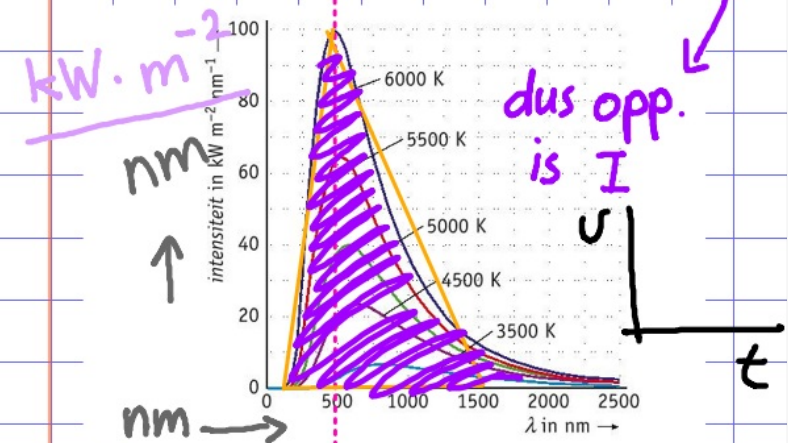
$$P_{\text{bron}} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sigma \cdot T^4$$

constante v. Wien:
 $2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$
 $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$
 $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ of $4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren

- 25 a Leg uit dat de oppervlakte onder de grafiek in figuur 18.28 overeen komt met het stralingsvermogen per vierkante meter.
- b Maak een schatting van de oppervlakte onder de kromme van 6000 K in de grafiek van figuur 18.28 en controleer je schatting met een berekening.
- c Bereken hoeveel keer zo groot de oppervlakte onder een planckkromme van 50 000 K is dan onder een planckkromme van 5 000 K.



▲ Figuur 18.28 Intensiteitsverdeling bij verschillende temperaturen

26
a

$$A = 4\pi r^2 = 4\pi (6,96 \cdot 10^8 \text{ m})^2 = 6,09 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$$

$$I_{\text{opp}} = \frac{P_{\text{bron}}}{A} = \frac{3,84 \cdot 10^{26} \text{ W}}{6,09 \cdot 10^{18} \text{ m}^2} = 6,33 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$

$$T = \left(\frac{I_{\text{opp}}}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{6,33 \cdot 10^7}{5,67 \cdot 10^{-8}} \right)^{\frac{1}{4}} = 5,78 \cdot 10^3 \text{ K}$$

$\lambda_{\text{max}} \cdot T = k_W$ $I_{\text{opp}} = \sigma \cdot T^4$ constante v. Wien:
 $P_{\text{bron}} = I_{\text{opp}} \cdot A$ $I_r = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$ $2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$
 $P_{\text{ontv}} = I_r \cdot A$ $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ of $4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$
 $P_{\text{bron}} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sigma \cdot T^4$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren

- 26 a De zon heeft een lichtsterkte van $3,84 \cdot 10^{26} \text{ W}$ en een straal van $6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$. Bereken de temperatuur van het oppervlak van de zon in K.
- b Een ster A met dezelfde temperatuur als de zon heeft een 10 keer zo grote straal. Hoeveel keer zo lichtsterk is deze ster als de zon? Leg uit. Bereken ook de lichtsterkte van een ster B met dezelfde temperatuur maar met een 300 keer zo grote straal.
- c Gebruik *Binas* en bron 7 om te bepalen welke van de volgende uitspraken correct is.
- A Ster A en ster B zijn beide G2 V-sterren, net als de zon.
 - B Ster A is een G2 I-ster en ster B een G2 III-ster.
 - C Ster A is een G2 III-ster en ster B een G2 I-ster.
 - D Ster A is een M2 III-ster en ster B een M2 I-ster.
- 27 De lichtsterkte van sterren C en D is $1,0 \cdot 10^4$ zo groot als de lichtsterkte van de zon. Ster C heeft een temperatuur van 2500 K en ster D een temperatuur van 3200 K.
- a Welke ster is het grootst? Leg uit.
 - b Bereken de stralen van beide sterren uitgedrukt in zonstralen.

26
a

$$A = 4\pi r^2 = 4\pi (6,96 \cdot 10^8 \text{ m})^2 = 6,09 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$$

$$I_{\text{opp}} = \frac{P_{\text{bron}}}{A} = \frac{3,84 \cdot 10^{26} \text{ W}}{6,09 \cdot 10^{18} \text{ m}^2} = 6,33 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$

$$T = \left(\frac{I_{\text{opp}}}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{6,33 \cdot 10^7}{5,67 \cdot 10^{-8}} \right)^{\frac{1}{4}} = 5,78 \cdot 10^3 \text{ K}$$

26

c

De zon is G2-V - type

ster A en B hebben

zelfde T_{eff} als zon, dus

zijn ook G2. Hoe groter hoe lager de lichtsterkte-

klasse, dus C is het enige mogelijke antwoord.

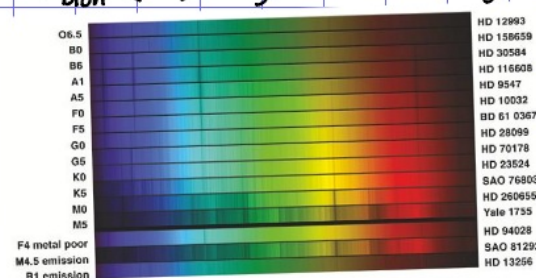
26
b

zelfde $T \rightarrow$ zelfde I_{opp}

r 10x zo groot, A 100x zo groot

$P_{\text{bron}} = I_{\text{opp}} \cdot A$ dus P_{bron} ook 100x zo groot

B als r 300x zo groot, dan A en dus $P_{\text{bron}} (300)^2 = 9,00 \cdot 10^4 \times$ zo groot



▲ Figuur 18.24 Spectraaltypen en hun lijnenspectrum

lichtsterkteklasse	naam
I	superreuzen
II	heldere reuzen
III	reuzen
IV	subreuzen
V	dwergen

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren

- 26 a De zon heeft een lichtsterkte van $3,84 \cdot 10^{26} \text{ W}$ en een straal van $6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$. Bereken de temperatuur van het oppervlak van de zon in K.
- b Een ster A met dezelfde temperatuur als de zon heeft een 10 keer zo grote straal. Hoeveel keer zo lichtsterk is deze ster als de zon? Leg uit. Bereken ook de lichtsterkte van een ster B met dezelfde temperatuur maar met een 300 keer zo grote straal.

c Gebruik Binas en bron 7 om te bepalen welke van de volgende uitspraken correct is.

- A Ster A en ster B zijn beide G2 V-sterren, net als de zon.
- B Ster A is een G2 I-ster en ster B een G2 III-ster.
- C Ster A is een G2 III-ster en ster B een G2 I-ster.
- D Ster A is een M2 III-ster en ster B een M2 I-ster.



$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = k_W$$

$$I_{\text{opp}} = \sigma \cdot T^4$$

constante v. Wien:

W

27
a

$$L = P_{\text{bron}} = \sigma \cdot T^4 \cdot A$$

zelfde L , maar $T_c < T_d$
dus $A_c > A_d$ want

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren

27 De lichtsterkte van sterren C en D is $1,0 \cdot 10^4$ zo groot als de lichtsterkte van de zon. Ster C heeft een temperatuur van 2500 K en ster D een temperatuur van 32000 K.

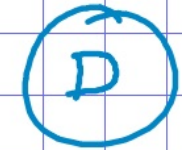
a Welke ster is het grootst? Leg uit.

b Bereken de stralen van beide sterren uitgedrukt in zonstralen.



$$T = 2500 \text{ K}$$

$$L = 1,0 \cdot 10^4 \cdot L_z$$



$$T = 32000 \text{ K}$$

$$L = 1,0 \cdot 10^4 \cdot L_z$$

$$A = \pi r^2 \rightarrow r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$A = \frac{P}{\sigma T^4} \rightarrow r = \sqrt{\frac{P}{\sigma T^4 \pi}}$$

27
b

$$P_{\text{bron}} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sigma \cdot T^4$$

$$r^2 = \frac{P_{\text{bron}}}{4 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot T^4}$$

$$4 \cdot \pi \cdot r^2 = \frac{P_{\text{bron}}}{\sigma \cdot T^4}$$

$$r = \sqrt{\frac{P_{\text{bron}}}{4 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot T^4}}$$

gebruik: $P_c = 1,0 \cdot 10^4 \cdot P_z$

$$\frac{r_c}{r_z} = \frac{\sqrt{\frac{P_c \cdot \pi}{\sigma T_c^4}}}{\sqrt{\frac{P_z \cdot \pi}{\sigma T_z^4}}} \rightarrow \frac{r_c}{r_z} = \sqrt{\frac{P_c / T_c^4}{P_z / T_z^4}} = \sqrt{\frac{1,0 \cdot 10^4 / 2500^4}{1 / 5780^4}} = 5,4 \cdot 10^2$$

$$\frac{r_D}{r_z} = \sqrt{\frac{1,0 \cdot 10^4 / 32000^4}{1 / 5780^4}} = 3,3$$

$\lambda_{\text{max}} \cdot T = k_w$ $I_{\text{opp}} = \sigma \cdot T^4$ constante v. Wien:

-8 W

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren

27 De lichtsterkte van sterren C en D is $1,0 \cdot 10^4$ zo groot als de lichtsterkte van de zon. Ster C heeft een temperatuur van 2500 K en ster D een temperatuur van 32000 K.

a Welke ster is het grootst? Leg uit.

b Bereken de stralen van beide sterren uitgedrukt in zonstralen.

C

$T = 2500 \text{ K}$

$L = 1,0 \cdot 10^4 \cdot L_z$

D

$T = 32000 \text{ K}$

$L = 1,0 \cdot 10^4 \cdot L_z$

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T} \quad b = 2,897 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

10. Deze waarde die je bij bordoefening 3 hebt uitgerekend heet de **zonneconstante**. Het is dus de hoeveelheid stralingsenergie die elke m² aardoppervlak ontvangt.

$$I_r = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{3,85 \cdot 10^{26} \text{ J/s}}{4 \pi \cdot (150 \cdot 10^9)^2} = 1364 \text{ W/m}^2 \quad \leftarrow \text{binas 32C}$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren

28

uit binas, 32 C, de
zonneconstante op
het aardoppervlak:

$$I_r = 1,368 \cdot 10^3 \text{ W m}^{-2}$$

$$A = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot (4,1 \text{ m})^2 = 52,8 \text{ m}^2$$

$$P = I \cdot A = 1,368 \cdot 10^3 \cdot 52,8 = 7,2 \cdot 10^4 \text{ W}$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren

- 28 Een ronde zonnecollector heeft een diameter van 8,2 m en is gericht op de zon. Neem aan dat al het zonlicht dat invalt op de bovenkant van de atmosfeer het aardoppervlak bereikt. Bereken hoeveel zonne-energie er elke seconde op de collector valt.
- 29 a Het is een onbewolkte dag en je houdt buiten je hand loodrecht op de zonnestralen. Je hand heeft een oppervlakte van 1,5 dm². Bereken de hoeveelheid energie die elke seconde op je hand valt.
- b Je bent binnen in een kamer zonder ramen. Je houdt je hand loodrecht op de lichtstralen van een gloeilamp die licht in alle richtingen uitzendt. De lamp heeft een vermogen van 100 W en zet 95% van deze energie om in stralingsenergie. Bereken hoe ver je je hand van de lamp moet houden om dezelfde hoeveelheid stralingsenergie per seconde te ontvangen als in vraag a. Geef de berekening.
- 30 Bereken de zonneconstante voor de planeten Mars en Jupiter.

29 a. $P = I \cdot A = 1,368 \cdot 10^3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 = 21 \text{ W}$

b. $I_r = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \rightarrow r = \sqrt{\frac{P}{4 \cdot \pi \cdot I_r}}$

! $r = \sqrt{\frac{100 \text{ W} \cdot 0,95}{12,56 \cdot 1,368 \cdot 10^3}} = 0,074 \text{ m}$

29 a $A = 1,5 \text{ dm}^2$

De zonneconstante is $1,368 \cdot 10^3 \text{ W}$.

De hoeveelheid energie die elke seconde op je hand valt is dan: $1,5 \cdot 10^{-2} \times 1,368 \cdot 10^3 = 20,5 \text{ W} = 21 \text{ W}$.

b Het vermogen P van de lamp is 100 W. Het vermogen van de straling is dan: $0,95 \times 100 = 95 \text{ W}$.
Om een stralingsenergie per seconde van 20,5 W op je hand te krijgen moet je je hand op een afstand r

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren

28 Een ronde zonnecollector heeft een diameter van 8,2 m en is gericht op de zon. Neem aan dat al het zonlicht dat invalt op de bovenkant van de atmosfeer het aardoppervlak bereikt. Bereken hoeveel zonne-energie er elke seconde op de collector valt.

29 a Het is een onbewolkte dag en je houdt buiten je hand loodrecht op de zonnestralen. Je hand heeft een oppervlakte van $1,5 \text{ dm}^2$. Bereken de hoeveelheid energie die elke seconde op je hand valt.

b Je bent binnen in een kamer zonder ramen. Je houdt je hand loodrecht op de lichtstralen van een gloeilamp die licht in alle richtingen uitzendt. De lamp heeft een vermogen van 100 W en zet 95% van deze energie om in stralingsenergie. Bereken hoe ver je je

hand van de lamp moet houden om dezelfde hoeveelheid stralingsenergie per seconde te ontvangen als in vraag a. Geef de berekening.

