

Sterrenkunde Olympiade 2015

les 1:

sterren en sterevolutie

Onno Pols

Afdeling Sterrenkunde, Radboud Universiteit Nijmegen

de zon: de dichtstbijzijnde ster



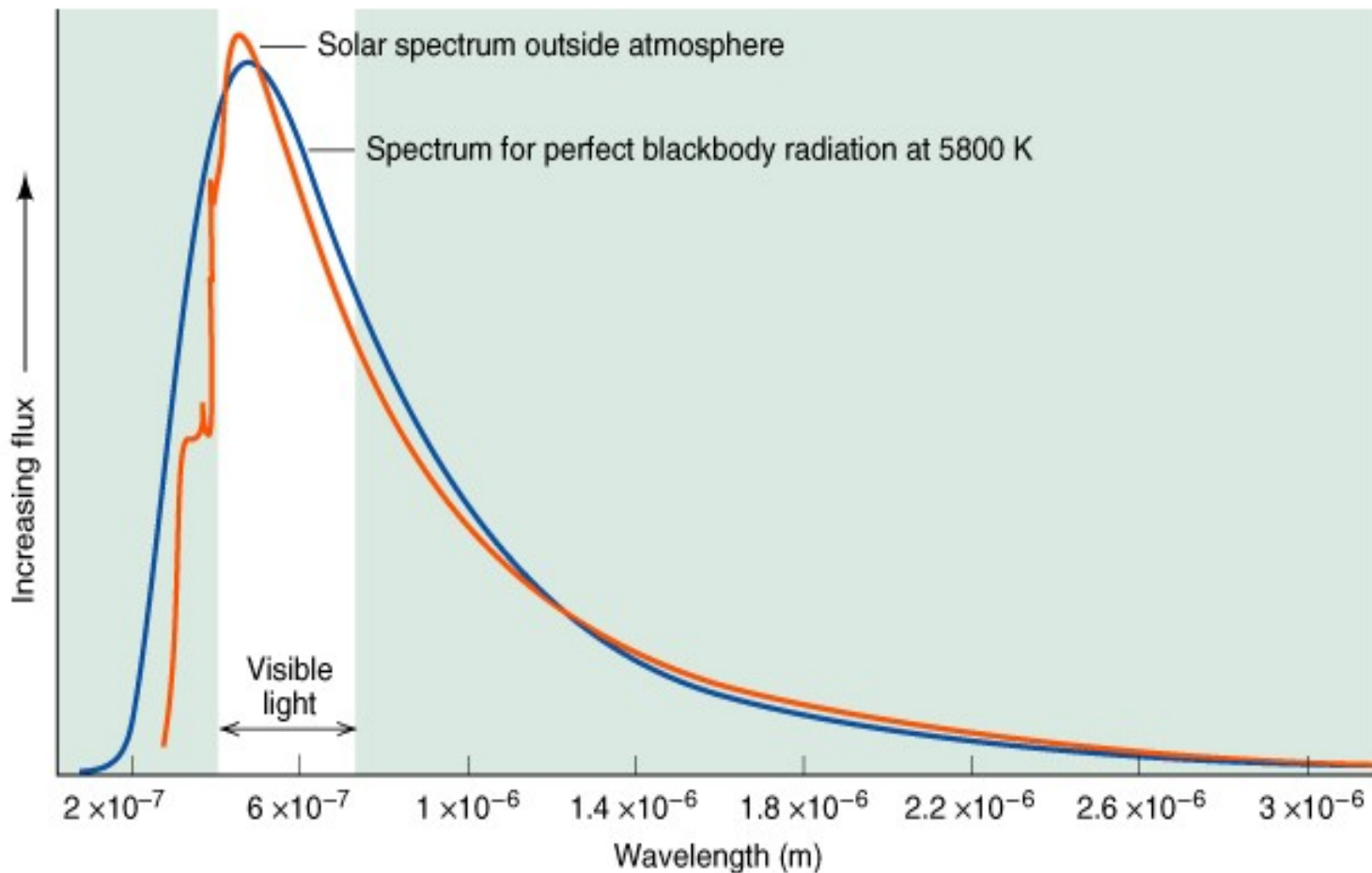
de zon: de dichtstbijzijnde ster



- de zon is een bol van heet gas
- temperatuur neemt van binnen naar buiten af
- we zien de laag waar de gezichtslijn ophoudt: de fotosfeer
- deze laag heeft een temperatuur van 5800 K

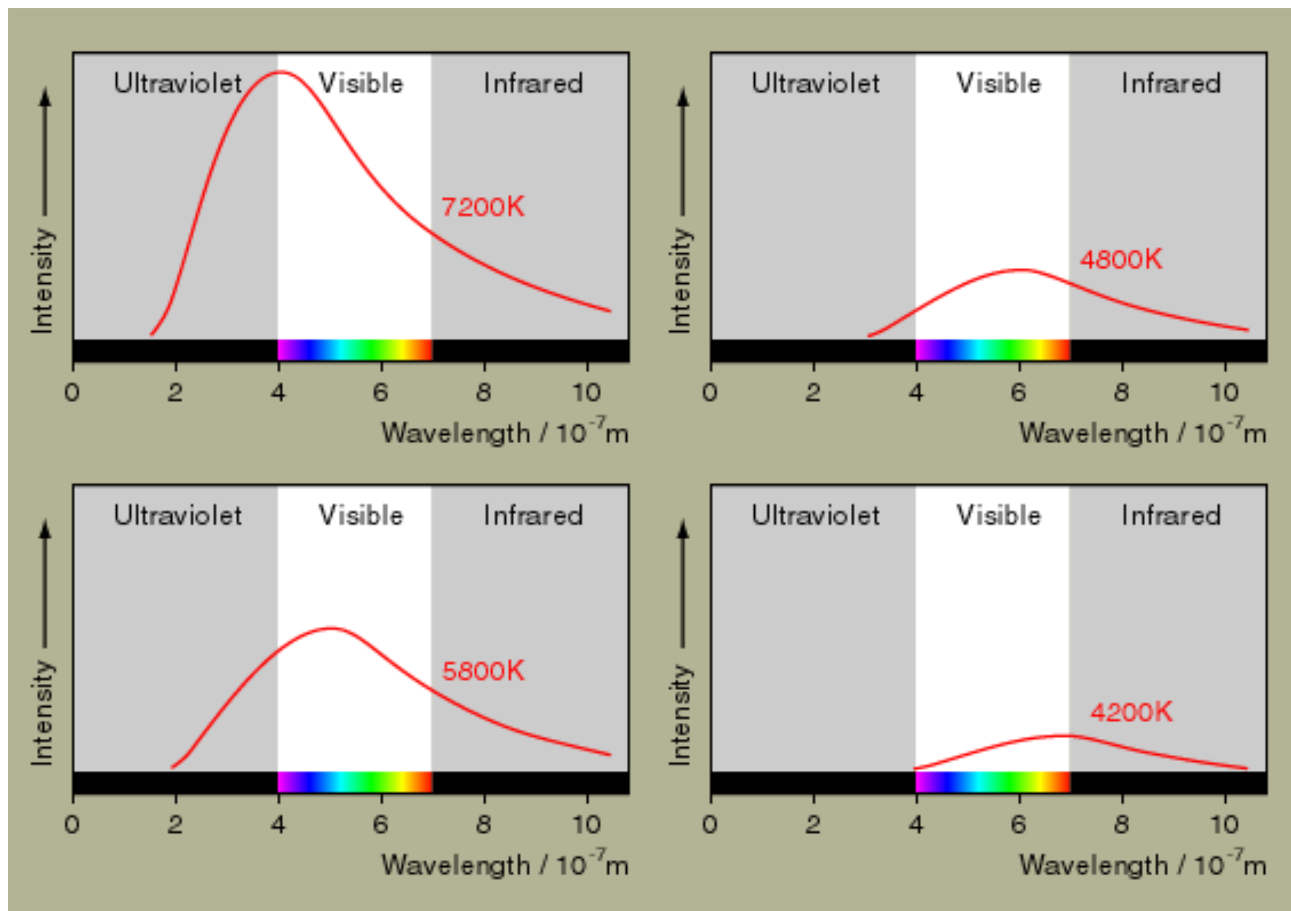
spectrum van de zon

- de fotosfeer is een laag gas met $T = 5800$ K, straalt bijna als een *zwarte straler*

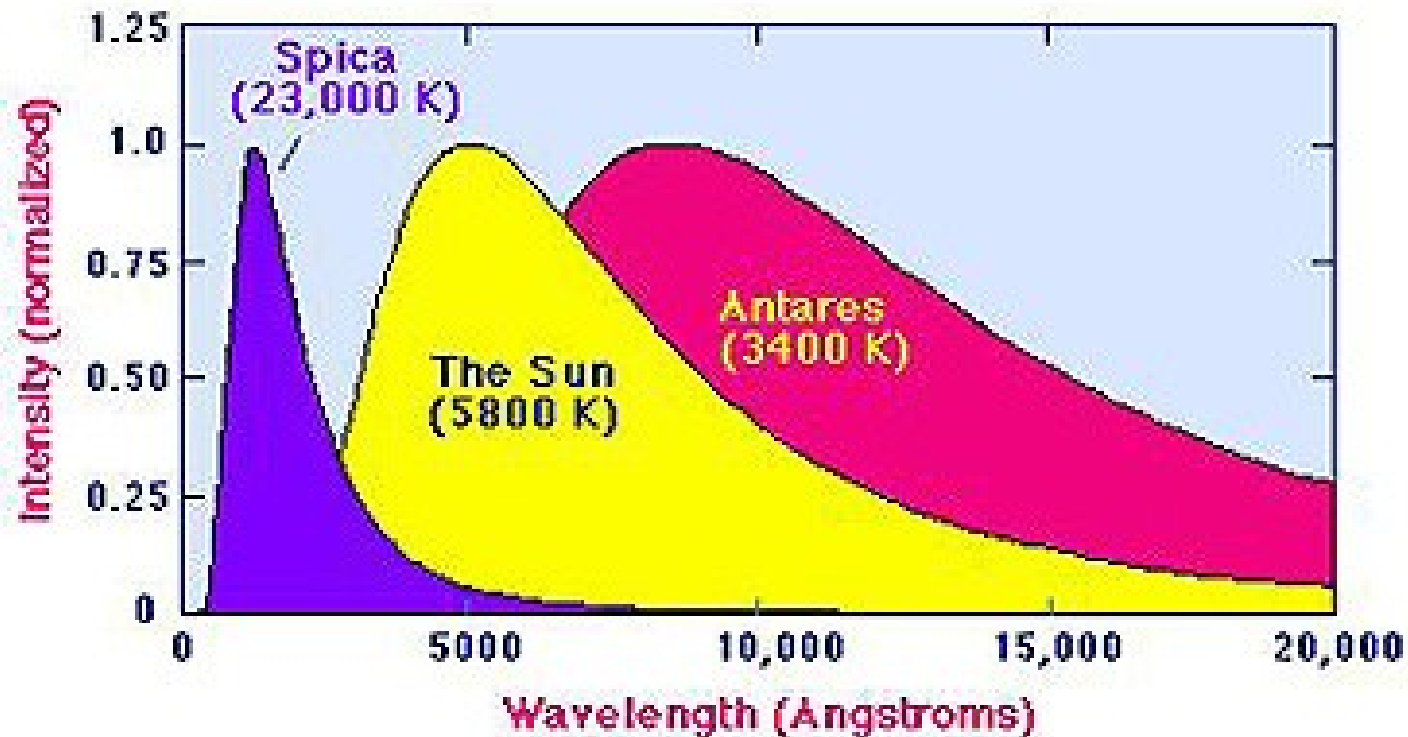


eigenschappen van een zwarte straler

- totaal uitgezonden flux: $F = \sigma T^4$ [W m⁻²]
- golflengte van piek hangt af van temperatuur: $\lambda_{\text{piek}} T = 3 \times 10^{-3}$ m K
- hogere $T \Rightarrow$ kortere golflengtes $\Rightarrow$ blauwere kleur