30 Bereken de zonneconstante voor de planeten Mars en Jupiter.

30 binas:

$$P_{\text{zon}} = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

$$\text{zon-mars, } r = 0,228 \cdot 10^{12} \text{ m}$$

$$I_r = \frac{P_{\text{bron}}}{4\pi r^2} = \frac{3,85 \cdot 10^{26}}{4\pi \cdot (0,228 \cdot 10^{12})^2}$$
$$= 5,89 \cdot 10^2 \text{ W/m}^2$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren

- 28 Een ronde zonnecollector heeft een diameter van 8,2 m en is gericht op de zon. Neem aan dat al het zonlicht dat invalt op de bovenkant van de atmosfeer het aardoppervlak bereikt. Bereken hoeveel zonne-energie er elke seconde op de collector valt.
- 29 a Het is een onbewolkte dag en je houdt buiten je hand loodrecht op de zonnestralen. Je hand heeft een oppervlakte van 1,5 dm². Bereken de hoeveelheid energie die elke seconde op je hand valt.
- b Je bent binnen in een kamer zonder ramen. Je houdt je hand loodrecht op de lichtstralen van een gloeilamp die licht in alle richtingen uitzendt. De lamp heeft een vermogen van 100 W en zet 95% van deze energie om in stralingsenergie. Bereken hoe ver je je hand van de lamp moet houden om dezelfde hoeveelheid stralingsenergie per seconde te ontvangen als in vraag a. Geef de berekening.
- 30 Bereken de zonneconstante voor de planeten Mars en Jupiter.

31
a $E = 6 \cdot 10^8 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 365 = 3 \cdot 10^{19} \text{ J}$

b $\Delta t = \frac{3,85 \cdot 10^{26} \text{ J}}{3 \cdot 10^{19} \text{ J}} = 2 \cdot 10^7 \text{ jaar}$

32

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren

31 Een middenklasse auto verbruikt gemiddeld 3 MJ/km. Er zijn ongeveer $6 \cdot 10^8$ auto's op aarde.

a Bereken hoeveel energie deze per jaar gebruiken als elke auto gemiddeld 50 km per dag rijdt.

b Bereken hoeveel jaar alle auto's op aarde kunnen rijden op de hoeveelheid energie die de zon elke seconde uitzendt.

32 Het totale energieverbruik van de 7 miljard mensen op aarde is momenteel ongeveer $2 \cdot 10^{13} \text{ W}$. Deze energie wil je volledig met zonnepanelen opwekken. Bereken hoeveel procent van het aardoppervlak bedekt moet worden als het rendement van de panelen 25% is. Neem aan dat al het zonlicht dat invalt op de bovenkant van de atmosfeer het aardoppervlak bereikt en dat de zonnepanelen altijd loodrecht op de zon gericht zijn.

uit binas, 32 c, de
zonneconstante op
het aardoppervlak:

$$I_s = 1,368 \cdot 10^3 \text{ W m}^{-2}$$

$$33 \quad I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad P_p = 48 \cdot P_c \quad r_p = 8,5 \cdot r_c$$

$$\frac{I_p}{I_c} = \frac{\frac{P_p}{r_p^2}}{\frac{P_c}{r_c^2}} = \frac{\frac{48 \cdot P_c}{(8,5 \cdot r_c)^2}}{\frac{P_c}{r_c^2}} = \frac{48 \cdot P_c}{72,25 \cdot r_c^2} \cdot \frac{r_c^2}{P_c} = 0,66$$

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

$$P_{\text{bron}} = I_{\text{opp}} \cdot A$$

$$P_{\text{ontv}} = I_r \cdot A$$

$$I_{\text{opp}} = \sigma \cdot T^4$$

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

constante v. Wien:

$$2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \text{ of } 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

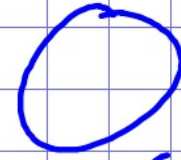
$$P_{\text{bron}} = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sigma \cdot T^4$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren



polaris



castor

33 Aan de hemel staan de sterren Polaris en Castor. Polaris staat 8,5 keer zo ver weg als Castor. De lichtsterkte van Polaris is 48 keer zo groot als die van Castor. Bereken hoeveel keer zo groot of klein de stralingsflux op aarde is van Polaris vergeleken met die van Castor.

34 a Lees bron 11. Je hebt rode, koele superreuzen en blauwe, hete superreuzen. Bepaal met de tabel 'gegevens van sterren' in *Binas* of Antares A een rode of een blauwe superreus is.

b De lichtsterkte van Antares A is 90 000 maal die van de zon en de straal is 1100 zonstralen. Bereken met deze twee gegevens hoeveel keer zo veel of zo weinig energie wordt uitgestraald door 1 m² van het oppervlak van Antares als door 1 m² van het oppervlak van de zon. Is je antwoord in overeenstemming met vraag a?

34
b

$$\frac{I_A}{I_z} = \frac{\frac{P_A}{A_A}}{\frac{P_z}{A_z}} = \frac{\frac{90000 \cdot P_z}{4\pi r_A^2}}{\frac{P_z}{4\pi r_z^2}} = \frac{90000 \cdot P_z}{\cancel{4\pi} (1100 \cdot r_z)^2} \cdot \frac{\cancel{4\pi} r_z^2}{P_z}$$

$$= \frac{90000 \cdot \cancel{P_z}}{1100^2 \cdot \cancel{r_z^2}} = \frac{90000}{1100^2} = 0,074$$

Dus het oppervlak van Antares A straalt per m² maar 0,074 x zoveel energie per seconde uit als de zon. Dit is in overeenstemming met de lagere oppervlakte-temperatuur van Antares A: 3000 K vs. 5780 K van de zon. Let op: in het antwoordenboekje staat de $I_z/I_A = 13,44$. Dit is hetzelfde antwoord en is ook goed.

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

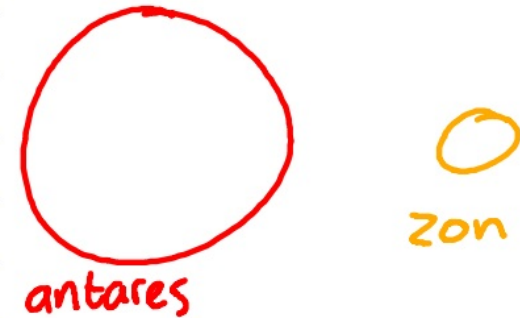
~~$$I_{\text{opp}} = \sigma \cdot T^4$$~~

constante v. Wien:

-8 W

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.3 Het continu spectrum van sterren



- 34 a Lees bron 11. Je hebt rode, koude superreuzen en blauwe, hete superreuzen. Bepaal met de tabel 'gegevens van sterren' in *Binas* of Antares A een rode of een blauwe superreus is.
- b De lichtsterkte van Antares A is 90 000 maal die van de zon en de straal is 1100 zonstralen. Bereken met deze twee gegevens hoeveel keer zo veel of zo weinig energie wordt uitgestraald door 1 m² van het oppervlak van Antares als door 1 m² van het oppervlak van de zon. Is je antwoord in overeenstemming met vraag a?

$$L_A = P_A = 90000 \cdot P_z$$

$$r_A = 1100 \cdot r_z$$

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

12. Alle mogelijke sterren qua grootte en temperatuur staan ingedeeld in het **HR-diagram**:

Verticale as (logaritmisch):
L van een ster kan tussen $10^5 \times L_{\text{ZON}}$ en $10^{-3} \times L_{\text{ZON}}$ variëren.

zon $\rightarrow 10^0 = 1$

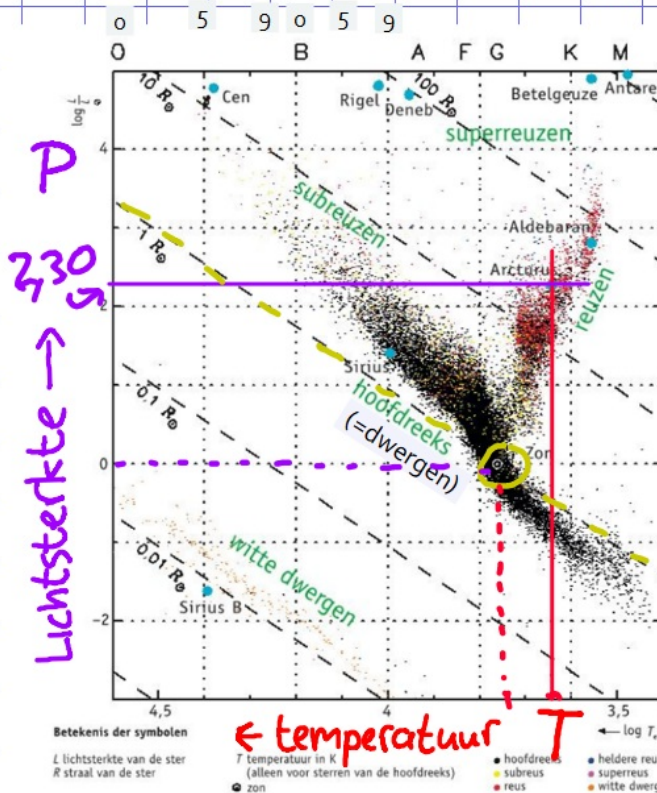
Horizontale as (logaritmisch):
temperatuur van sterren varieert tussen 1000 K en 50.000 K

$T_{\text{eff}} = 10^{3,76} = 5,8 \cdot 10^3$

Diagonale lijnen (logaritmisch):
sterren van gelijke straal, R.

$$P = 4\pi r^2 \cdot \sigma \cdot T^4$$

Spectraaltypen: Onderverdeling van 0 (heetst) tot 9 (koelst) per spectraaltype



▲ **Figuur 18.32** Het Hertzsprung-Russelldiagram

Hoofdstuk 18: Astrofysica

Snelle denkvraag: Waarom lopen de diagonalen van linksboven naar rechtsonder?

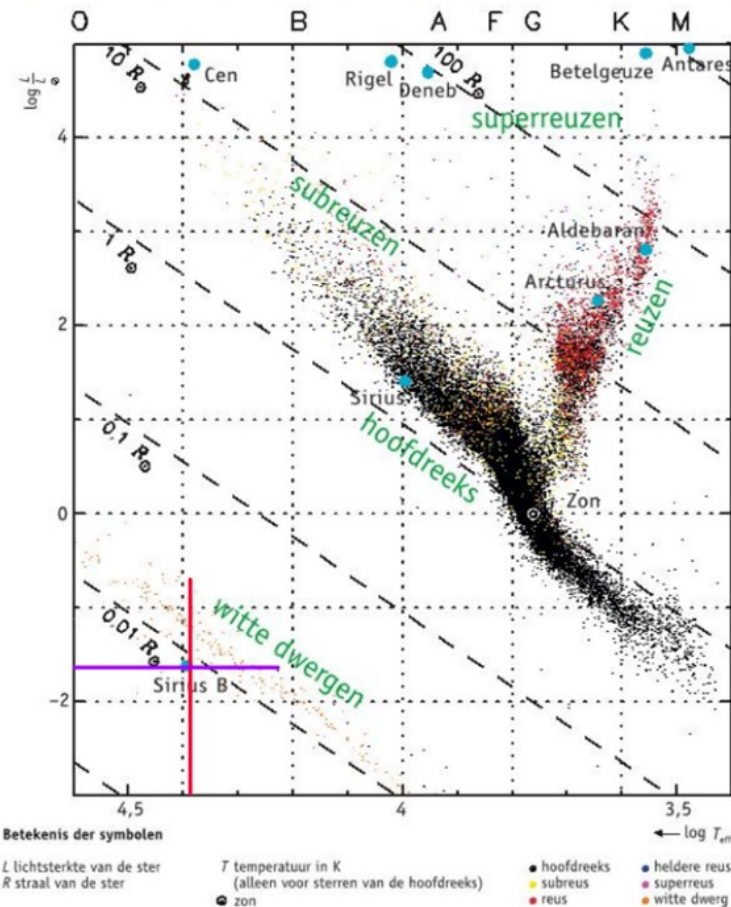
Voorbeeld: Geef van de ster *Arcturus*:

- de effectieve temperatuur
- de relatieve lichtsterkte t.o.v. de zon
- de absolute lichtsterkte
- het spectraaltype
- de lichtsterkteklasse
- de volledige klassificatie

Voorbeeld:

- $T_{\text{eff}} = 4,3 \times 10^3$ K
- $L/L_{\text{ZON}} = 2,0 \times 10^2$
- $L = 2,0 \times 10^2 \times 3,85 \times 10^{26} \text{ W} = 7,68 \cdot 10^{28}$
- G9
- reus, dus III
- G9 III

Bord oefening 7: Geef van de ster *Sirius B* dezelfde waarden als in het voorbeeld hierboven.



▲ **Figuur 18.32** Het Hertzsprung-Russelldiagram

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

Bord oefening 7: Geef van de ster *Sirius B*:

- de effectieve temperatuur
- de relatieve lichtsterkte t.o.v. de zon
- de absolute lichtsterkte

$$a. T_{\text{eff}} = 10^{4,39} = 2,5 \cdot 10^4 \text{ K}$$

$$b. \frac{L}{L_{\odot}} = 10^{-1,56} = 0,0275$$

$$c. P = 3,85 \cdot 10^{26} \cdot 0,0275 = 1,06 \cdot 10^{25} \text{ W}$$

Bordoeffening 8a:

Sirius A AO-V
Aldebaran K3-III
Deneb A2-I

Bordoeffening 8b:

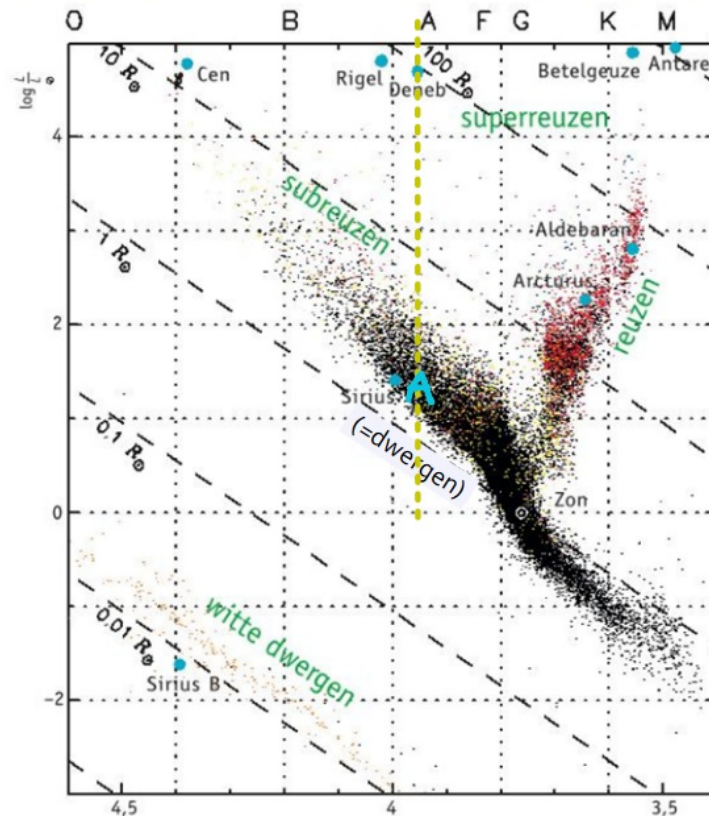
Cen $\rightarrow 10 \times$
zo grote T

Bordoeffening 8c:

grootst: Antares
kleinst: Sirius A

Bordoeffening 8d:

grootst: Antares
kleinst: Sirius A



Betekenis der symbolen

L lichtsterkte van de ster
R straal van de ster

T ter (all)

zon

Figuur 18.32 Het

lichtsterkteklasse	naam
I	superreuzen
II	heldere reuzen
III	reuzen
IV	subreuzen
	dwergen

Hoofdstuk 18: Astrofysica

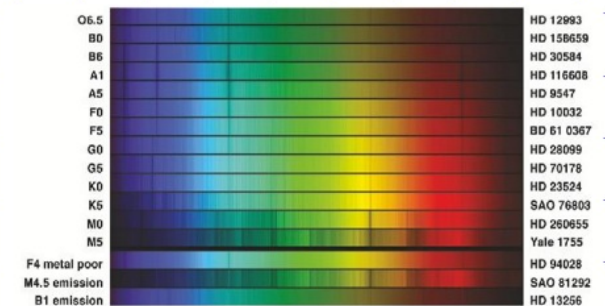
§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

Bordoeffening 8a: Geef de volledig klassificatie van deze sterren: Sirius A, Aldebaran en Deneb.

Bordoeffening 8b: Welke van deze sterren heeft het heetste oppervlak, Betelgeuze of Cen? Hoeveel keer groter is de temperatuur van de heetste t.o.v. de koelste van deze twee?

Bordoeffening 8c: Zet deze sterren op volgorde van groot naar klein: Antares- Arcturus - Sirius A. Hoeveel keer groter is de straal van de grootste t.o.v. de straal van de kleinste?

Bordoeffening 8d: Zet deze sterren op volgorde van lichtsterkte: Antares- Arcturus - Sirius A. Hoeveel keer feller is de felste t.o.v. de zwakste?



▲ Figuur 18.24 Spectraaltypen en hun lijnenspectrum

35
a

← KO-I

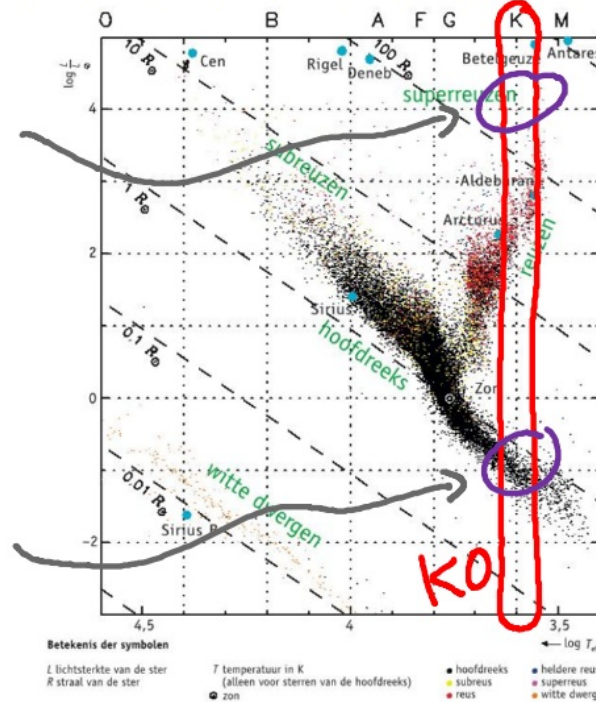
$$10 \log \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right) = 4$$

$$\text{dus } \frac{L}{L_{\odot}} = 10^4$$

← KO-V

$$10 \log \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right) = -1$$

$$\text{dus } \frac{L}{L_{\odot}} = 0,1$$



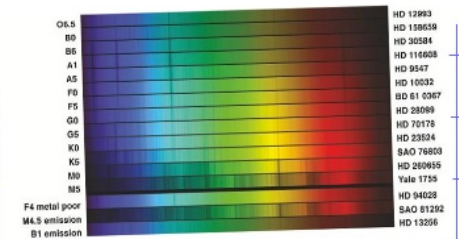
▲ Figuur 18.32 Het Hertzsprung-Russelldiagram

lichtsterkteklasse	naam
I	superreuzen
II	heldere reuzen
III	reuzen
IV	subreuzen
V	dwergen

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

- 35 De hoeveelheid energie die per seconde van twee verschillende sterren wordt ontvangen, wordt met een telescoop gemeten. De ene ster is een Ko V-ster (dwergerster) en de andere een Ko I-ster (superreus). Beide sterren hebben een temperatuur van 3980 K.
- a Gebruik het Hertzsprung-Russelldiagram uit *Binas* om een schatting te maken van de lichtsterkte van een typische Ko V-ster (zie ook bron 7). Hiervoor moet je weten dat de dwergersterren zich op de hoofdreeks bevinden. Doe hetzelfde voor een typische Ko I-ster. Druk de lichtsterkten van beide sterren uit in de lichtsterkte van de zon L_{zon} .
- b Leg uit waarom de Ko V-ster een dwergerster wordt genoemd en de Ko I-ster een superreus.
- c Uit onze meting blijkt dat we van beide sterren elke seconde evenveel energie ontvangen. Leg uit hoe dit kan.

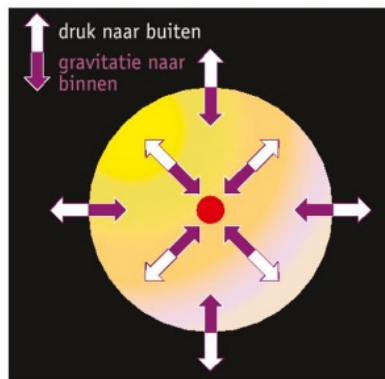


▲ Figuur 18.24 Spectraaltypen en hun lijnspectrum

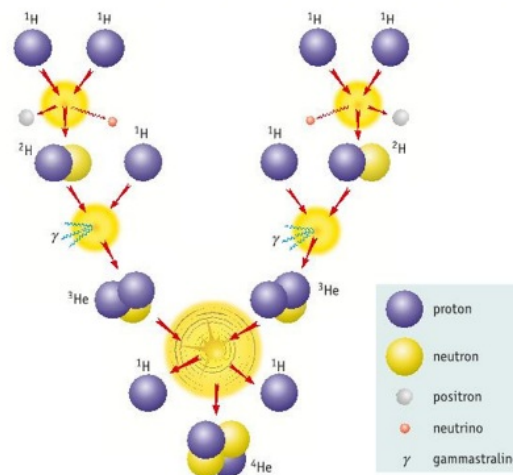
13. Sterren ontstaan uit **wolken van waterstofgas**. De onderlinge **zwaarte-kracht** tussen de atomen zorgt dat lokale ophopingen tot een bol gevormd raken.

Het **gewicht van de buitenste lagen** veroorzaakt een grote **druk naar binnen** en grote temperatuur in de kern van de ster. Hierdoor komt in de kern fusie van waterstof op gang.

Door de **enorme temperatuur** in de kern bewegen deeltjes daar zo snel dat ze een **tegendruk naar buiten** bieden die de ster qua volume in **evenwicht** houdt.



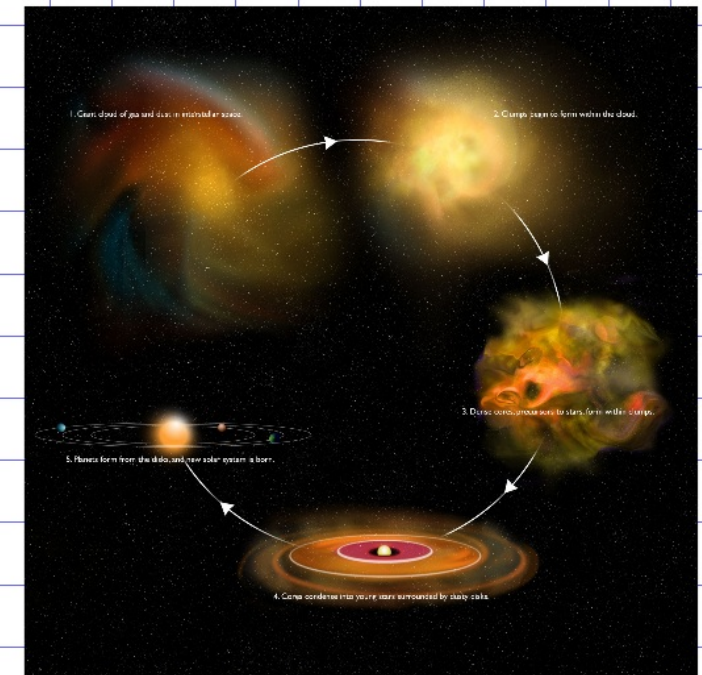
▲ **Figuur 18.38**



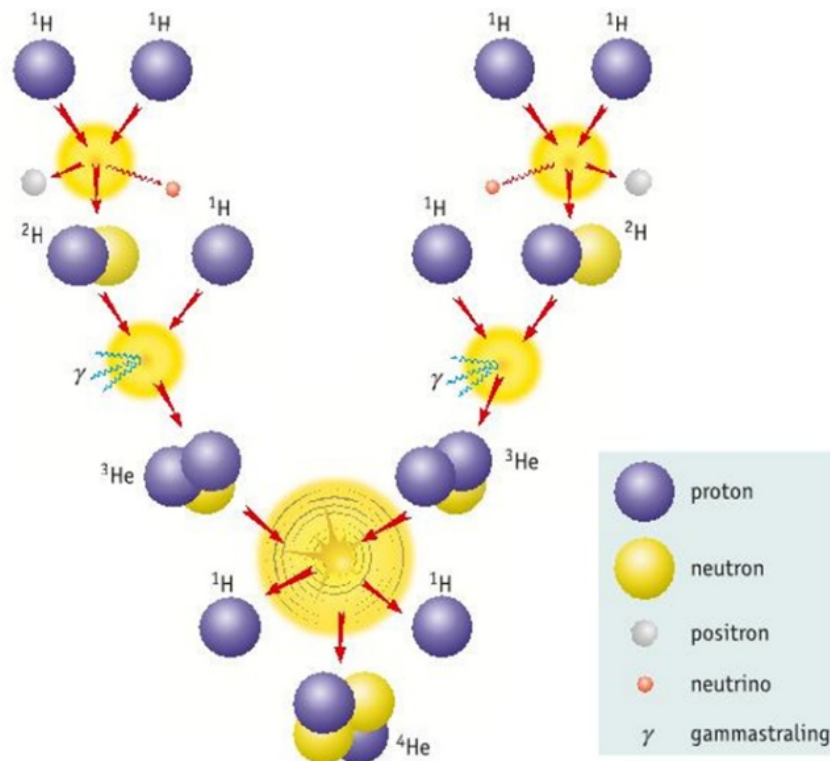
▲ **Figuur 18.33** De proton-protonketen

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren



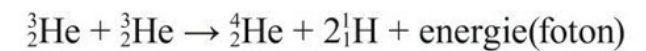
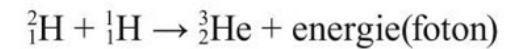
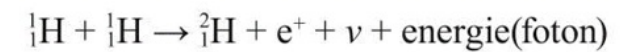
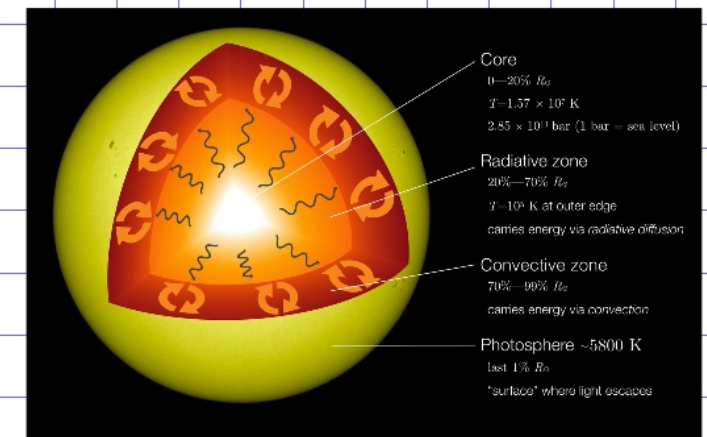
13. De zon is op dit moment nog bezig zijn waterstof te fuseren tot helium in de proton-protonketen:



▲ **Figuur 18.33** De proton-protonketen

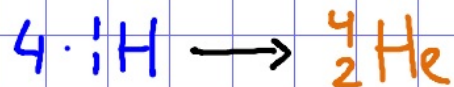
Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren



36

a netto reactie:



Deze elektronen
annihileren met de
ontstane positronen
en worden dus mee
omgezet in energie

massa voor:

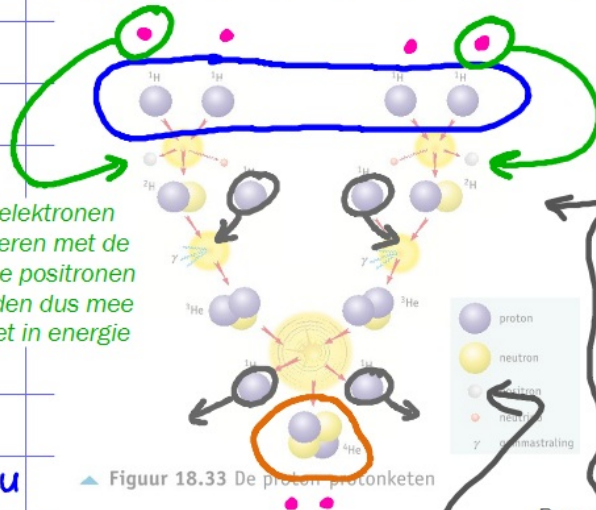
$$4 \cdot 1,007825 \text{ u} = 4,031300 \text{ u}$$

$$\text{massa na: } 1 \cdot 4,002603 \text{ u}$$

$$\Delta m = 4,002603 \text{ u} - 4,031300 \text{ u} = -0,028697 \text{ u}$$

$$\text{percentage m omgezet in E: } \frac{0,028697 \text{ u}}{4,031300 \text{ u}} \times 100\% = 0,71185\%$$

dus per kg gefuseerd H wordt 0,0071185 kg omgezet in energie



▲ Figuur 18.33 De proton-protonketen

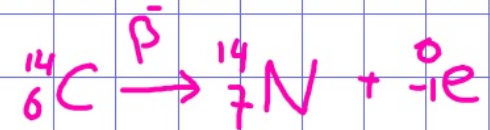
Deze protonen
komen er hier bij en
gaan even later
weer weg, dus doen
netto niet mee aan
de reactie.