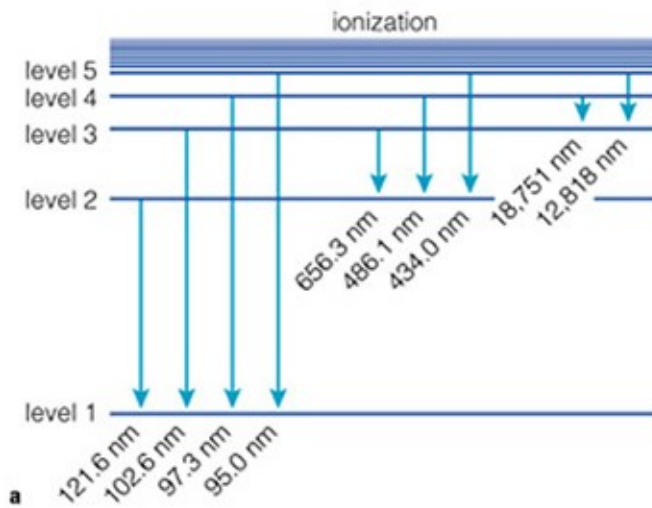
spectra van sterren



blauw = heet

rood = koel

spectra van sterren



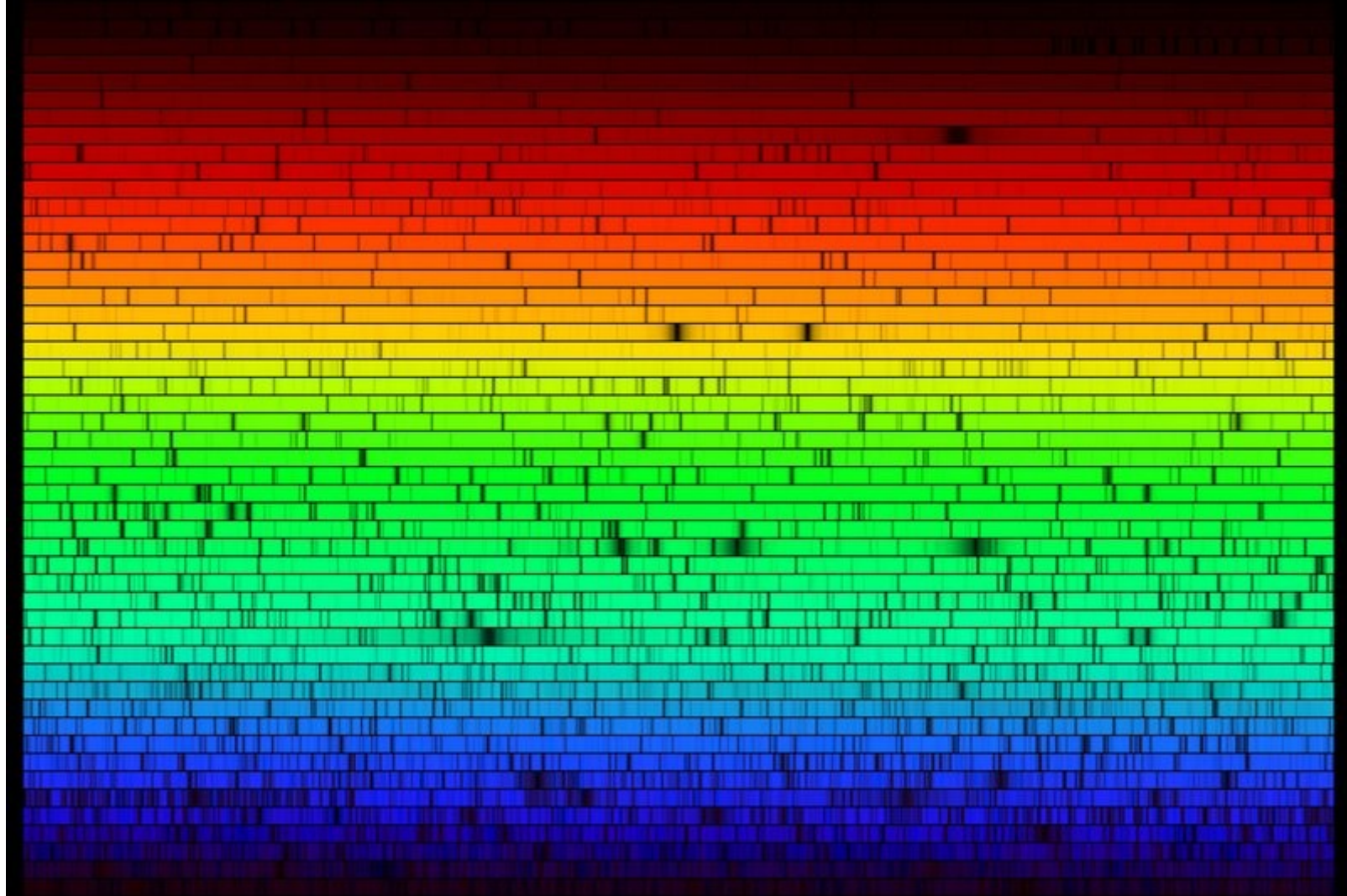
energieniveau's in het
waterstof-atoom

emissie-spectrum:
een hete, ijle gaswolk

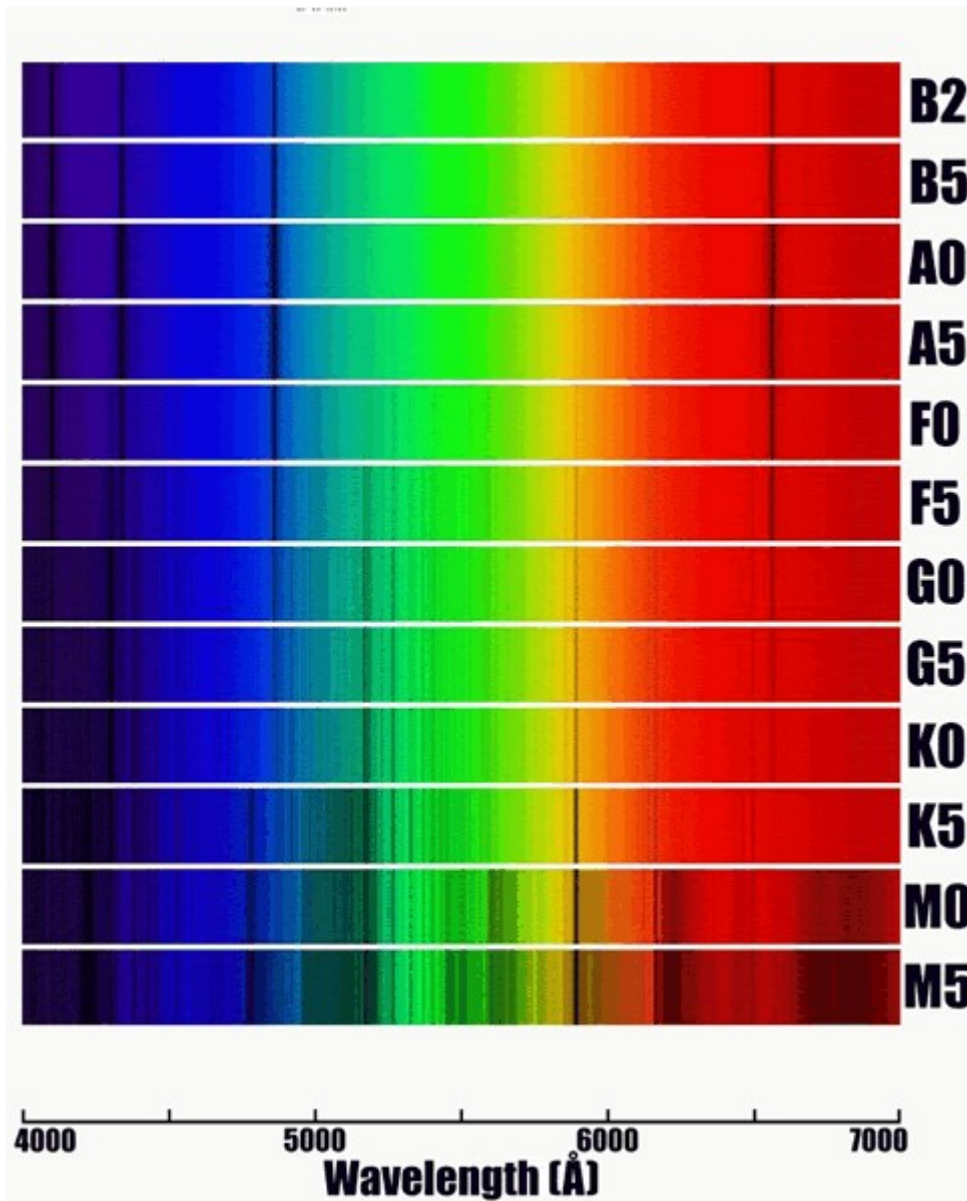
absorptie-spectrum:
een hete gasbol (ster) met
naar buiten afnemende
temperatuur



spectrum van de zon



spectra van sterren



← spectraalklasse

spectraallijnen geven informatie over de chemische samenstelling van sterren!

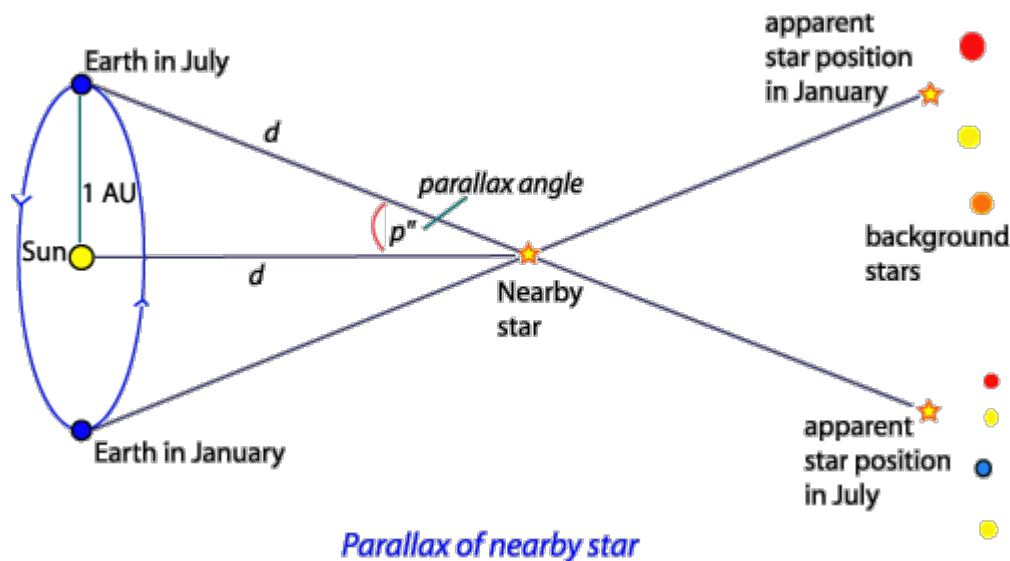
waterstof is het meest voorkomende element ($\approx 70\%$), gevolgd door helium ($\approx 28\%$)

zwaardere elementen: $\approx 2\%$

metingen aan sterren

- spectrum $\Rightarrow$ **temperatuur** aan oppervlak (fotosfeer)
- gemeten helderheid $\Rightarrow$ **stralingsflux** f die aarde bereikt [W m^{-2}] (*schijnbare* helderheid)
- **afstand** d tot de ster (uit *parallax*, voor sterren niet te ver van de zon)
- hieruit volgt de *absolute* helderheid = **lichtkracht** [W]

$$L = 4\pi d^2 f$$



metingen aan sterren

- spectrum $\Rightarrow$ **temperatuur** aan oppervlak (fotosfeer)
- gemeten helderheid $\Rightarrow$ **stralingsflux** f die aarde bereikt [W m^{-2}] (*schijnbare* helderheid)
- **afstand** d tot de ster (uit *parallax*, voor sterren niet te ver van de zon)
- hieruit volgt de *absolute* helderheid = **lichtkracht** [W]

$$L = 4\pi d^2 f$$

- Hertzsprung (1911) en Russell (1913): zet *lichtkracht* van sterren in zonsomgeving uit tegen hun *temperatuur*...