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

- 36 De massa van een heliumatoom is kleiner dan de massa van vier waterstofatomen, zie *Binas*.
- Hoeveel kg materie gaat er verloren als je 1 kg waterstof in helium omzet?
 - Hoeveel energie komt er vrij bij deze omzetting van 1 kg waterstof?
 - Hoeveel kg waterstof moet de zon per seconde fuseren om zijn stralingsvermogen te produceren?
 - Bereken hoeveel massa de zon hierdoor per seconde verliest.

KNALLER: Hoe zit het met de elektronmassa's in deze netto reactie?



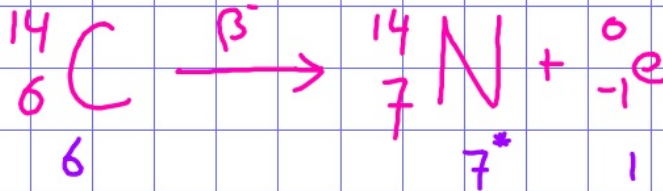
INZICHT: Je hoeft hiermee pas op te letten als reactieproducten elektronen aantrekken of afstaan aan de omgeving om elektrisch neutraal te zijn/blijven.

OVERZICHT:

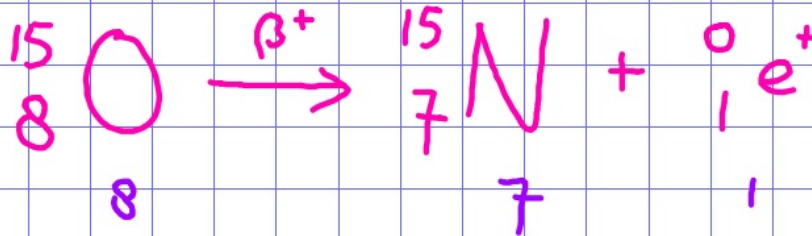
Bij alfaverval: elektronmassa's niet verrekenen zolang je de massa's van kern voor, kern na en alfadeeltje/heliumkern allemaal uit binas tabel 25 haalt.



Bij bèta-minverval: elektronmassa's niet verrekenen zolang je de massa's van kern voor en kern na uit binas tabel 25 haalt en het ontstane elektron ook buiten beschouwing laat.



Bij bèta-plusverval: er komen netto twee elektronmassa's bij naast de massa's voor en na zoals ze staan in binas tabel 25.

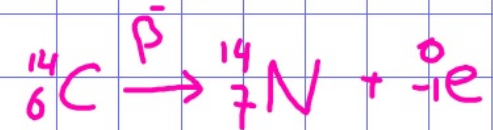


Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

- 36 De massa van een heliumatoom is kleiner dan de massa van vier waterstofatomen, zie *Binas*.
- a Hoeveel kg materie gaat er verloren als je 1 kg waterstof in helium omzet?
 - b Hoeveel energie komt er vrij bij deze omzetting van 1 kg waterstof?
 - c Hoeveel kg waterstof moet de zon per seconde fuseren om zijn stralingsvermogen te produceren?
 - d Bereken hoeveel massa de zon hierdoor per seconde verliest.

KNALLER: Hoe zit het met de elektronmassa's in deze netto reactie?



INZICHT: Je hoeft hiermee pas op te letten als reactieproducten elektronen aantrekken of afstaan aan de omgeving om elektrisch neutraal te zijn/blijven.

massa voor: $4 \cdot 1,007825 \text{ u} = 4,031300 \text{ u}$

massa na: $1 \cdot 4,002603 \text{ u}$

$\Delta m = 4,002603 \text{ u} - 4,031300 \text{ u} = -0,028697 \text{ u}$

percentage m omgezet in E: $\frac{0,028697 \text{ u}}{4,031300 \text{ u}} \times 100\% = 0,71185\%$

dus per kg gefuseerd H wordt $0,0071185 \text{ kg}$ omgezet in energie

36

b $E = m \cdot c^2 = 0,0071185 \text{ kg} \cdot (3,00 \cdot 10^8)^2 = 6,3978 \cdot 10^{14} \text{ J}$

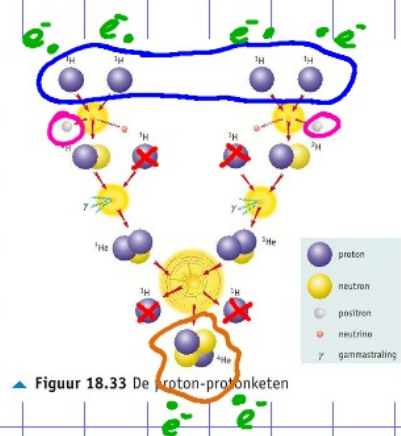
c $\frac{3,85 \cdot 10^{26}}{6,3978 \cdot 10^{14}} = 6,02 \cdot 10^{11} \text{ kg}$ Waterstof per seconde fuseren.
tot helium

d. $6,02 \cdot 10^{11} \text{ kg} \cdot 0,0071185 = 4,29 \cdot 10^9 \text{ kg}$ ("verdwijnt")
(massa)

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

- 36 De massa van een heliumatoom is kleiner dan de massa van vier waterstofatomen, zie *Binas*.
- Hoeveel kg materie gaat er verloren als je 1 kg waterstof in helium omzet?
 - Hoeveel energie komt er vrij bij deze omzetting van 1 kg waterstof?
 - Hoeveel kg waterstof moet de zon per seconde fuseren om zijn stralingsvermogen te produceren?
 - Bereken hoeveel massa de zon hierdoor per seconde verliest.

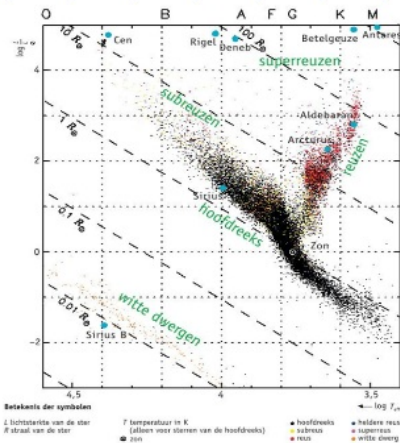


▲ Figuur 18.33 De proton-protonketen

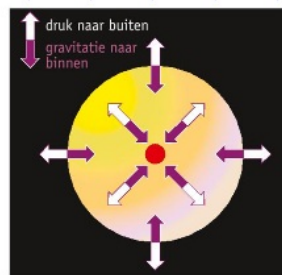
Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

14 en 15. Sterren zoals ze in het Hertzsprung-Russelldiagram geassocieerd zijn evolueren tijdens hun bestaan en verplaatsen zich daarmee in het diagram.



Figuur 18.32 Het Hertzsprung-Russelldiagram



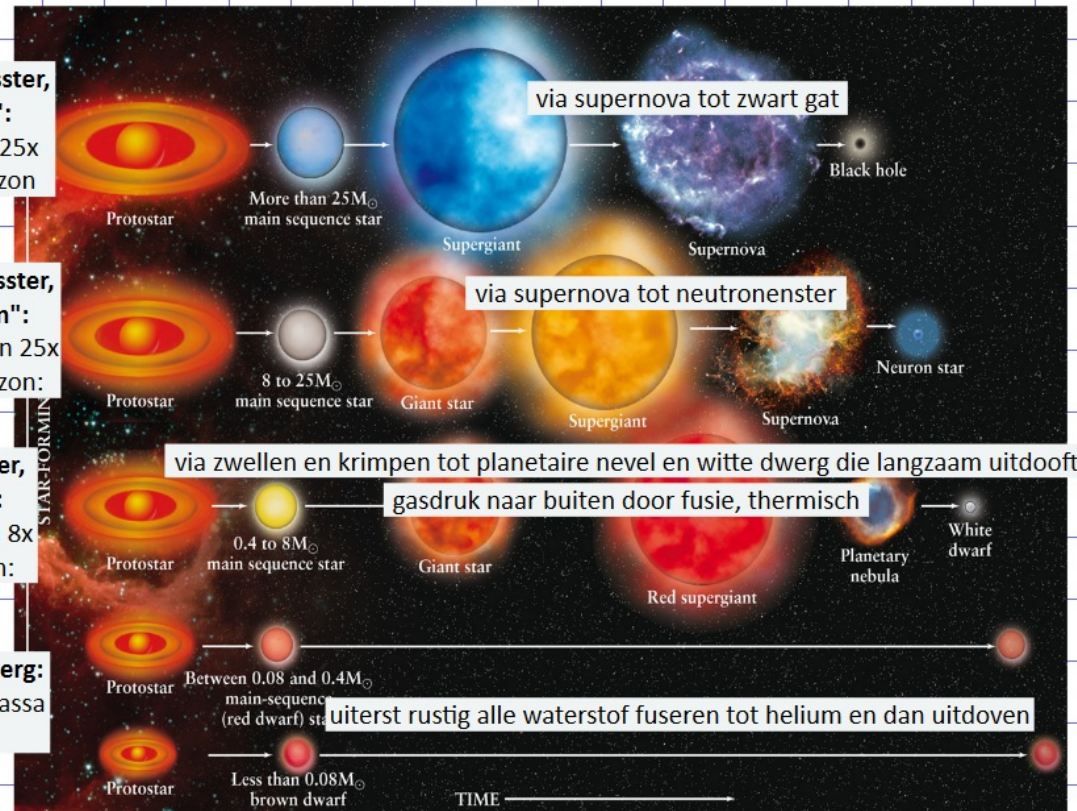
Figuur 18.38

hoofdreksster, "zwaar":
meer dan 25x
massa vd zon

hoofdreksster, "medium":
tussen 8x en 25x
massa vd zon:

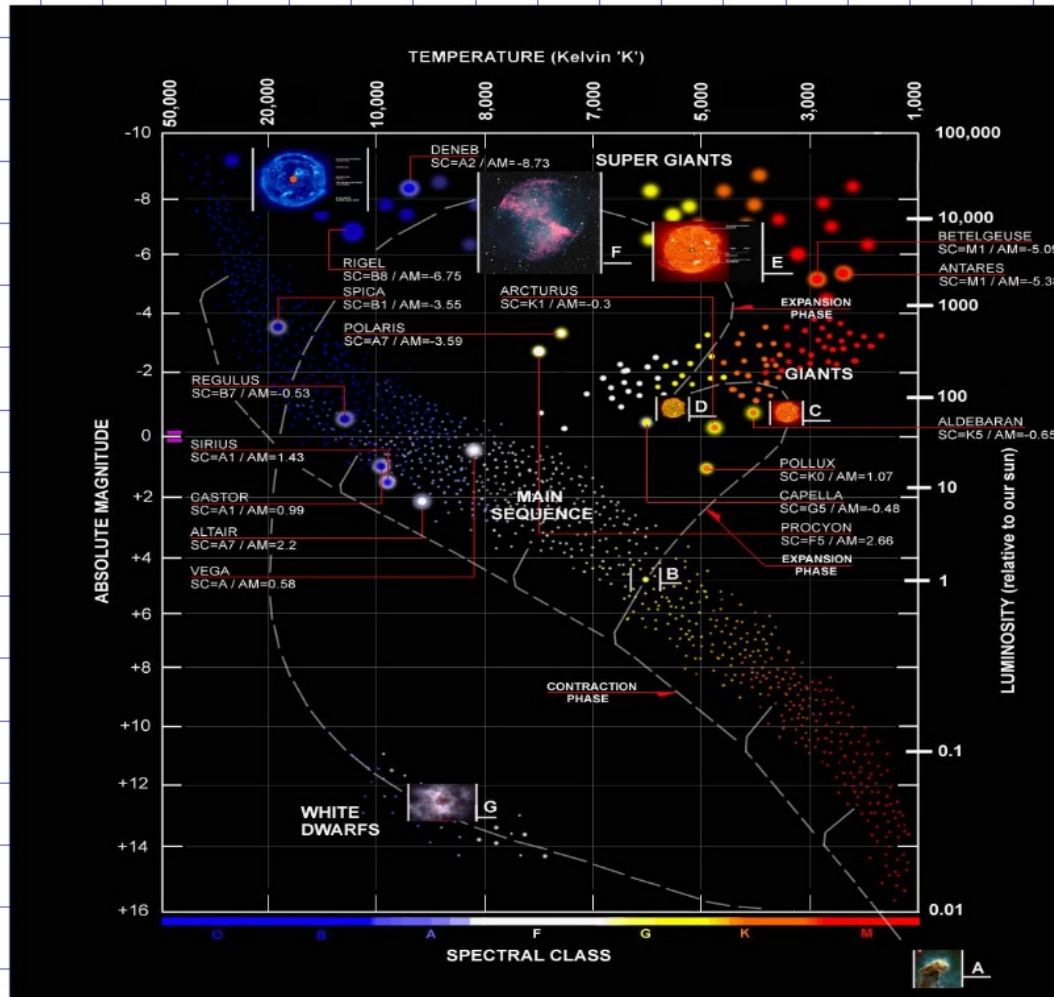
hoofdreksster, gele dwerg:
tussen 0,4x en 8x
massa vd zon:

rode en bruine dwerg:
minder dan 0,4x massa
vd zon



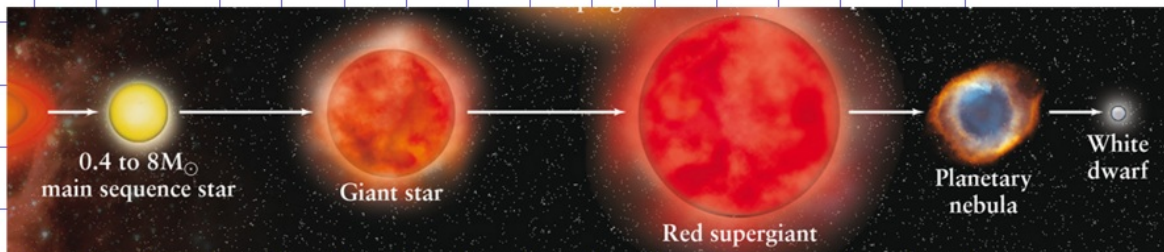
Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren



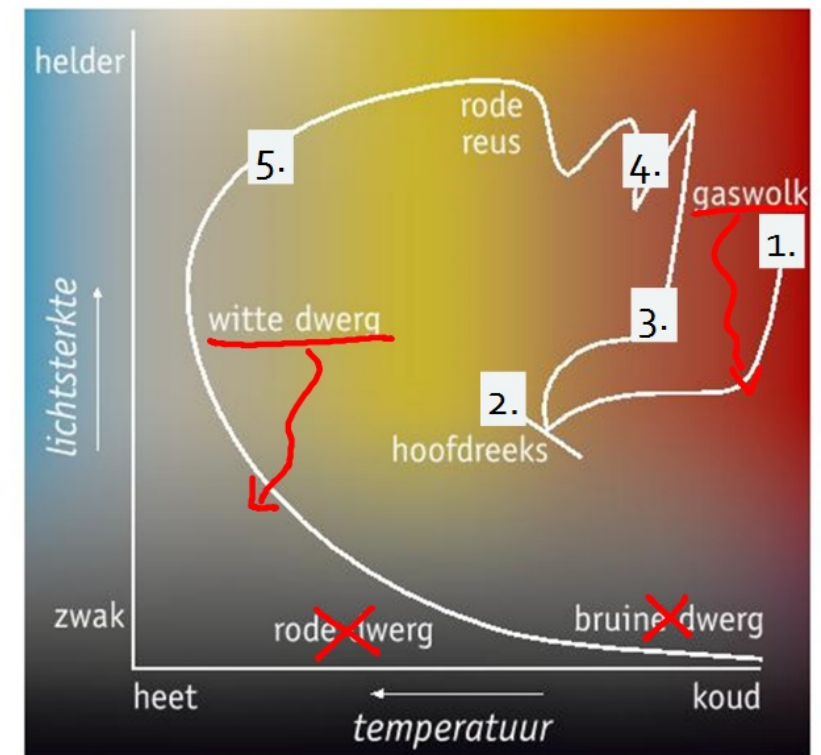
14 en 15. Sterren zoals ze in het Hertzsprung-Russelldiagram geassocieerd zijn **evoluëren tijdens hun bestaan** en verplaatsen zich daarmee in het diagram.

1. **Waterstofwolk** die de zon gaat vormen trekt samen tot **protoster**.
2. Ster is geboren en zit ergens op de **hoofdreeks**.
3. **Waterstofkern** is opgefuseerd en bestaat nu helemaal uit helium dat niet fuseert (niet heet genoeg). **Nu fusie in een schil om de kern heen**. Zon zwelt op.
4. In serie van **zwellen en krimpen** treedt **heliumfusie** op en wordt periodiek gas uitgestoten door de ster.
5. Uitgestoten gas vormt een **planetaire nevel**. De overgebleven kern is nu een **witte dwerg** die zwak schijnt door alleen **thermische emissie**, geen fusie meer.



Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

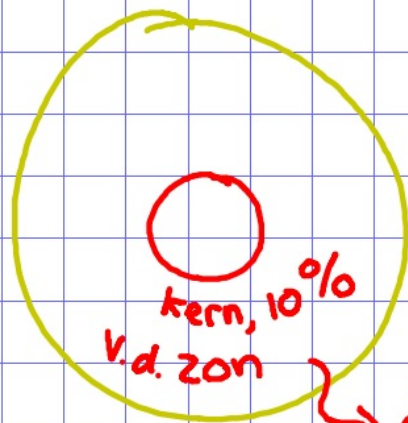


▲ **Figuur 18.35** Levensloopspoor van de zon

38 uit opgave 36:

$$\frac{3,85 \cdot 10^{26}}{6,3978 \cdot 10^{14}} = 6,02 \cdot 10^{11} \text{ kg per seconde}$$

waterstof
dat
wordt omgezet
in He en
energie



$$\frac{1,988 \cdot 10^{29}}{6,02 \cdot 10^{11}} = 3,302 \cdot 10^{17} \text{ s} = 1,1 \cdot 10^{10} \text{ j}$$

dus $1,988 \cdot 10^{29} \text{ kg}$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

Opdrachten

38 Bereken, gebruikmakend van opdracht 36, hoeveel jaar de zon bij zijn huidige waterstofverbruik kan blijven stralen.

39 a Beredeneer dat de levensduur van een hoofdreeksster evenredig is met M/L .

b Laat zien dat als we de massa M uitdrukken in zonsmassa's M_{zon} en de lichtsterkte in zonslichtsterkten L_{zon} , de levensduur in jaar van een hoofdreeksster gelijk wordt aan:

$$t_{\text{ster}} = 10^{10} \cdot \frac{\frac{M}{M_{\text{zon}}}}{\frac{L}{L_{\text{zon}}}}$$

c Figuur 18.34 toont dat een ster van $30 M_{\text{zon}}$ een lichtsterkte heeft van ongeveer $10^5 L_{\text{zon}}$. Hoelang zal deze ster volgens de vergelijking uit opdracht b leven?

d De ster 61 Cygni B heeft een massa van $0,5 M_{\text{zon}}$ en een lichtsterkte $0,05 L_{\text{zon}}$. Hoeveel maal zo lang als de zon zal deze ster leven?

39

b.

$$t_{\text{ster}} \propto \frac{M}{L}$$

$$\text{zon, } t = 10^{10} \text{ j}$$

$$M = M_z$$

$$L = L_z$$

$$t_{\text{ster}} = 10^{10} \cdot \frac{\frac{M}{M_z}}{\frac{L}{L_z}}$$

$$\frac{M_z}{L_z} = 10^{10}$$

$$c. \quad t_{\text{ster}} = 10^{10} \cdot \frac{30}{10^5} = 3,0 \cdot 10^6 \text{ j}$$

$$d. \quad t_{\text{ster}} = 10^{10} \cdot \frac{0,5}{0,05} = 10^{11} \text{ j}$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

Opdrachten

38 Bereken, gebruikmakend van opdracht 36, hoeveel jaar de zon bij zijn huidige waterstofverbruik kan blijven stralen.

39 a Beredeneer dat de levensduur van een hoofdreeksster evenredig is met M/L .

b Laat zien dat als we de massa M uitdrukken in zonsmassa's M_{zon} en de lichtsterkte in zonslichtsterkten L_{zon} , de levensduur in jaar van een hoofdreeksster gelijk wordt aan:

$$t_{\text{ster}} = 10^{10} \cdot \frac{\frac{M}{M_{\text{zon}}}}{\frac{L}{L_{\text{zon}}}}$$

c Figuur 18.34 toont dat een ster van $30 M_{\text{zon}}$ een lichtsterkte heeft van ongeveer $10^5 L_{\text{zon}}$. Hoelang zal deze ster volgens de vergelijking uit opdracht b leven?

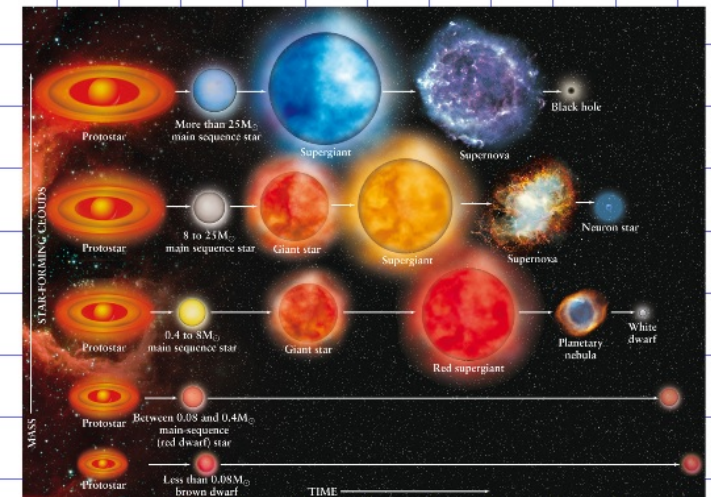
d De ster 61 Cygni B heeft een massa van $0,5 M_{\text{zon}}$ en een lichtsterkte $0,05 L_{\text{zon}}$. Hoeveel maal zo lang als de zon zal deze ster leven?

14 en 15 (vervolg). In een **neutronenster** zijn alle vrije elektronen ingevangen door de protonen via K-vangst. Daarbij zijn alle protonen overgegaan in neutronen die extreem dicht op elkaar zitten. Snelle feiten:

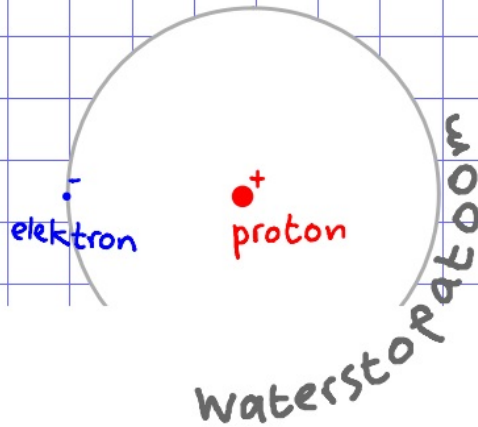
- enorme **magnetische velden** tot 10^{10} T
- enorme **dichtheid**: $7 \times 10^{14} \text{ kg/m}^3$ (+/- 1,5 keer de massa van de zon met een diameter van maar 10 km)
- enorme **rotatiesnelheid** tot wel 100 omwentelingen per seconde

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren



40



$$r_{\text{atoom}} = 5,0 \cdot 10^4 \times r_{\text{proton}}$$

$$V_{\text{atoom}} = \frac{4}{3} \cdot (r_{\text{atoom}})^3 = \frac{4}{3} (5,0 \cdot 10^4 \times r_{\text{proton}})^3$$

$$= \frac{4}{3} (5,0 \cdot 10^4)^3 \cdot (r_{\text{proton}})^3$$

$$= 1,25 \cdot 10^{14} \cdot V_{\text{proton}}$$



diameter van een proton: 10^{-15} m
(femtometer)

bohr-straal: $52,9 \times 10^{-12}$ (picometer)

Dus atoom zelf heeft **50.000 keer** de diameter van de kern. Dit is vergelijkbaar met **zandkorrel** die over de buitenste rij rondjes draait om een kern op de middenstip zo groot als een **vlieg**.

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

Opdrachten

40 In een waterstofatoom heeft de elektronenbaan met de kleinste energie een straal van $5,0 \cdot 10^4$ maal de diameter van een proton. Laat zien dat de dichtheid van een neutronenster dus van de orde moet zijn van $1,25 \cdot 10^{14}$ maal de dichtheid van vloeibare waterstof. (In werkelijkheid is, door de samenpersing van de neutronen door de zwaartekracht, de dichtheid nog hoger, in de orde van $7 \cdot 10^{14}$ maal de dichtheid van water.)

- 41 a** De huidige wereldbevolking bestaat uit ongeveer 7 miljard mensen. Neem aan dat een mens gemiddeld 50 kg weegt. Wat is dan de massa van de wereldbevolking?
- b** Stel dat je deze massa samenperst tot de dichtheid van een neutronenster. Hoe groot is dan het volume?

42 Bereken de ontsnappingssnelheid vanaf het oppervlak van een neutronenster met een massa M van 1,4 maal de massa van de zon en een straal R van 10 km. Gebruik de formule voor de ontsnappingssnelheid uit

hoofdstuk 17: $v_{\text{ontsnapping}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$. Druk het resultaat

uit in de lichtsnelheid c .