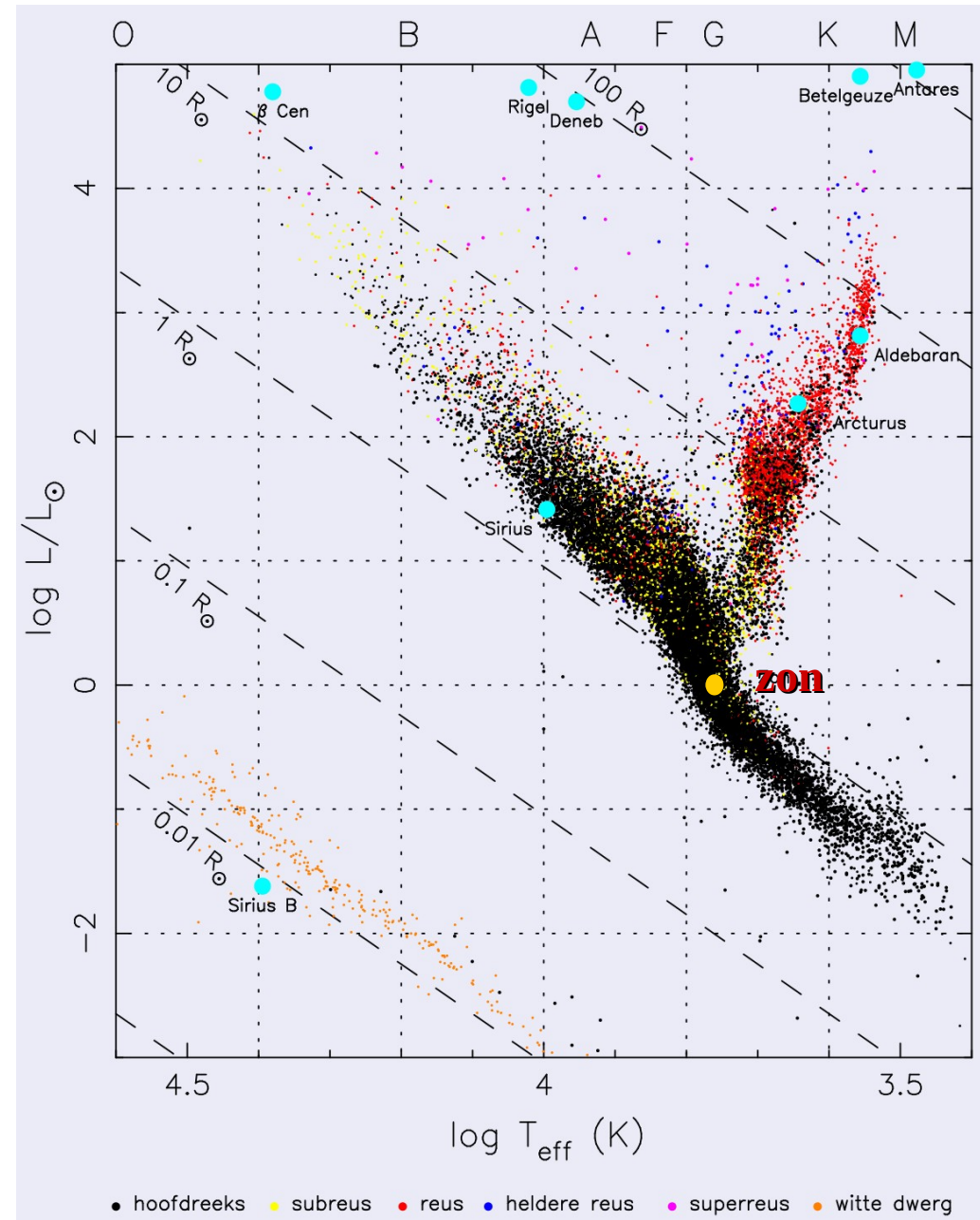
Ejnar Hertzsprung



Henry Norris Russell

het Hertzsprung-Russell diagram

- alle sterren met $d < 300$ lichtjaar:



het Hertzsprung-Russell diagram

- alle sterren met $d < 300$ lichtjaar:
- T_{eff} is de temperatuur van een zwarte straler met dezelfde flux

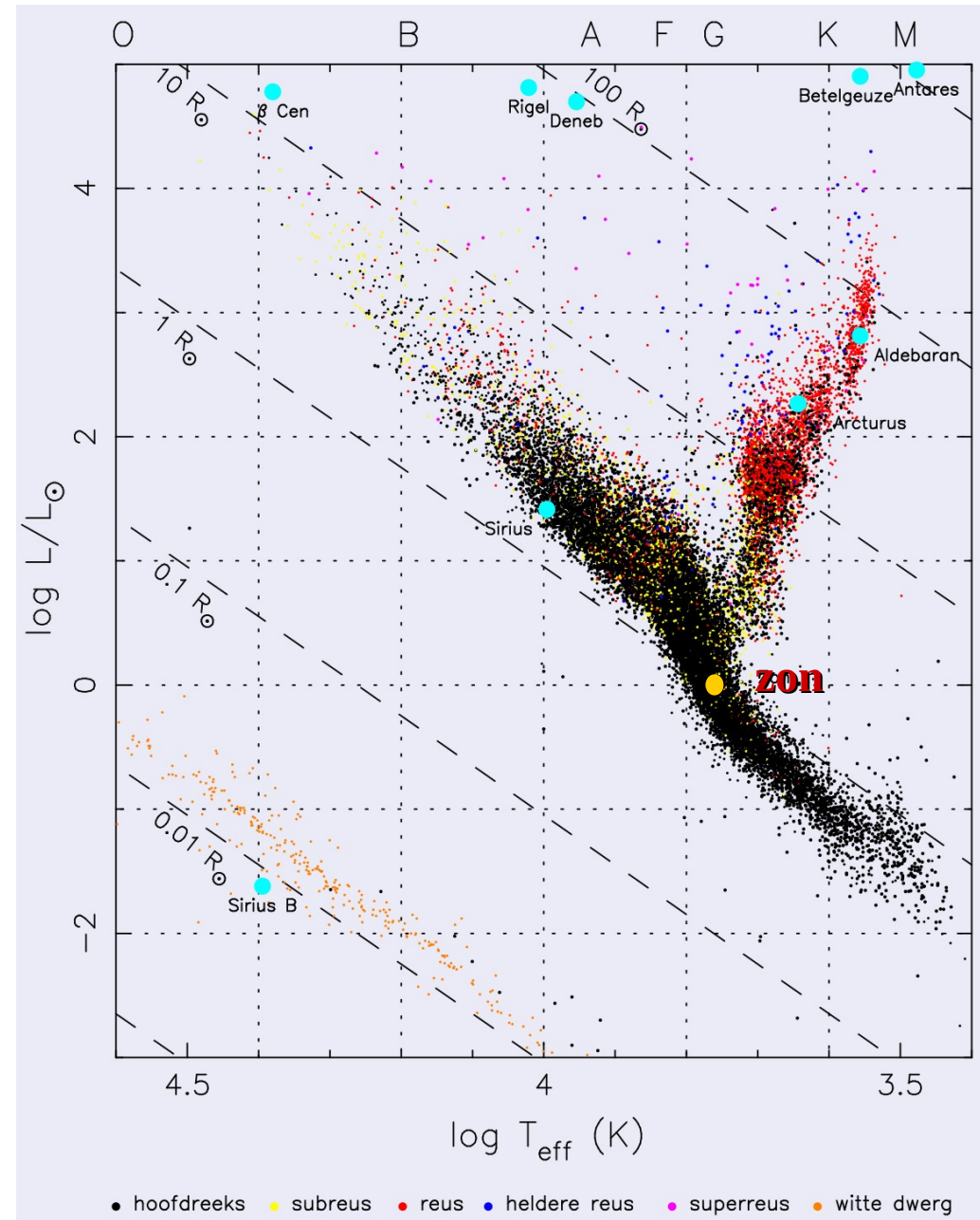
$$F = \sigma T_{\text{eff}}^4$$

- relatie met lichtkracht:
 $L = (\text{oppervlak bol}) \times F$

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

- in diagram van $\log L$ tegen $\log T_{\text{eff}}$ liggen sterren met dezelfde straal R langs rechte lijnen:

$$\log L \propto 4 \log T_{\text{eff}} + 2 \log R$$



het Hertzsprung-Russell diagram

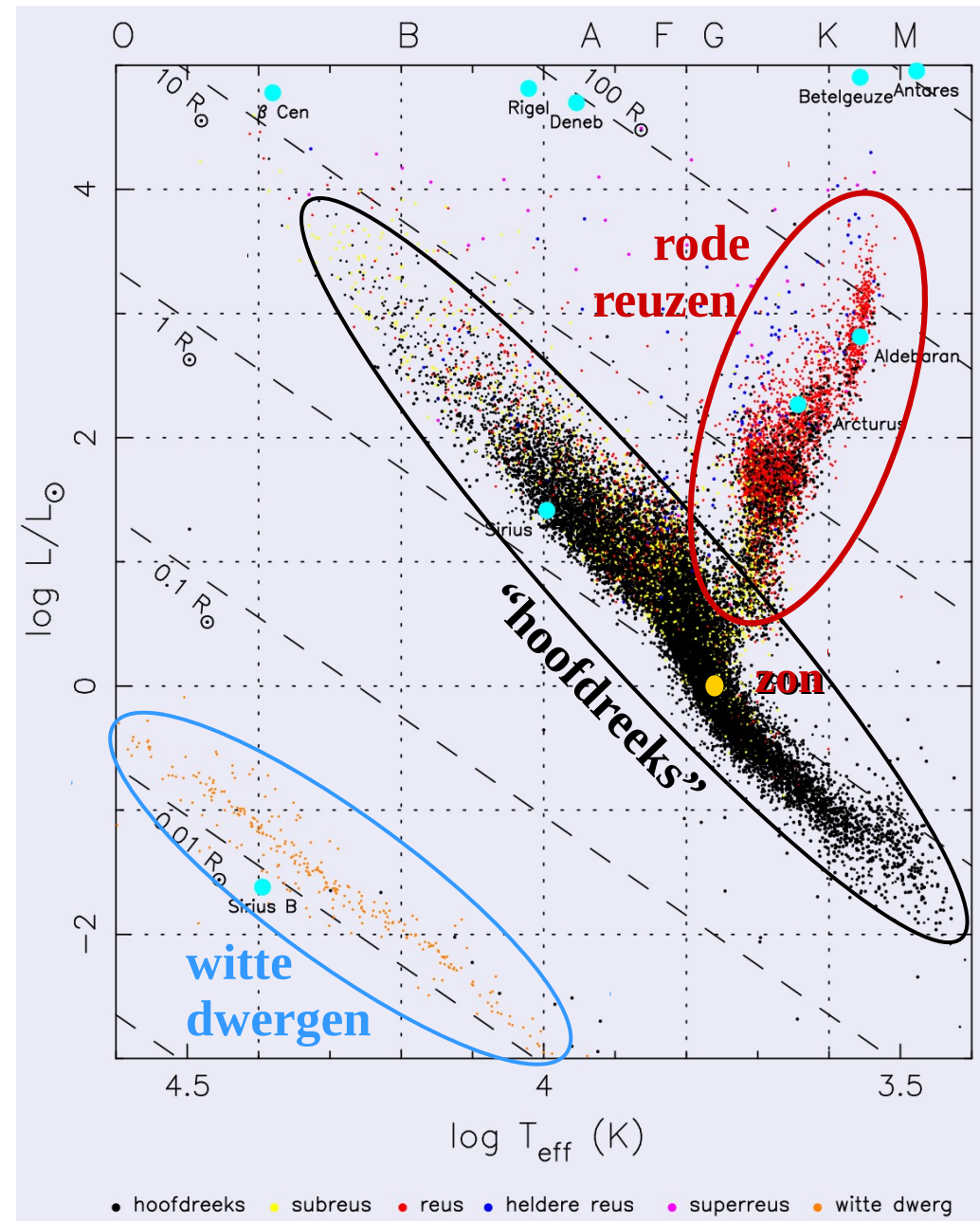
- alle sterren met $d < 300$ lichtjaar:
- T_{eff} is de temperatuur van een zwarte straler met dezelfde flux

$$F = \sigma T_{\text{eff}}^4$$

- relatie met lichtkracht:
 $L = (\text{oppervlak bol}) \times F$

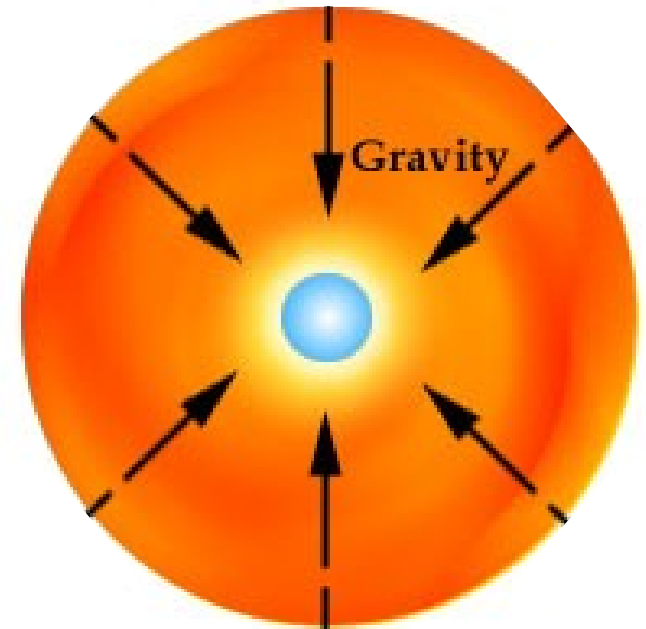
$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

- sterren blijken alleen op bepaalde “plekken” in het H-R diagram voor te komen...
- om dit te begrijpen moeten we de structuur en evolutie van sterren bestuderen



structuur van een ster

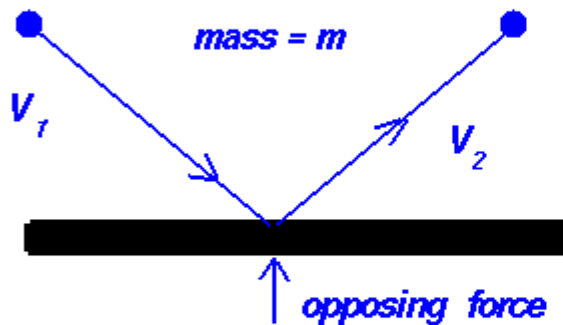
- *zwaartekracht* is de dominante kracht in het heelal
- *radieel* en *altijd aantrekkend*
- voor massieve objecten (sterren, planeten) leidt dit tot de *bolvorm*
- voor een ster in evenwicht is een tegenkracht nodig...



gasdruk

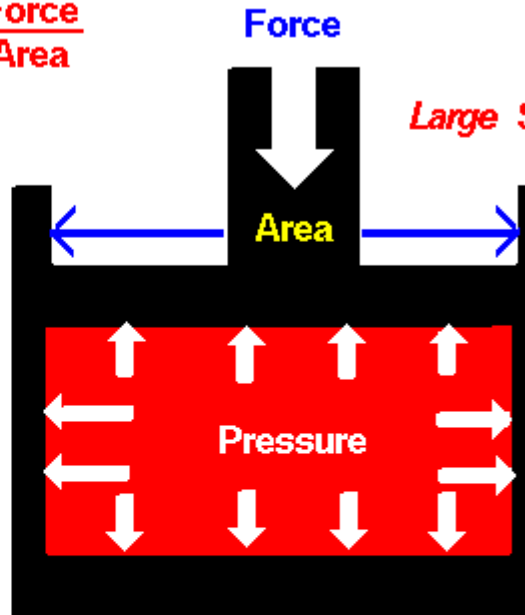
Pressure is $\frac{\text{Force}}{\text{Area}}$

Small Scale



Pressure is a measure of the linear momentum of the gas molecules.

Large Scale



Pressure force acts perpendicular to enclosing surfaces.

Pressure is a scalar quantity.
(magnitude, no direction)

druk van heet gas:

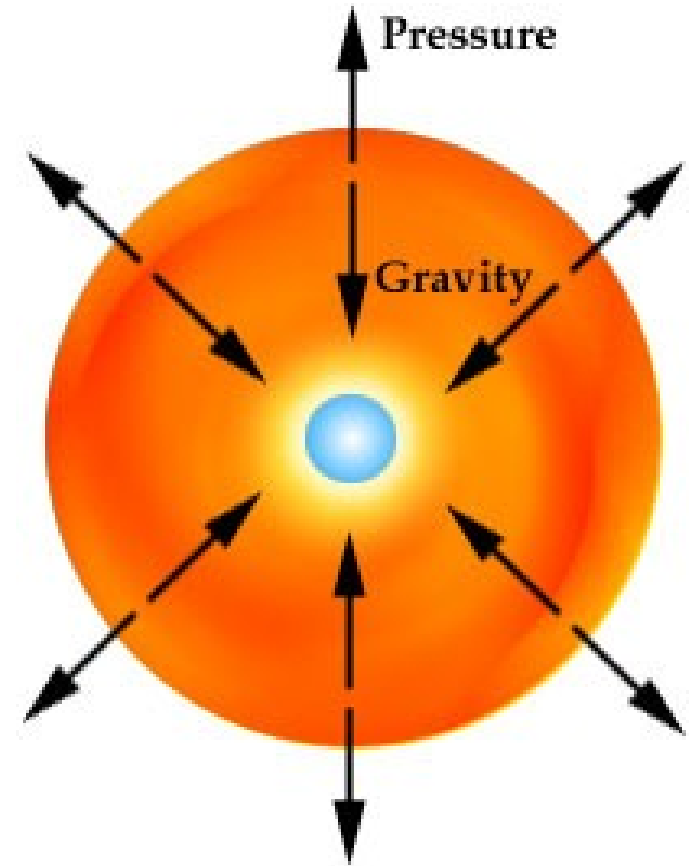
$$P V = N k T$$

structuur van een ster

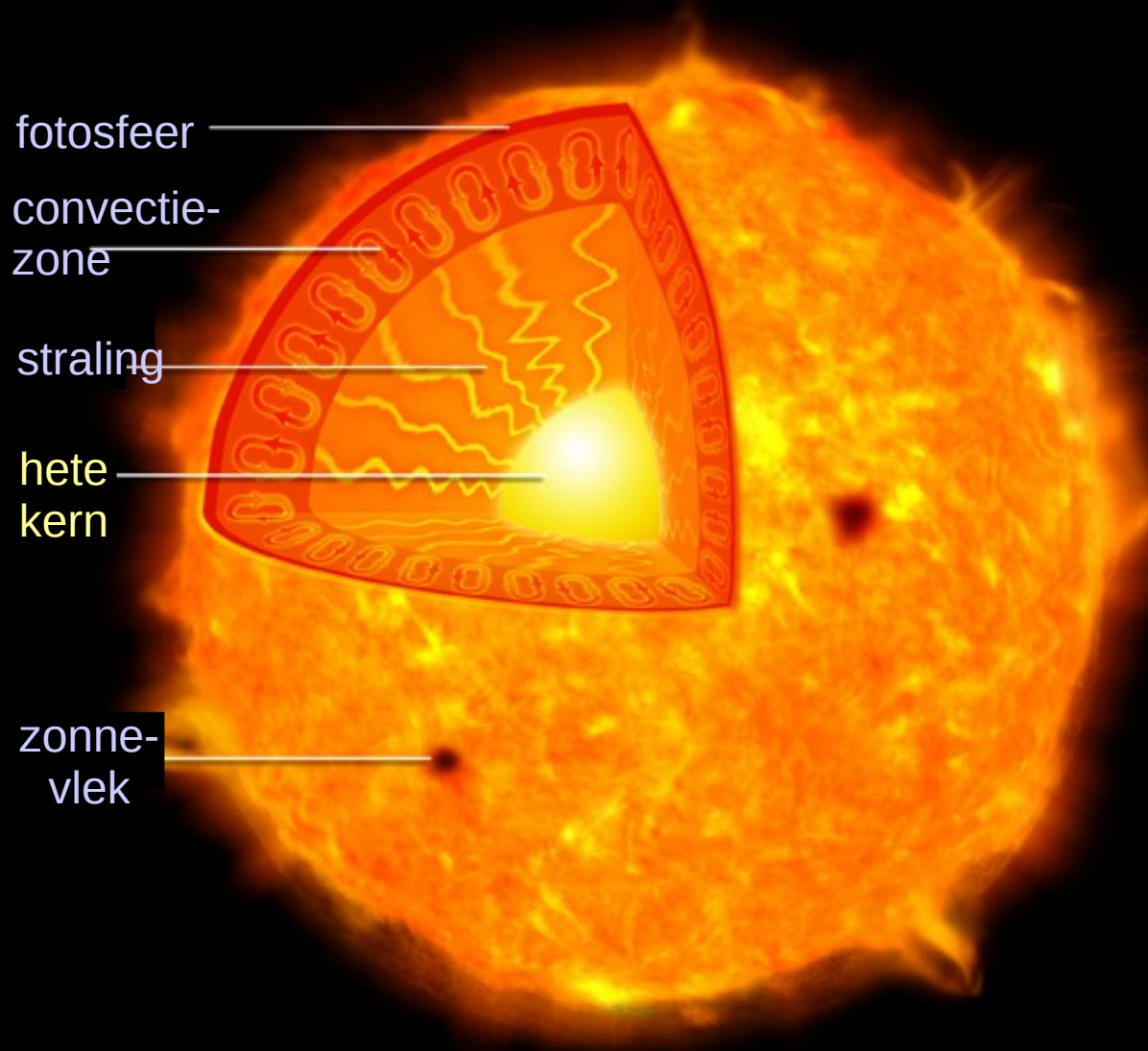
- sterren zijn in *hydrostatisch evenwicht* (drukbalans):

zwaartekracht = drukverschil	
(naar binnen)	(naar buiten)

- gasdruk neemt toe naar stercentrum
- samendrukking** (door zwaartekracht) leidt tot een zeer **hoge druk** in het centrum
- hoge druk $\Rightarrow$ **hoge temperatuur** in centrum $\Rightarrow$ een gewone ster moet uit **heet gas** bestaan
- hoe sterker de samentrekking, hoe hoger de temperatuur in de ster!



structuur van een ster als de zon



- oppervlakte-temperatuur:
 $T_{\text{eff}} = 5800 \text{ K}$
- samendrukking door zwaartekracht zorgt voor zeer hoge druk en temperatuur in het centrum van de zon:

$$\rho_c \approx 10^5 \text{ kg/m}^3$$

$$P_c \approx 10^{16} \text{ N/m}^2$$

$$T_c = 1.5 \times 10^7 \text{ K}$$

energiebronnen van een ster

- chemische verbranding?
 - verbranding van waterstof levert 1.1×10^8 J/kg
 - massa zon = 1.99×10^{30} kg $\Rightarrow$ totale energie $E < 2.2 \times 10^{38}$ J
 - lichtkracht zon: $L_{\text{zon}} = 3.8 \times 10^{26}$ W
 - maximale levensduur: $E/L_{\text{zon}} = 5.8 \times 10^{11}$ sec = 18000 jaar: veel te kort!

energiebronnen van een ster

- chemische verbranding?
 - verbranding van waterstof levert 1.1×10^8 J/kg
 - massa zon = 1.99×10^{30} kg $\Rightarrow$ totale energie $E < 2.2 \times 10^{38}$ J
 - lichtkracht zon: $L_{\text{zon}} = 3.8 \times 10^{26}$ W
 - maximale levensduur: $E/L_{\text{zon}} = 5.8 \times 10^{11}$ sec = 18000 jaar: veel te kort!
- samentrekking door **zwaartekracht**?
 - potentiële zwaartekrachtsenergie $E \approx GM^2/R = 3.8 \times 10^{41}$ J
 - maximale levensduur: $E/L_{\text{zon}} = 1.0 \times 10^{15}$ sec = **30 miljoen jaar**
 - zou kunnen, dachten **Kelvin & Helmholtz**
eind 19e eeuw...
 - maar: gesteenten aardkorst > 3 miljard jaar,
meteorieten: 4.5 miljard jaar oud

Lord Kelvin



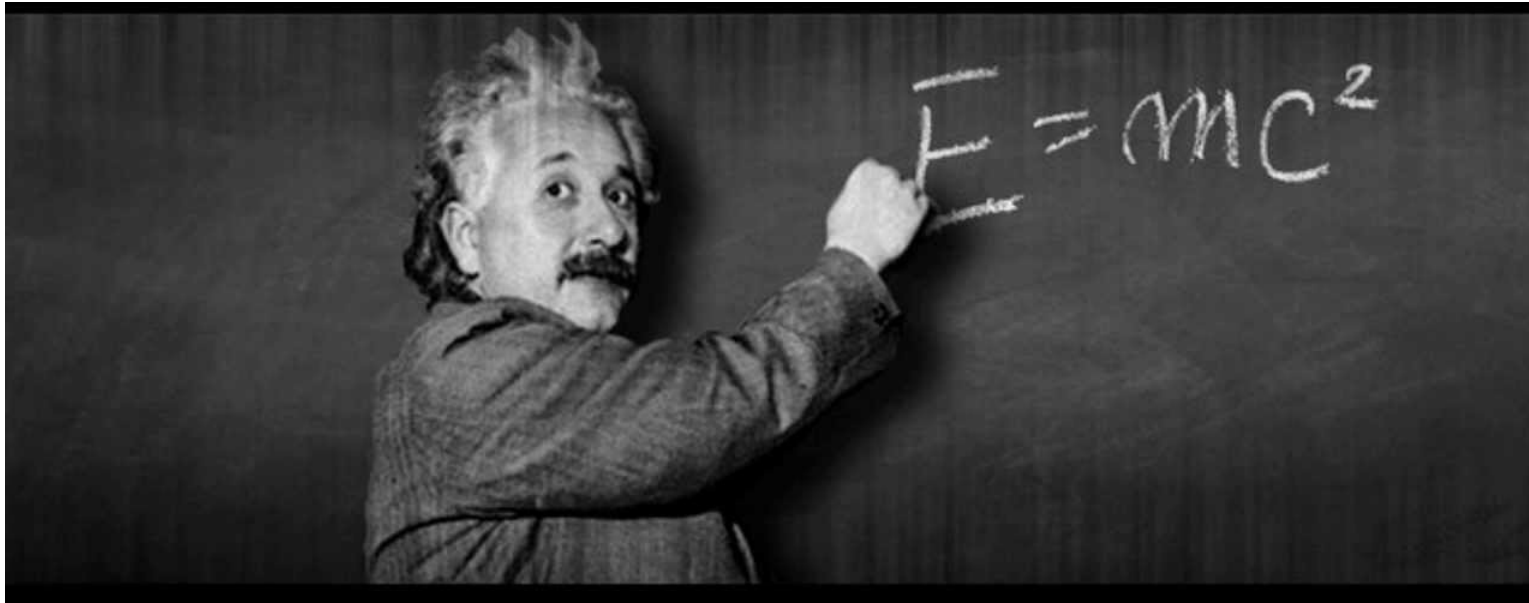
energiebronnen van een ster

- chemische verbranding?
 - verbranding van waterstof levert 1.1×10^8 J/kg
 - massa zon = 1.99×10^{30} kg $\Rightarrow$ totale energie $E < 2.2 \times 10^{38}$ J
 - lichtkracht zon: $L_{\text{zon}} = 3.8 \times 10^{26}$ W
 - maximale levensduur: $E/L_{\text{zon}} = 5.8 \times 10^{11}$ sec = 18000 jaar: veel te kort!
- samentrekking door zwaartekracht?
 - potentiële zwaartekrachtsenergie $E \approx GM^2/R = 3.8 \times 10^{41}$ J
 - maximale levensduur: $E/L_{\text{zon}} = 1.0 \times 10^{15}$ sec = 30 miljoen jaar
 - zou kunnen, dachten Kelvin & Helmholtz
eind 19e eeuw...
 - maar: gesteenten aardkorst > 3 miljard jaar,
meteorieten: 4.5 miljard jaar oud
- er moet een efficiëntere bron zijn: **kernreacties?**