41 a $7 \cdot 10^9 \cdot 50 \text{ kg} = 4 \cdot 10^{11} \text{ kg}$

b. $V = \frac{m}{\rho} = \frac{4 \cdot 10^{11} \text{ kg}}{7 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$

42 Zon, $m = 1,988 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1,988 \cdot 10^{30}}{10^4}} = 1,9 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$= 0,64 \cdot c$ 

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

Opdrachten

40 In een waterstofatoom heeft de elektronenbaan met de kleinste energie een straal van $5,0 \cdot 10^4$ maal de diameter van een proton. Laat zien dat de dichtheid van een neutronenster dus van de orde moet zijn van $1,25 \cdot 10^{14}$ maal de dichtheid van vloeibare waterstof. (In werkelijkheid is, door de samenpersing van de neutronen door de zwaartekracht, de dichtheid nog hoger, in de orde van $7 \cdot 10^{14}$ maal de dichtheid van water.)

41 a De huidige wereldbevolking bestaat uit ongeveer 7 miljard mensen. Neem aan dat een mens gemiddeld 50 kg weegt. Wat is dan de massa van de wereldbevolking?

b Stel dat je deze massa samenperst tot de dichtheid van een neutronenster. Hoe groot is dan het volume?

42 Bereken de ontsnappingssnelheid vanaf het oppervlak van een neutronenster met een massa M van 1,4 maal de massa van de zon en een straal R van 10 km. Gebruik de formule voor de ontsnappingssnelheid uit

hoofdstuk 17: $v_{\text{ontsnapping}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$. Druk het resultaat

uit in de lichtsnelheid c .

42 Zon, $m = 1,988 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1,988 \cdot 10^{30}}{10^4}} = 1,9 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$= 0,64 \cdot c$ ←

43 als $v = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \rightarrow v^2 = \frac{2GM}{R}$$

$$R = \frac{2GM}{v^2} = \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1,988 \cdot 10^{30}}{(3,00 \cdot 10^8)^2} = 4,1 \cdot 10^3 \text{ m}$$

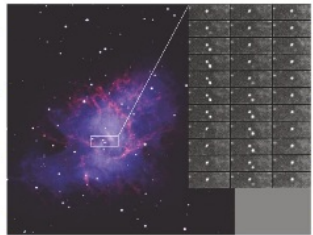
Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

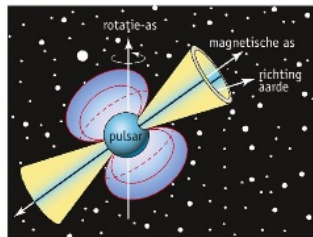
- 43 Als de massa van de neutronenster door de zwaartekracht in een nog kleiner volume wordt samengeperst, ontstaat een zwart gat. De ontsnappingssnelheid is dan groter geworden dan de lichtsnelheid. Niets kan ontsnappen aan de zwaartekracht van het zwarte gat, ook licht niet.
Bereken bij welke straal R de ster van opgave 42 een zwart gat is geworden.



▲ Figuur 18.40 De Krabnevel in het sterrenbeeld Stier



▲ Figuur 18.41 De Krabpulsar is het onderste van de twee sterretjes in het midden van de nevel. Rechts is een complete pulsperiode van 33 milliseconden te zien, in stappen van 1 milliseconde.



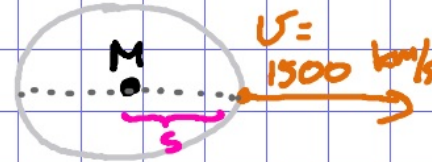
▲ Figuur 18.42 'Vuurtorenmodel' van een pulsar

44
b.



1054 C.E.

2020 C.E.



$$\Delta t = 1034 \text{ j} \\ = 3,26 \cdot 10^{10} \text{ s}$$

$$s = v \cdot \Delta t = 1500 \cdot 10^3 \text{ m/s} \\ \cdot 3,26 \cdot 10^{10} \text{ s}$$

$$d = 9,782 \cdot 10^{13} \text{ m} \leftarrow = 4,89 \cdot 10^{13} \text{ m} \times 2$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

44 De Krabnevel in het sterrenbeeld Stier (figuur 18.40 en 18.41) is het overblijfsel van een supernova-explosie die in juli van het jaar 1054 met het blote oog overdag zichtbaar was, en waarvan waarnemingen zijn opgetekend door sterrenkundigen in China, Japan, Korea en Iran.

De nevel dijt uit met een snelheid van 1500 km/s en staat op een afstand van 6500 lichtjaar. In het centrum van de nevel bevindt zich een pulsar (zie bron 16) met een pulsperiode van 0,033 s. Hij zendt niet alleen gepulste radiostraling uit, maar pulst ook in zichtbaar licht (wat heel uitzonderlijk is voor pulsars) en ook in röntgen- en gammastraling (figuur 18.42).

- Hoe lang geleden vond de explosie waarbij de Krabnevel ontstond werkelijk plaats? Geef de berekening.
- Bereken uit de snelheid van uitspreiden hoe groot de door ons waargenomen middellijn van de Krabnevel nu moet zijn. Vergelijk dit met informatie uit de literatuur (zie bijvoorbeeld Wikipedia).

45
a.
$$\frac{0,033 \text{ s}}{4,2 \cdot 10^{-13} \text{ s/s}} = 7,9 \cdot 10^{10} \text{ s} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ j}$$

c.
$$2020 - 1054 = 966 \text{ j} = 3,05 \cdot 10^{10} \text{ s}$$

$$3,05 \cdot 10^{10} \text{ s} \cdot 4,2 \cdot 10^{-13} = 0,0128 \text{ s}$$

dus in het begin: $0,033 - 0,013 = 0,020 \text{ s}$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

§ 18.4 De bouw en evolutie van sterren

45 Pulsars (zie bron 16) zijn bruikbaar als zeer nauwkeurige klokken. In feite is een ronddraaiende neutronenster een 'vliegwiel'. Het stralingsvermogen van de pulsar gaat ten koste van de draaiingsenergie van dit vliegwiel. De rotatie van de neutronenster vertraagt daardoor in de loop van de tijd, wat we waarnemen als een toename van de pulsperiode. Als uit metingen de pulsperiode T en de toename van deze periode in de tijd ($\frac{dT}{dt}$) bekend is, kun je tot ver in de toekomst al de aankomsttijden van de pulsen op aarde voorspellen.

- Bij de Krabpulsar is de gemeten toename van de pulsperiode T met de tijd gelijk aan $\frac{dT}{dt} = 4,2 \cdot 10^{-13} \text{ (s/s)}$. De huidige pulsperiode is $T = 0,033 \text{ s}$. Bereken met deze gegevens de leeftijd van de pulsar, ervan uitgaande dat ten tijde van de vorming $T \approx 0 \text{ s}$.
- Vergelijk de leeftijd die je bij vraag a hebt berekend met de waargenomen leeftijd van de Krabpulsar. Wat zou de verklaring kunnen zijn voor het gevonden verschil?
- Als je nu aanneemt dat de pulsperiode altijd met dezelfde $\frac{dT}{dt}$ is toegenomen, bereken dan met welke pulsperiode T de pulsar is begonnen toen hij bij de supernova-explosie van 1054 werd geboren.

Hoofdstuk 18: Astrofysica

- Toepassingen -

Hoofdstuk 18: Astrofysica

1. $1,0 \text{ AE} = 1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}$, dus $9 \text{ AE} = 1 \cdot 10^{12} \text{ m}$

2.
$$M = \frac{4 \cdot (3,14)^2 \cdot (1,35 \cdot 10^{12})^3}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot (20 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600)^2}$$

 $= 3,66 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

3. infrarood



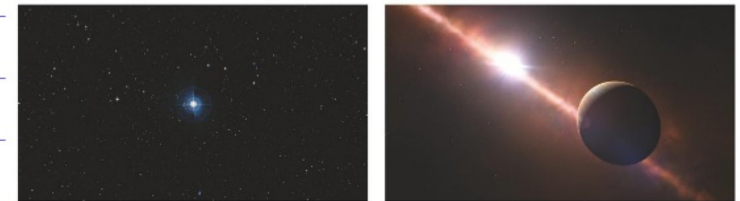
of binas
tabel 35

$$M = \frac{v^2 \cdot r}{G} \quad v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$$

Opgave 1 Een dag op Bèta Pictoris B

Onder leiding van Nederlandse astronomen is in april 2014 voor het eerst de daglengte van een exoplaneet gemeten. In deze opgave gaan we aan de hand van de metingen deze daglengte zelf berekenen. Bèta Pictoris B is voor zover bekend de enige planeet die om de ster Bèta Pictoris in het sterrenbeeld Pictor (Schilder) draait. De ster en zijn planeet zijn 63 lichtjaar van ons verwijderd. De ster is niet zichtbaar vanuit Nederland, maar is vanaf het zuidelijk halfrond met het blote oog aan de hemel te zien.



▲ **Figuur 18.51** Bèta Pictoris aan de zuidelijke hemel (links) en een artist's impression van Bèta Pictoris B (rechts)

De planeet draait in een cirkelbaan op een afstand van 9 AE om zijn ster en doet twintig jaar over een omloop.

- 1 Bereken met behulp van Binas de afstand van Bèta Pictoris B tot zijn ster in meters.
- 2 Bereken de massa van de ster Bèta Pictoris. Druk deze massa uit in zonsmassa's.

Het is gelukt om een opname te maken van het spectrum van de planeet. Daaruit blijkt dat de absorptielijn van koolstofdioxide in de dampkring van de planeet is uitgesmeerd ten gevolge van het dopplereffect. De absorptielijn is niet mooi scherp bij 2300,000 nm, maar loopt van 2299,808 nm tot 2300,192 nm.

- 3 Ligt deze absorptielijn in het zichtbare licht, het infrarood of in het ultraviolet? Leg uit.

We kunnen vanaf de aarde de rotatie van de planeet goed waarnemen, omdat we ons nagenoeg in het evenaarsvlak van de planeet bevinden, zie figuur 18.52.



▲ **Figuur 18.52** Bovenkant van Bèta Pictoris B

- 4 Leg uit waarom



Hoofdstuk 18: Astrofysica

⑤ $\Delta\lambda = 2300,192 - 2300 = 0,192 \text{ nm}$

$$v = \frac{0,192}{2300} \cdot 3,00 \cdot 10^8 = 2,5 \cdot 10^4 \text{ m/s}$$

⑥ Jupiter, $r = 69,9 \cdot 10^6 \text{ m}$
 planeet, $r = 1,154 \cdot 10^8 \text{ m}$ x 1,65

$$\text{omtrek} = 2\pi r = 7,244 \cdot 10^8 \text{ m}$$

$$t = \frac{s}{v} = \frac{7,244 \cdot 10^8 \text{ m}}{2,5 \cdot 10^4 \text{ m/s}} = 2,9 \cdot 10^4 \text{ s} = 8,05 \text{ u}$$

5 Bereken met behulp van de golflengten van de 'uitgesmeerde' absorptielijn de rotatiesnelheid v van de evenaar van de planeet uit figuur 18.52.

6 Het is ook gelukt een goede schatting te maken van de straal bij de evenaar van de planeet. Deze is 1,65 keer zo groot als de straal van Jupiter. Bereken met dit gegeven de daglengte in uren van deze planeet.

Je kunt deze Dopplerverschuiving gebruiken om de snelheid te bepalen waarmee de bron beweegt t.o.v. jou, de waarnemer:

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

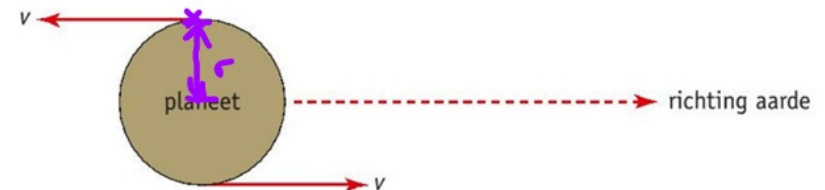
met: $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$

↑ v snelheid v.d. bron t.o.v. waarnemer

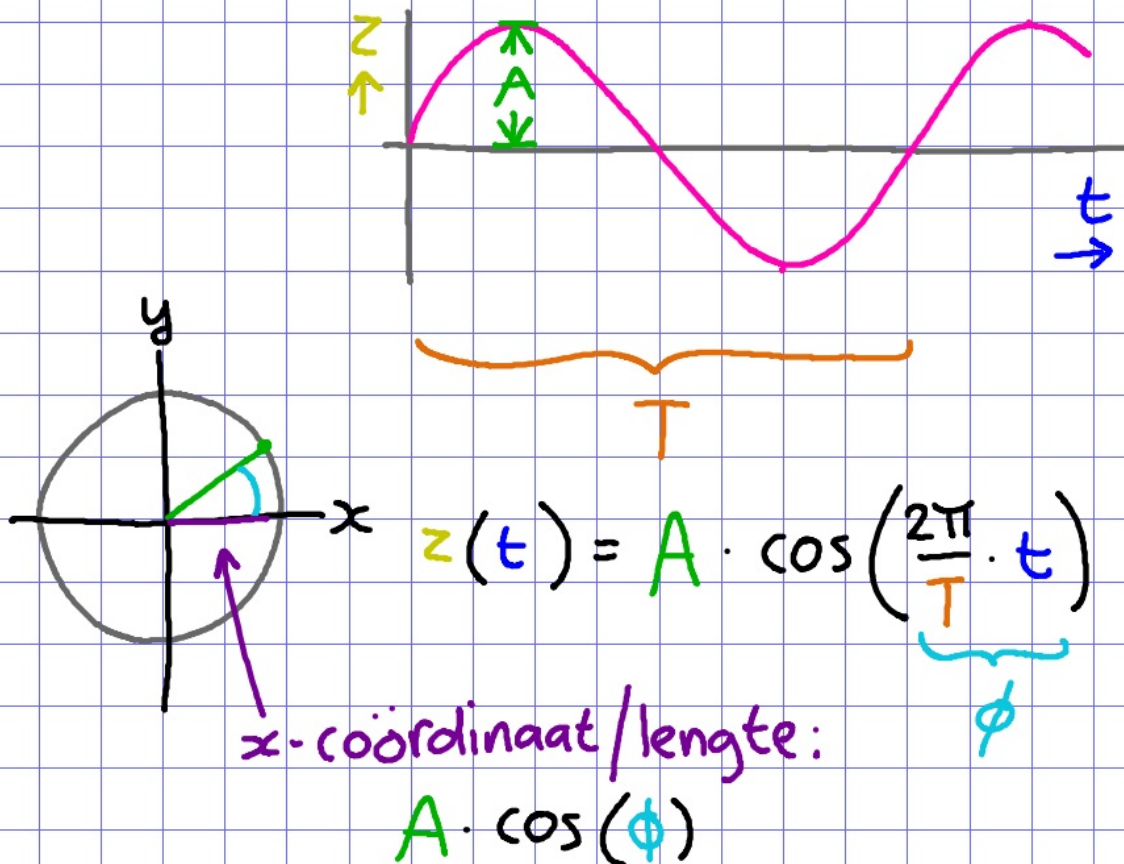
↑ λ_0 golflengte gemeten door bron

↑ λ golflengte gemeten door waarnemer

↑ $\Delta\lambda$ verschil

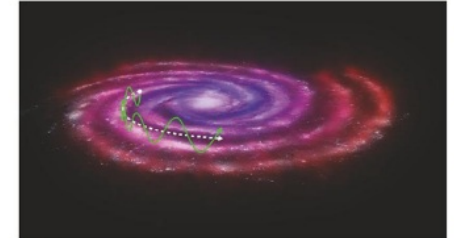


Hoofdstuk 18: Astrofysica



Opgave 2 De golfbeweging van de zon in het Melkwegstelsel

De zon draait niet alleen om het Melkwegcentrum maar beweegt tegelijkertijd op en neer ten opzichte van het Melkwegvlak. Op dit moment bevinden we ons 50 lichtjaar boven het Melkwegvlak en stijgen we naar nog grotere hoogte, zie figuur 18.53.