energiewinst uit kernfusie

- er is een **massaverschil** Δm tussen de reagerende atoomkernen en het fusieproduct:

$$E = \Delta m c^2$$



energiewinst uit kernfusie

- er is een **massaverschil** Δm tussen de reagerende atoomkernen en het fusieproduct:

$$E = \Delta m c^2$$

- voorbeeld: reactie $4\ ^1\text{H} \rightarrow\ ^4\text{He}$

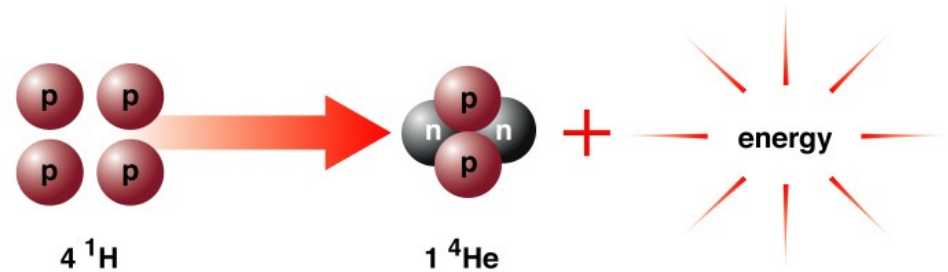
$$m(^1\text{H}) = 1.0078\ m_{\text{u}}$$

$$m(^4\text{He}) = 4.0026\ m_{\text{u}}$$

$$\Delta m = 4 \times 1.0078\ m_{\text{u}} - 4.0026\ m_{\text{u}} = 0.0286\ m_{\text{u}} \quad (m_{\text{u}} = 1.67 \times 10^{-27}\ \text{kg})$$

- energiewinst uit 1 reactie = $4.3 \times 10^{-12}\ \text{J}$ (= 26.7 MeV)

dit is **$6.3 \times 10^{14}\ \text{J/kg}$** (vergelijk met chemische verbranding: $1.1 \times 10^8\ \text{J/kg}$)

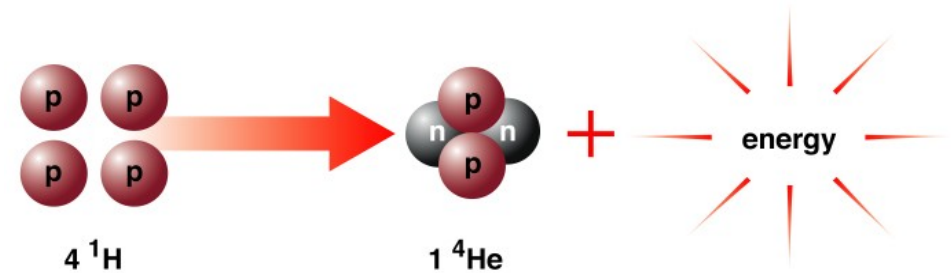


energiewinst uit kernfusie

- er is een **massaverschil** Δm tussen de reagerende atoomkernen en het fusieproduct:

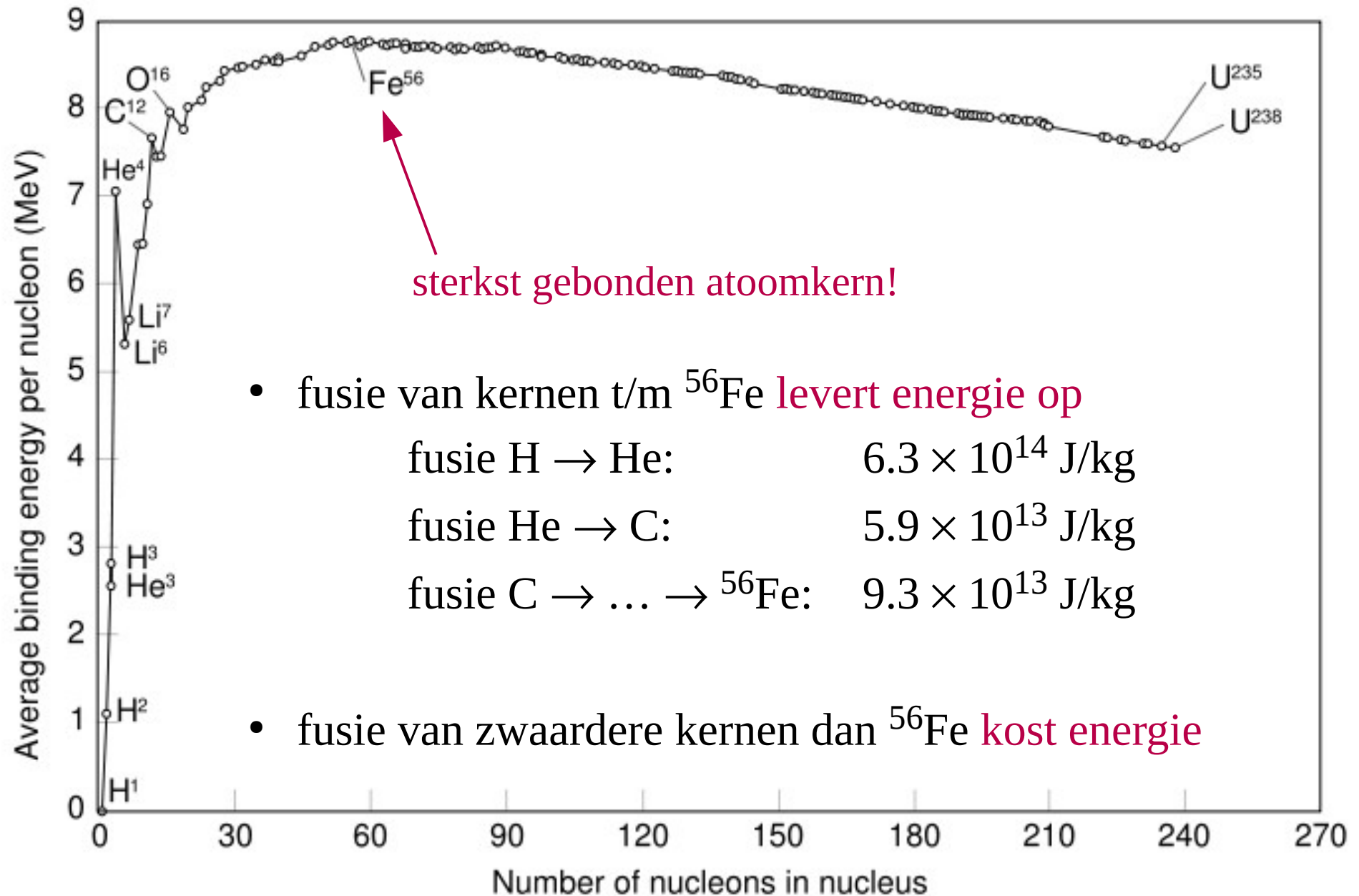
$$E = \Delta m c^2$$

- voorbeeld: reactie $4\ ^1\text{H} \rightarrow\ ^4\text{He}$



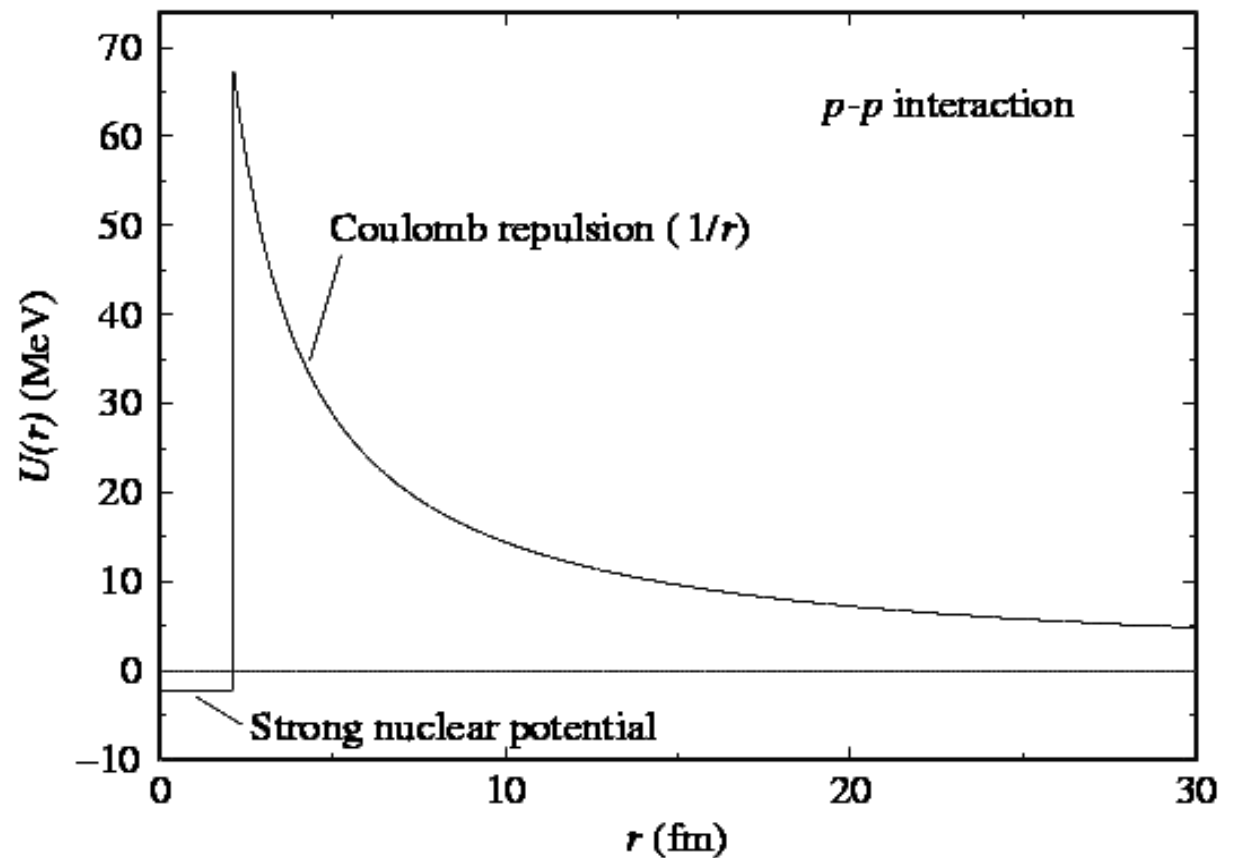
- waterstoffusie levert 6.3×10^{14} J/kg
- hoe lang kan de zon leven?
 - lichtkracht (energieverlies) van de zon = 3.8×10^{26} J/s
 - fusie van 6.0×10^{11} kg (600 miljoen ton) waterstof per seconde!
 - waterstofvoorraad $\approx 10\%$ van de massa = 2.0×10^{29} kg
 - **levensduur waterstoffusie** zon = 3.3×10^{17} sec = **10 miljard jaar**