▲ Figuur 18.53 De baan van de zon in het Melkwegvlak

De positie van de zon boven het vlak kan beschreven worden met de formule:

$$z(t) = A \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

Hierin is t de tijd, A de amplitude in de z -richting loodrecht op het vlak van de Melkweg en T de periode van de trilling. Voor deze periode geldt:

$$T = \sqrt{\frac{\pi}{G \cdot \rho}}$$

G is de gravitatieconstante en ρ de massadichtheid (kg/m^3) van het Melkwegvlak in de omgeving van de zon.

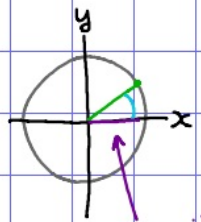
7 Bereken de periode van de op en neer gaande beweging van de zon in jaren als gegeven is dat $\rho = 0,0035$ zonsmassa per kubieke lichtjaar.

8 Bereken om de hoeveel jaar de zon door het Melkwegvlak gaat.

De onzekerheid in het in opdracht 8 gevonden antwoord is ongeveer 20 procent. Biologisch onderzoek lijkt erop te duiden dat de aarde elke 26 à 31 miljoen jaar een periode doormaakt waarin op grote schaal planten- en diersoorten uitsterven. Op het moment dat de zon het Melkwegvlak passeert is de kans dat kometen in de Oortwolk van ons zonnestelsel worden verstoord door nabije gas- en stofwolken of andere sterren het grootst. (De Oortwolk is een 'wolk' van vele miljarden komeetachtige objecten rondom ons zonnestelsel.)

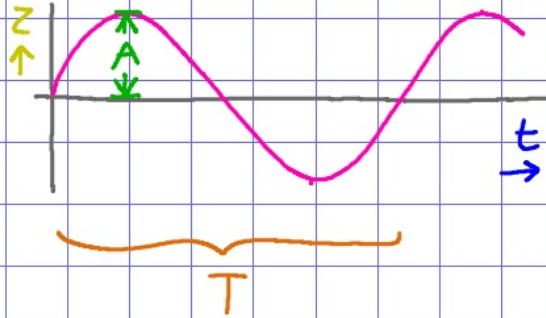
9 Op welke manier kan de op en neer gaande beweging van de zon ten opzichte van het Melkwegvlak te maken hebben met het periodiek uitsterven van leven op aarde?

Hoofdstuk 18: Astrofysica



$$z(t) = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right)$$

x -coördinaat / lengte:
 $A \cdot \cos(\phi)$



7

$$\rho = \frac{0,0035 \cdot 1,9884 \cdot 10^{30} \text{ kg}}{(9,461 \cdot 10^{15})^3} = 8,22 \cdot 10^{-21} \text{ kg/m}^3$$

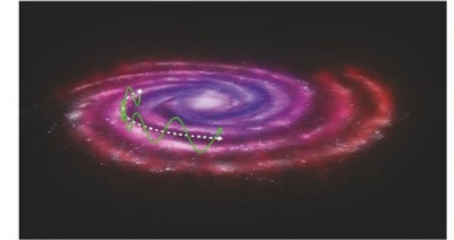
$$T = \sqrt{\frac{\pi}{G \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{3,14}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 8,22 \cdot 10^{-21}}} = 2,39 \cdot 10^{15} \text{ s}$$

nog delen door 2 →

$$= 76,0 \cdot 10^6 \text{ j}$$

Opgave 2 De golfbeweging van de zon in het Melkwegstelsel

De zon draait niet alleen om het Melkwegcentrum maar beweegt tegelijkertijd op en neer ten opzichte van het Melkwegvlak. Op dit moment bevinden we ons 50 lichtjaar boven het Melkwegvlak en stijgen we naar nog grotere hoogte, zie figuur 18.53.



▲ Figuur 18.53 De baan van de zon in het Melkwegvlak

De positie van de zon boven het vlak kan beschreven worden met de formule:

$$z(t) = A \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

Hierin is t de tijd, A de amplitude in de z -richting loodrecht op het vlak van de Melkweg en T de periode van de trilling. Voor deze periode geldt:

$$T = \sqrt{\frac{\pi}{G \cdot \rho}}$$

G is de gravitatieconstante en ρ de massadichtheid (kg/m^3) van het Melkwegvlak in de omgeving van de zon.

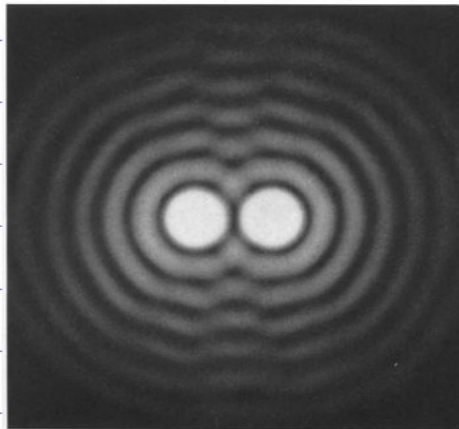
7 Bereken de periode van de op en neer gaande beweging van de zon in jaren als gegeven is dat $\rho = 0,0035$ zonsmassa per kubieke lichtjaar.

8 Bereken om de hoeveel jaar de zon door het Melkwegvlak gaat.

De onzekerheid in het in opdracht 8 gevonden antwoord is ongeveer 20 procent. Biologisch onderzoek lijkt erop te duiden dat de aarde elke 26 à 31 miljoen jaar een periode doormaakt waarin op grote schaal planten- en diersoorten uitsterven. Op het moment dat de zon het Melkwegvlak passeert is de kans dat kometen in de Oortwolk van ons zonnestelsel worden verstoord door nabije gas- en stofwolken of andere sterren het grootst. (De Oortwolk is een 'wolk' van vele miljarden komeetachtige objecten rondom ons zonnestelsel.)

9 Op welke manier kan de op en neer gaande beweging van de zon ten opzichte van het Melkwegvlak te maken hebben met het periodiek uitsterven van leven op aarde?

Hoofdstuk 18: Astrofysica



Getrennte Bilder von zwei punktförmigen, inkohärenten Lichtquellen • Images séparées de 2 sources ponctuelles incohérentes • Separated images of 2 incoherent point sources

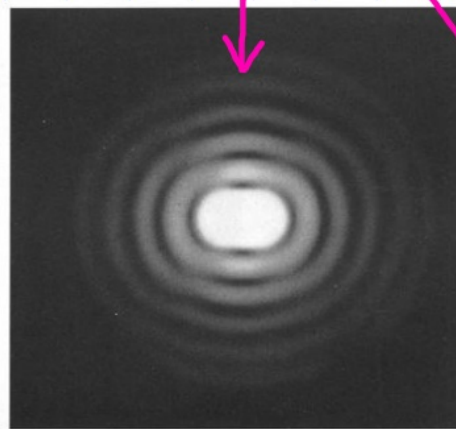
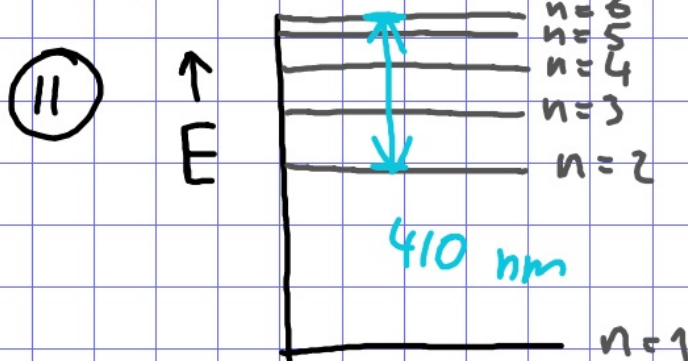
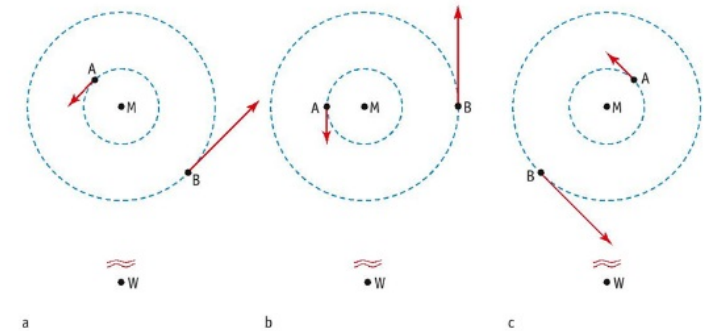


Abbildung von zwei Lichtpunkten an der Grenze der Auflösung • Images des 2 sources incohérentes à la limite de séparation • Image of a pair of incoherent point sources at the limit of resolution



Opgave 3 Spectroscopische dubbelster (pilotexamen VWO 2014-II)

Er zijn sterren die lijken te bestaan uit één object, maar bij nadere beschouwing deel uitmaken van een zogeheten 'dubbelstersysteem'. Bij een dubbelstersysteem bewegen twee sterren A en B in concentrische cirkels met middelpunt M zoals in figuur 18.54 a, b en c is aangegeven. Figuur 18.54 is niet op schaal. Waarnemer W staat in werkelijkheid heel ver weg.



▲ Figuur 18.54

A en B liggen op een lijn die steeds door M gaat.

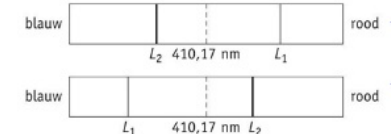
10 Geef de reden dat A en B dezelfde omlooptijd hebben.

Er zijn dubbelstersystemen waarbij A en B één ster lijken te zijn, zelfs als je er met een telescoop naar kijkt. Dat het toch om een dubbelster gaat, kan men afleiden uit het spectrum van het licht dat de sterren uitstralen. Door het dopplereffect vindt bij de lijnen van het spectrum van deze sterren tegelijkertijd roodverschuiving en blauwverschuiving plaats.

In het vervolg van de opgave nemen we aan dat de aarde met waarnemer W in het draaivlak van A en B ligt en dat M niet ten opzichte van de aarde beweegt. Men bestudeert de spectraallijn H_α die bij een stilstaande ster een golflengte $\lambda = 410,17$ nm heeft.

11 Tussen welke waarden van n vindt de overgang plaats die hoort bij lijn H_α ? Zie tabel 21 in Binas.

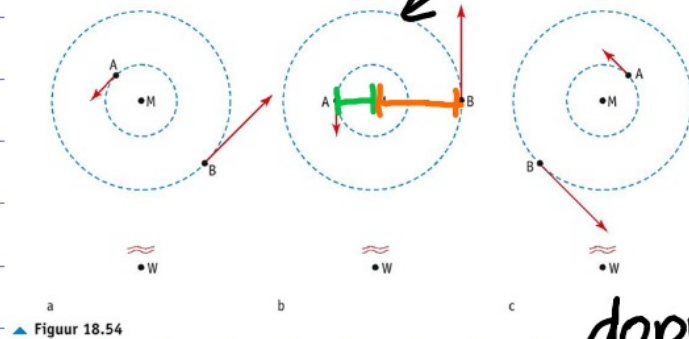
Bij dubbelsterren is de H_α -lijn gesplitst in twee H_α -lijnen die in de loop van de tijd verschuiven. Zie figuur 18.55.
De lijn $\lambda = 410,17$ nm is gestippeld weergegeven.



▲ Figuur 18.55

Hoofdstuk 18: Astrofysica

12



grotere baanstraal,
zelfde omlooptijd,
dus grotere
baan-snelheid,
dus grotere
dopplerversch.