bindingsenergie atoomkernen



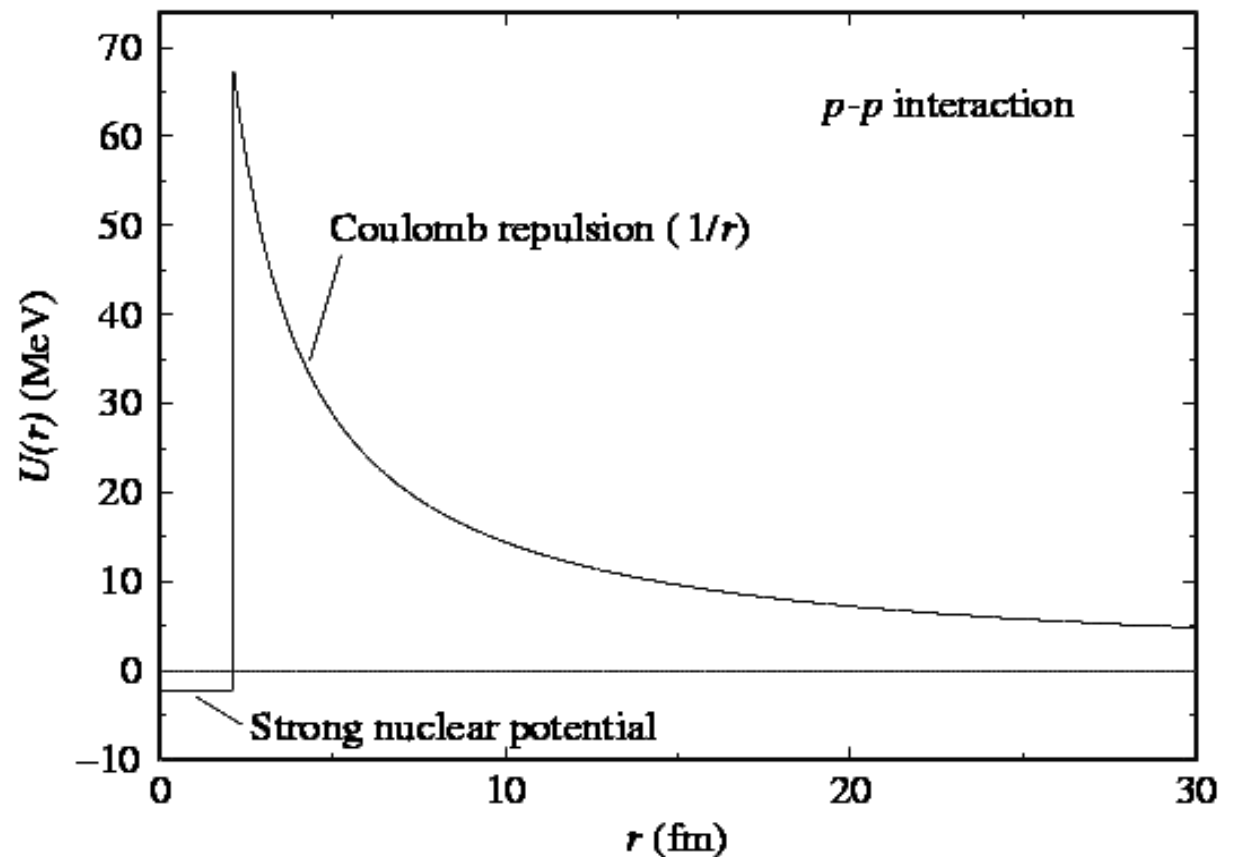
kernfusie-reacties

- atoomkernen bijeengehouden door **sterke kernkracht** tussen protonen en neutronen (bereik: 10^{-15} m)
- op grotere afstand: **afstoting** door positief geladen protonen!



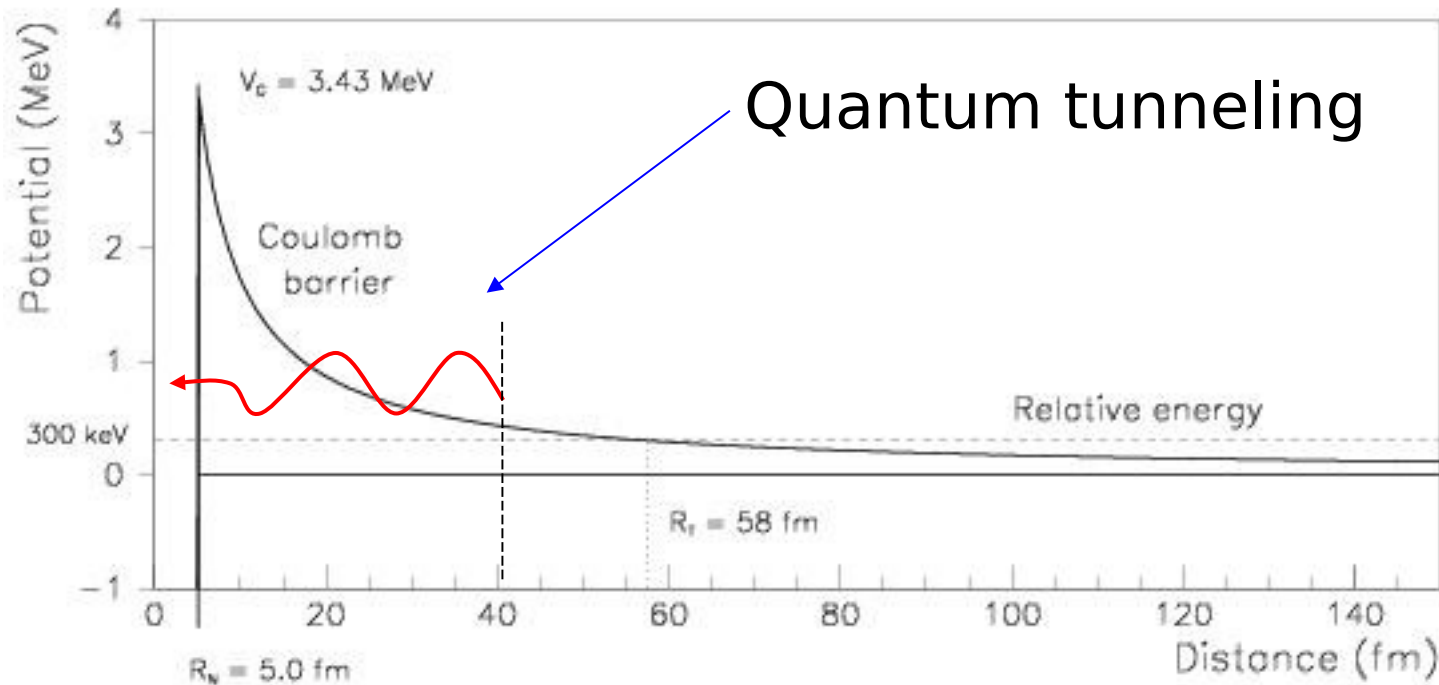
kernfusie-reacties

- atoomkernen bijeengehouden door **sterke kernkracht** tussen protonen en neutronen (bereik: 10^{-15} m)
- op grotere afstand: **afstoting** door positief geladen protonen!
- energie per deeltje $\varepsilon = kT$
- benodigde temperatuur om Coulomb barriere te overwinnen:
 $T \sim 10^{10}$ K!
- maar $T_{\text{c,zon}}$ is maar $\approx 10^7$ K...



oplossing: tunnel-effect

- George Gamov ontdekt **quantum tunnelling** (1928): er is een eindige kans dat een deeltje met lage energie de Columb-barriere doorbreekt
- bij $T \approx 10^7$ K hebben H-kernen dan voldoende energie om fusie op gang te brengen...



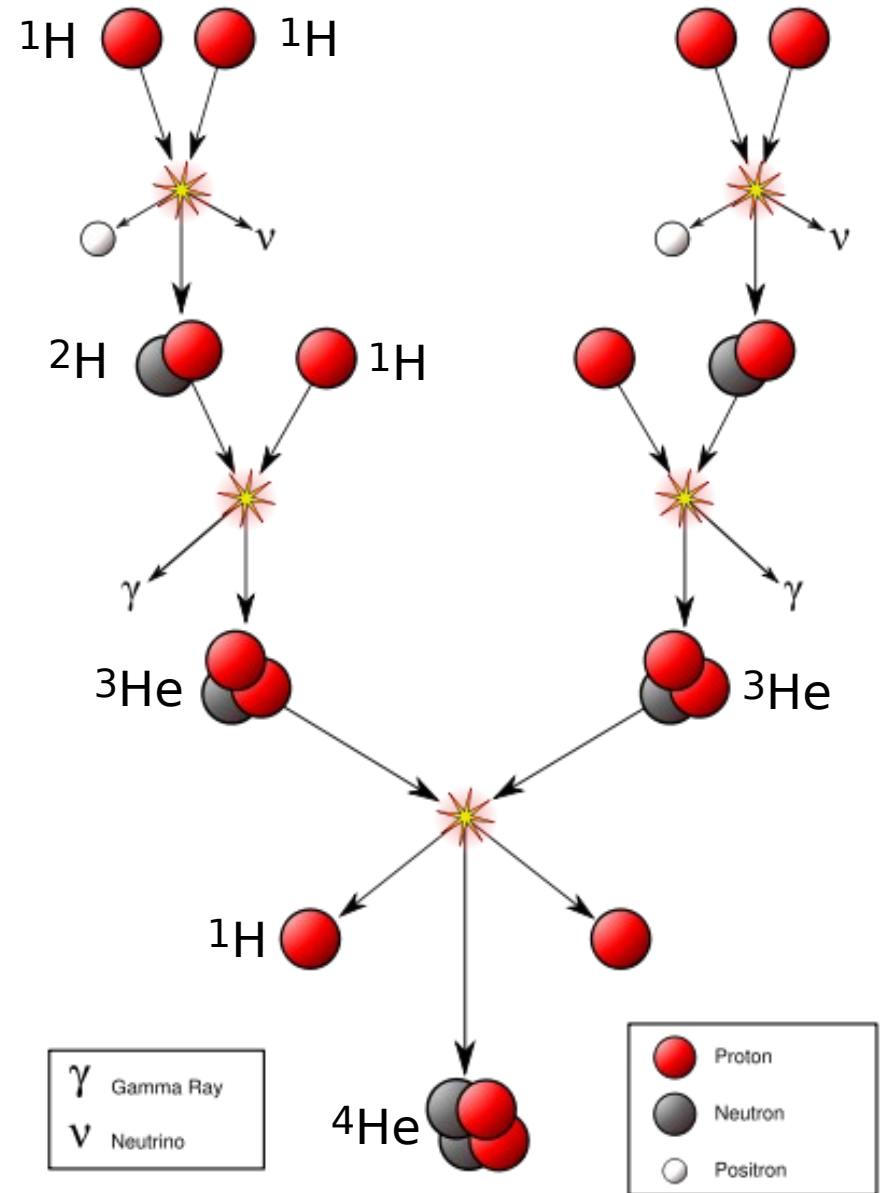
fusie van waterstof in de zon

- *stap 1*: fusie van 2 protonen tot ${}^2\text{H}$ (deuterium)

(gepaard met $p \rightarrow n + e^+ + \nu$,
het **neutrino** ontsnapt!)

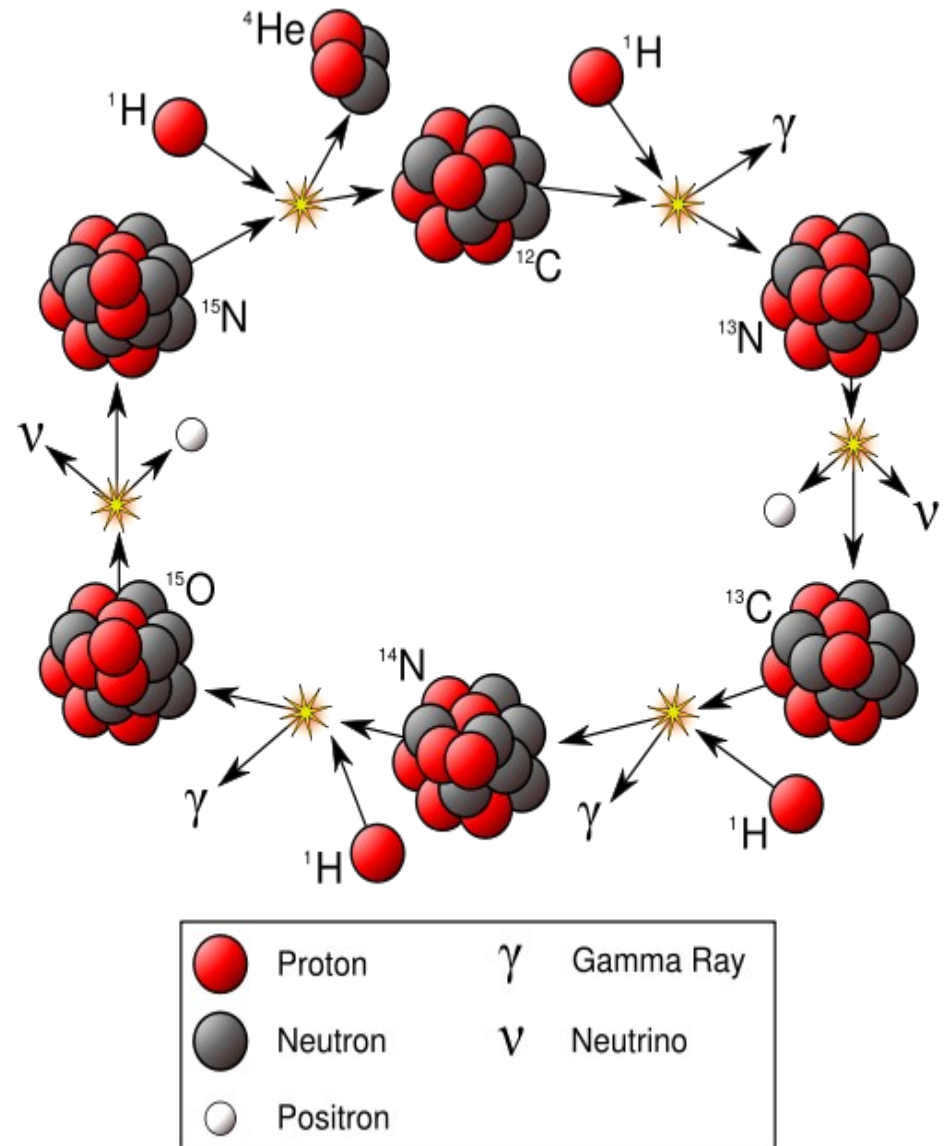
dit is de *langzaamste* stap

- *stap 2*: fusie van ${}^2\text{H} + \text{proton}$ tot ${}^3\text{He}$
- *stap 3*: fusie van 2 ${}^3\text{He}$ -kernen tot ${}^4\text{He} + 2$ protonen
- netto: $4 {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}$
- eerste stap is de langzaamste $\Rightarrow$ bepaalt de reactiesnelheid