Je kunt deze Dopplerverschuiving gebruiken om de snelheid te bepalen waarmee de bron beweegt t.o.v. jou, de waarnemer:

$$v = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

met: $\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0$

↑ snelheid v.d. bron t.o.v. waarnemer

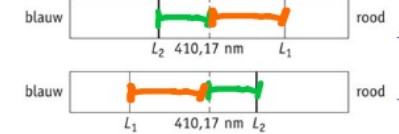
↑ verschil

↑ gemeten golflengte door waarnemer

↑ golflengte gemeten door bron

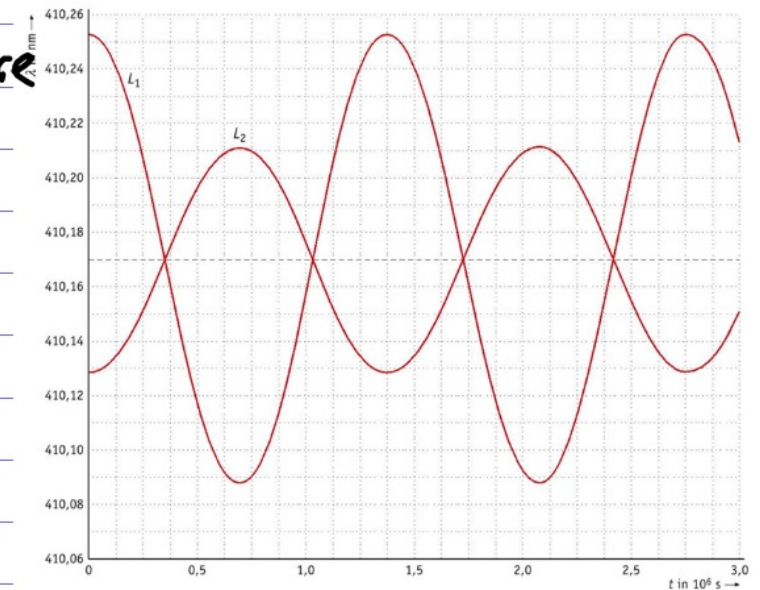
11 Tussen welke waarden van n vindt de overgang plaats die hoort bij lijn H_α ? Zie tabel 21 in *Binas*.

Bij dubbelsterren is de H_α -lijn gesplitst in twee H_α -lijnen die in de loop van de tijd verschuiven. Zie figuur 18.55. De lijn $\lambda = 410,17 \text{ nm}$ is gestippeld weergegeven.



▲ Figuur 18.55

In figuur 18.56 zijn waargenomen golflengten van de H_α -lijnen van de sterren A en B weergegeven als functie van de tijd. Ook hier is de lijn $\lambda = 410,17 \text{ nm}$ gestippeld.

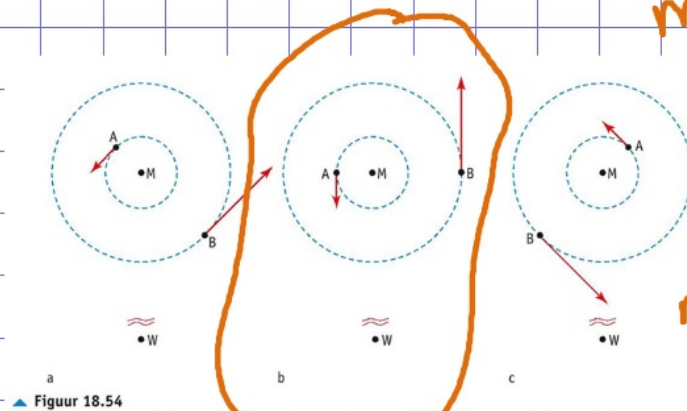


▲ Figuur 18.56

12 Leg uit dat het golflengteverloop L_2 afkomstig is van ster A.

Hoofdstuk 18: Astrofysica

13



▲ Figuur 18.54

Je kunt deze Dopplerverschuiving gebruiken om de snelheid te bepalen waarmee de bron beweegt t.o.v. jou, de waarnemer:

$$v = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

met: $\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0$

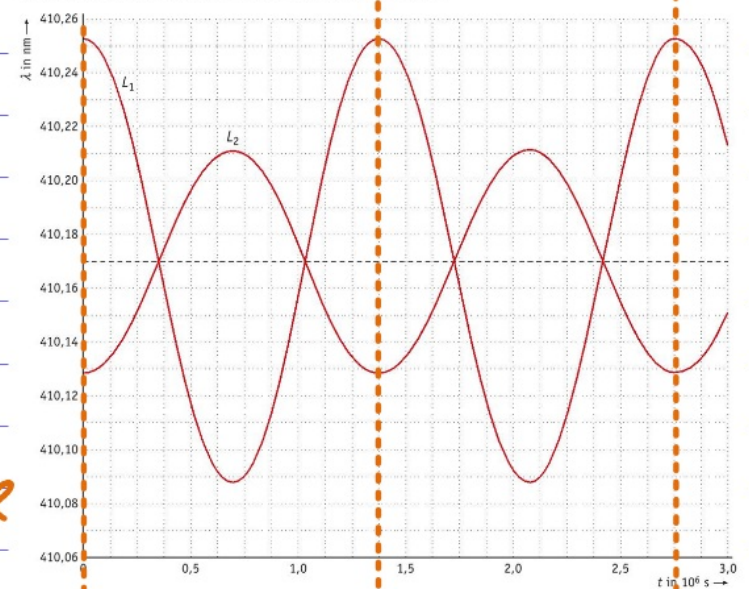
↑ snelheid v.d. bron t.o.v. waarnemer

↑ verschil

↑ gemeten golflengte door waarnemer

↑ golflengte gemeten door bron

In figuur 18.56 zijn waargenomen golflengten van de H_β-lijnen van de sterren A en B weergegeven als functie van de tijd. Ook hier is de lijn $\lambda = 410,17$ nm gestippeld.



▲ Figuur 18.56

- 12 Leg uit dat het golflengteverloop L_2 afkomstig is van ster A.
- 13 Teken in de figuur op de uitwerkbijlage een punt b op lijn L_1 dat overeenkomt met de situatie van figuur 18.54b en geef een toelichting.
Uit figuur 18.56 kan men bepalen dat voor de baanstralen geldt: $r_A = 6,6 \cdot 10^9$ m en $r_B = 13,2 \cdot 10^9$ m.
- 14 Voer deze bepaling uit. Bepaal daartoe eerst de waarden van baansnelheden v_A en v_B met het dopplereffect.
De middelpuntzoekende kracht op beide sterren wordt geleverd door de gravitatiekracht.
- 15 Voer de volgende opdrachten uit:
 - › Leg uit dat de middelpuntzoekende kracht op beide sterren gelijk is.
 - › Bepaal de verhouding van de massa's van de sterren A en B.

Hoofdstuk 18: Astrofysica

Je kunt deze Dopplerverschuiving gebruiken om de snelheid te bepalen waarmee de bron beweegt t.o.v. jou, de waarnemer:

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c$$

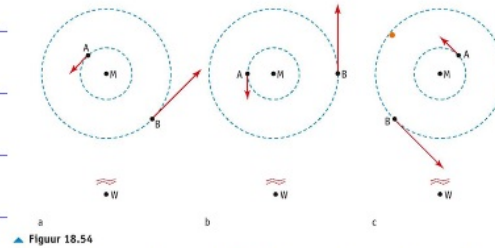
met: $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$

snelheid v.d. bron t.o.v. waarnemer

λ_0 : golflengte gemeten door bron

λ : golflengte gemeten door waarnemer

$\Delta\lambda$: verschil



Figuur 18.54

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c = \frac{0,04}{410,17} \cdot 3,00 \cdot 10^8 = 2,9 \cdot 10^4 \text{ m/s}$$

(14)

$$2\pi r = 2,9 \cdot 10^4 \cdot 1,35 \cdot 10^6 = 3,95 \cdot 10^{10} \text{ m}$$

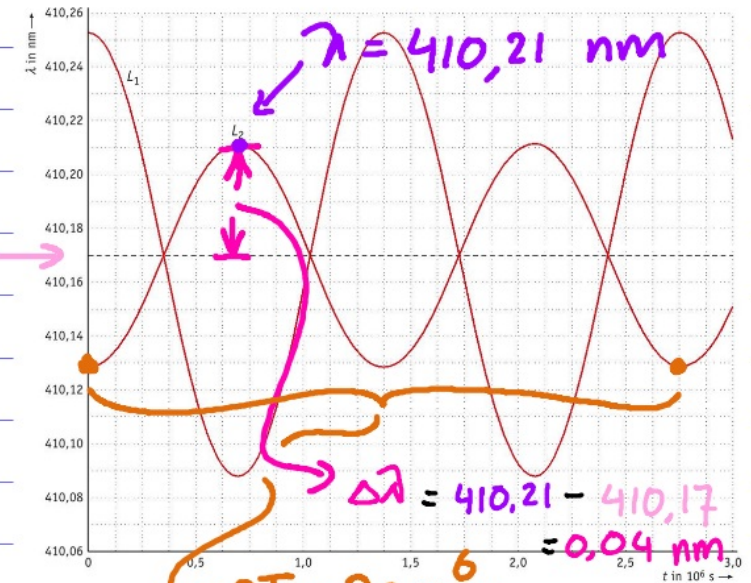
$$s = v \cdot t$$

$$\text{Omtrek} = 2\pi r$$

$$r = \frac{3,95 \cdot 10^{10} \text{ m}}{2\pi} = 6,3 \cdot 10^9 \text{ m}$$

ster A

In figuur 18.56 zijn waargenomen golflengten van de H β -lijnen van de sterren A en B weergegeven als functie van de tijd. Ook hier is de lijn $\lambda = 410,17 \text{ nm}$ gestippeld.



Figuur 18.56

12 Leg uit dat het golflengteverloop L_2 afkomstig is van ster A.

13 Teken in de figuur op de uitwerkbijlage een punt b op lijn L_1 dat overeenkomt met de situatie van figuur 18.54b en geef een toelichting.

Uit figuur 18.56 kan men bepalen dat voor de baanstralen geldt: $r_A = 6,6 \cdot 10^9 \text{ m}$ en $r_B = 13,2 \cdot 10^9 \text{ m}$.

14 Voer deze bepaling uit. Bepaal daartoe eerst de waarden van baansnelheden v_A en v_B uit het dopplereffect.

De middelpuntzoekende kracht op beide sterren wordt geleverd door de gravitatiekracht.

15 Voer de volgende opdrachten uit:

- Leg uit dat de middelpuntzoekende kracht op beide sterren gelijk is.
- Bepaal de verhouding van de massa's van de sterren A en B.

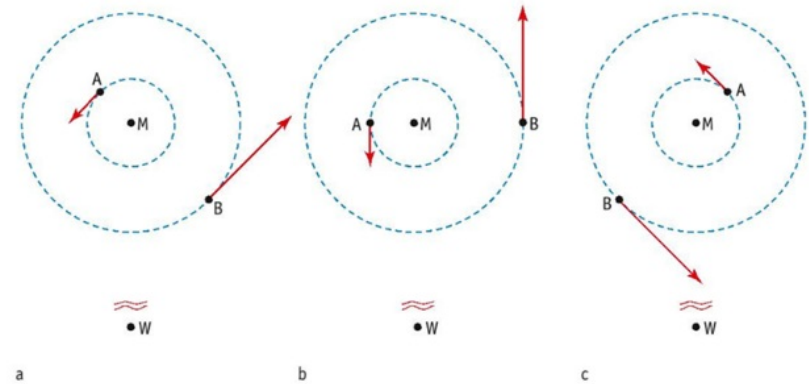
Hoofdstuk 18: Astrofysica

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$F_{\text{mpz}, A} = F_{\text{mpz}, B}$$

$$\frac{m_A \cdot v_A^2}{r_{AM}} = \frac{m_B \cdot v_B^2}{r_{BM}}$$

$$\frac{m_A}{m_B} = \frac{v_B^2 \cdot r_{AM}}{v_A^2 \cdot r_{BM}} = \frac{(2\pi r_{BM} / T)^2 \cdot r_{AM}}{(2\pi r_{AM} / T)^2 \cdot r_{BM}} = \frac{r_{BM}^2 \cdot r_{AM}}{r_{AM}^2 \cdot r_{BM}} = \frac{r_{BM}}{r_{AM}} = 2$$



▲ Figuur 18.54

De middelpuntzoekende kracht op beide sterren wordt geleverd door de gravitatiekracht.

15 Voer de volgende opdrachten uit:

- › Leg uit dat de middelpuntzoekende kracht op beide sterren gelijk is.
- › Bepaal de verhouding van de massa's van de sterren A en B.

✗ $F_{\text{mpz}} = F_g$ invullen voor ster A

$$\frac{m_A \cdot v_A^2}{r_{AM}} = \frac{m_A \cdot m_B \cdot G}{r_{AB}^2}$$

Hoofdstuk 18: Astrofysica

Opgave 4 De dichtheid van sterren in onze Melkweg



▲ **Figuur 18.57** Een zijaanzicht van een sterrenstelsel

Volgens een model is het aantal sterren per kubieke lichtjaar n in ons Melkwegstelsel gegeven door de formule:

$$n(z, r) = 0,3 \cdot e^{\left(\frac{-z}{h_z}\right)} \cdot e^{\left(\frac{-r}{h_r}\right)}$$

Hierin is z de loodrechte hoogte in lichtjaar tot het Melkwegvlak. Deze is zowel boven als onder het vlak positief. r is de afstand in lichtjaar tot het Melkwegcentrum. Verder is $h_z = 1000$ lichtjaar en $h_r = 7300$ lichtjaar. We gaan in deze opgave de dichtheid van sterren rond het centrum en in de zonsomgeving berekenen, en daaruit de gemiddelde afstand tot de meest nabije sterren.

- 16 Bereken de sterrendichtheid (per kubieke lichtjaar) in het melkwegvlak op 500 lichtjaar van het centrum van de Melkweg.
- 17 Maak een schatting van de gemiddelde afstand in lichtjaar tussen de sterren van opgave 16.
- 18 Bereken de dichtheid $n(z, r)$ voor de omgeving van onze zon. Neem voor de positie van de zon $z = 50$ lichtjaar boven het Melkwegvlak en $r = 28\,000$ lichtjaar.
- 19 Geef een schatting van de gemiddelde afstand van de zon tot de sterren in zijn omgeving.
- 20 Zoek in *Binas* de afstand op tot de meest nabije ster, Proxima Centauri. Komt de afstand tussen de zon en deze ster redelijk overeen met je berekening?

Hoofdstuk 18: Astrofysica

- Archief -