waterstof-fusie in zwaardere sterren

- de **CNO-cyclus**:
- reeds aanwezig C dient als **katalysator** voor de netto-reactie $4\ ^1\text{H} \rightarrow\ ^4\text{He}$



de levenscyclus van sterren

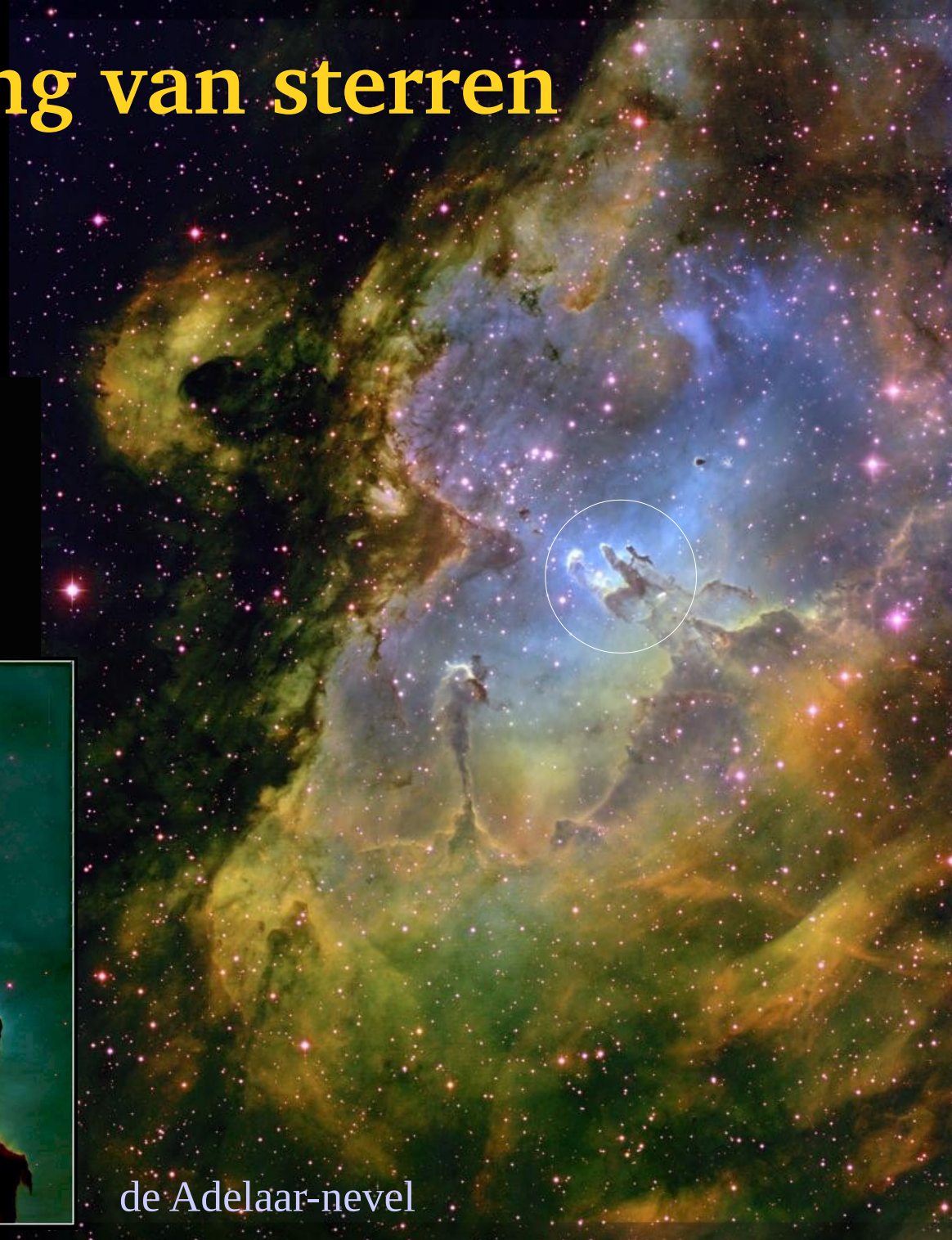
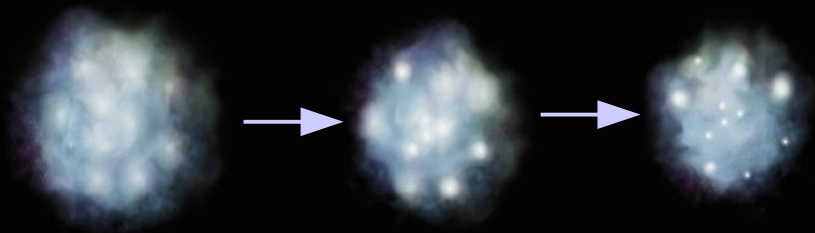
- sterren worden gevormd in grote “moleculaire” wolken van **koud gas en stof** in melkwegstelsels

stervormingsgebied M17 (Zwaan nevel)



de vorming van sterren

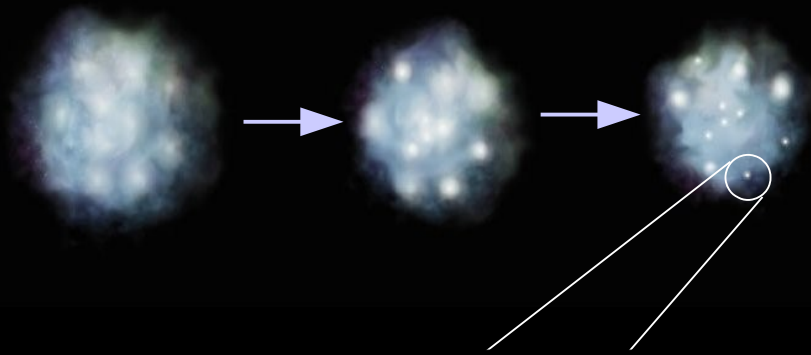
- **zwaartekracht** doet een grote gaswolk samentrekken en uiteenvallen



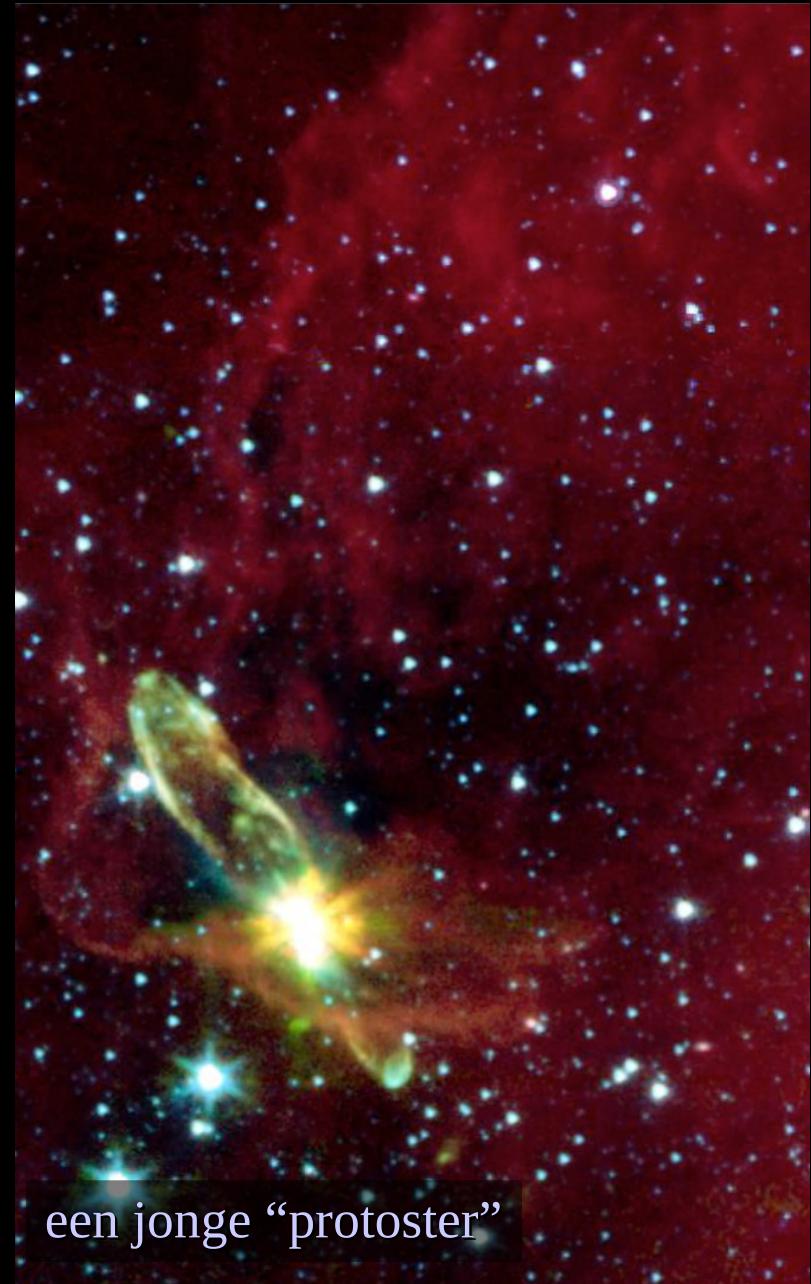
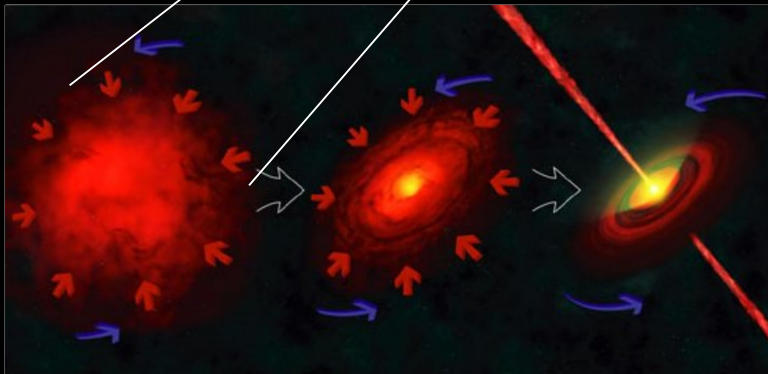
de Adelaar-nevel

de vorming van sterren

- **zwaartekracht** doet een grote gaswolk samentrekken en uiteenvallen



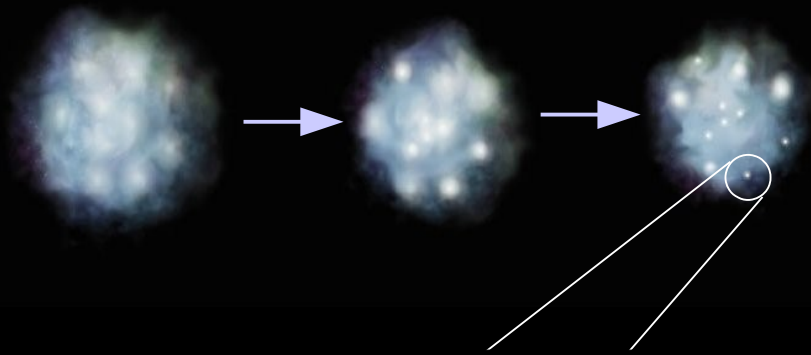
- uit elk **fragment** vormt zich (door verdere samentrekking) **een ster**



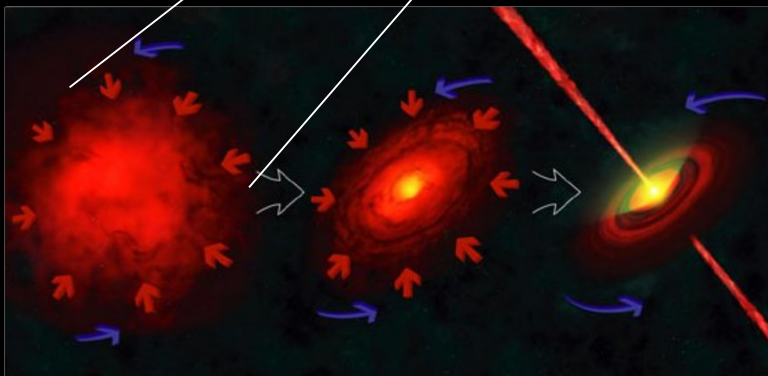
een jonge “protoster”

de vorming van sterren

- **zwaartekracht** doet een grote gaswolk samentrekken en uiteenvallen



- uit elk **fragment** vormt zich (door verdere samentrekking) **een ster**



- de temperatuur in deze **protosterren** is nog niet hoog genoeg voor kernfusie
- de uitgestraalde energie komt uit samentrekking door de zwaartekracht...



een jonge “protoster”

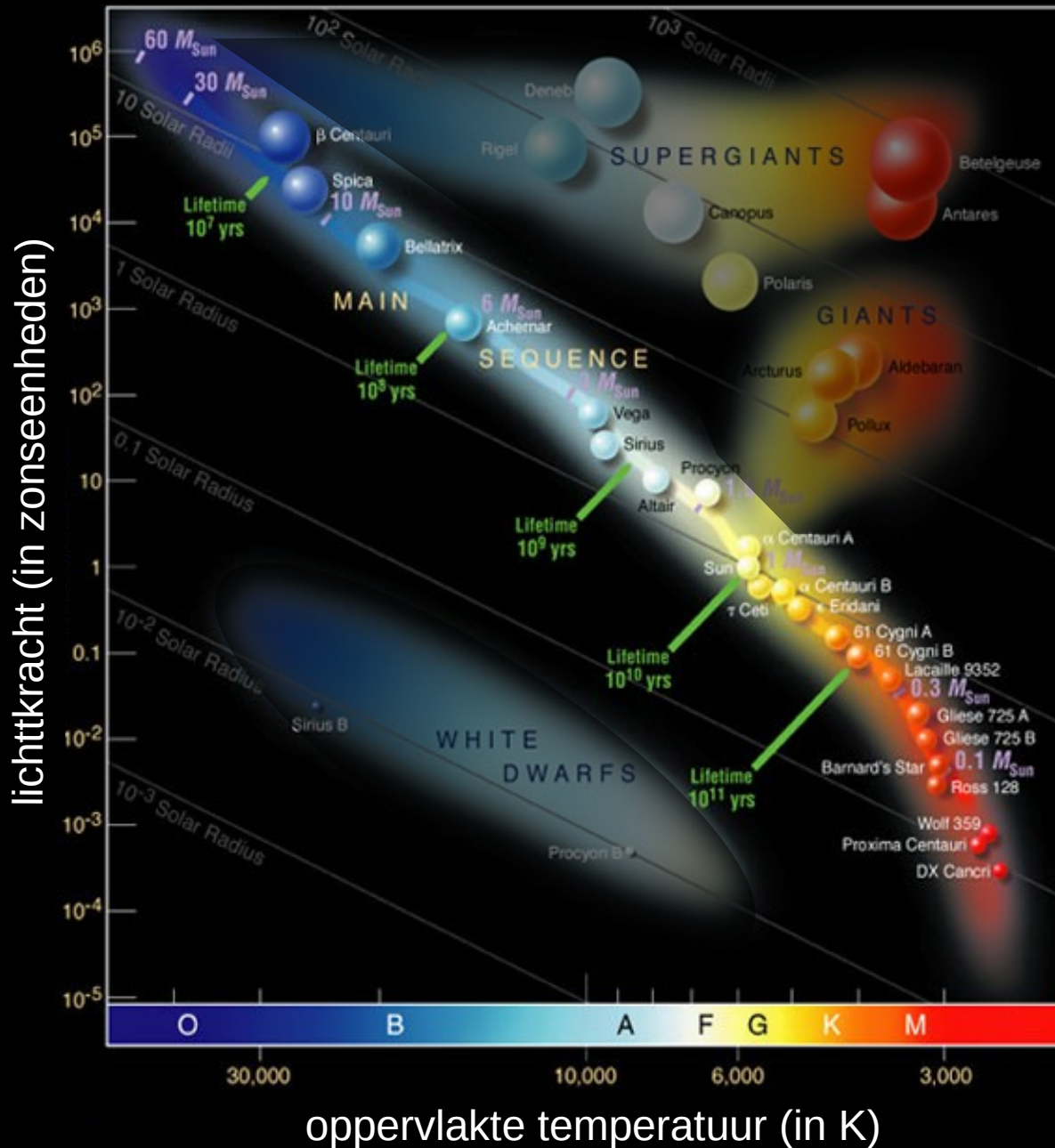
de vorming van sterren

resultaat:

- sterren worden gevormd met **verschillende massa's** ($0.1-100 \times M_{\text{zon}}$)
- lichte sterren zijn veel talrijker dan zware
- de meeste sterren worden geboren in grote groepen: **sterhopen** of **clusters**

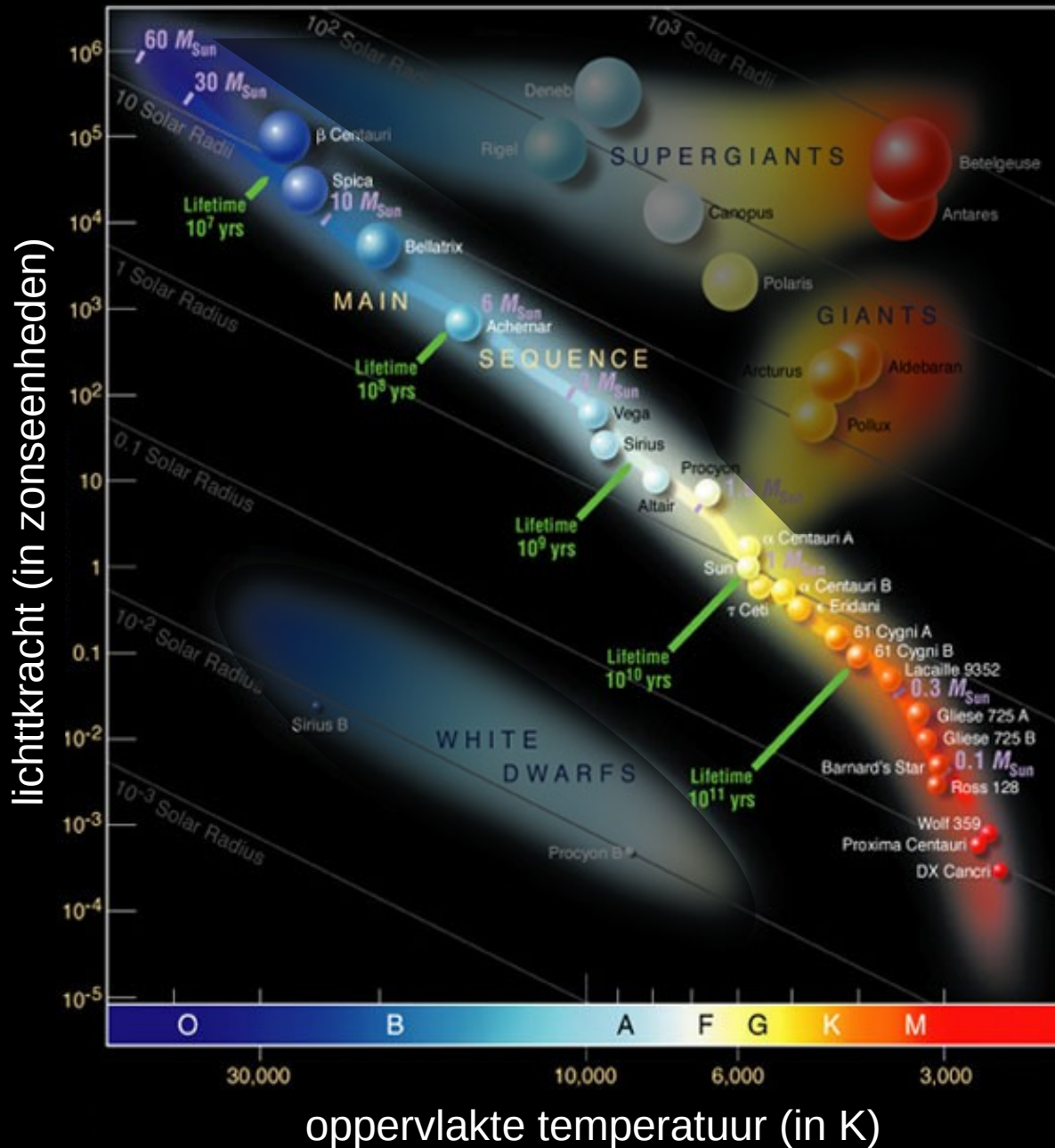


de hoofdreeks fase



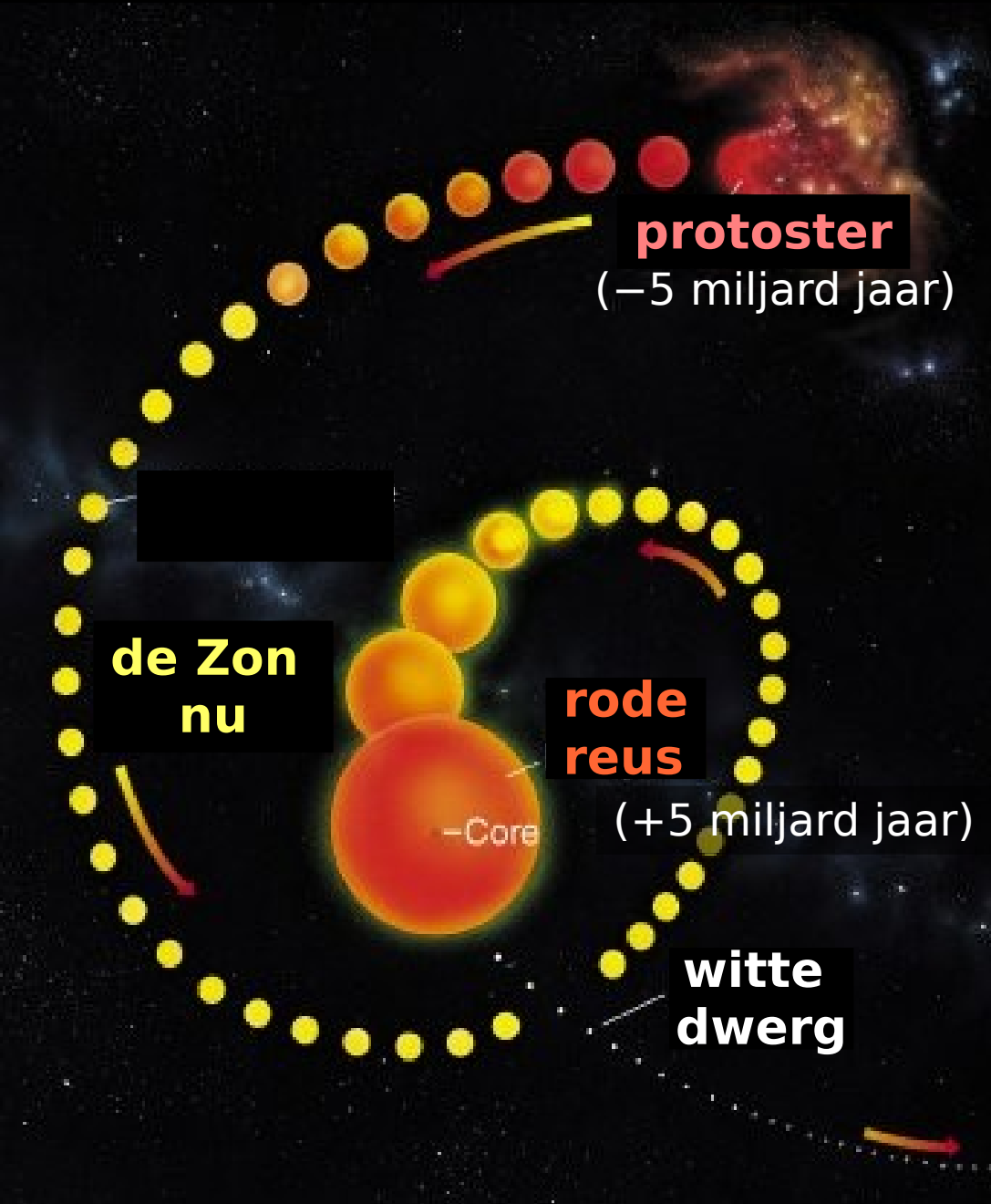
- vedere samentrekking: temperatuur wordt hoog genoeg voor **fusie van waterstof**
- ster bevindt zich nu op de **hoofdreeks**
- ster is in **evenwicht**: opgewekte energie = uitgestraalde energie, zolang H-voorraad strekt
- een ster is een **stabiele kernfusie-reactor** (niet explosief)

de hoofdreeks fase



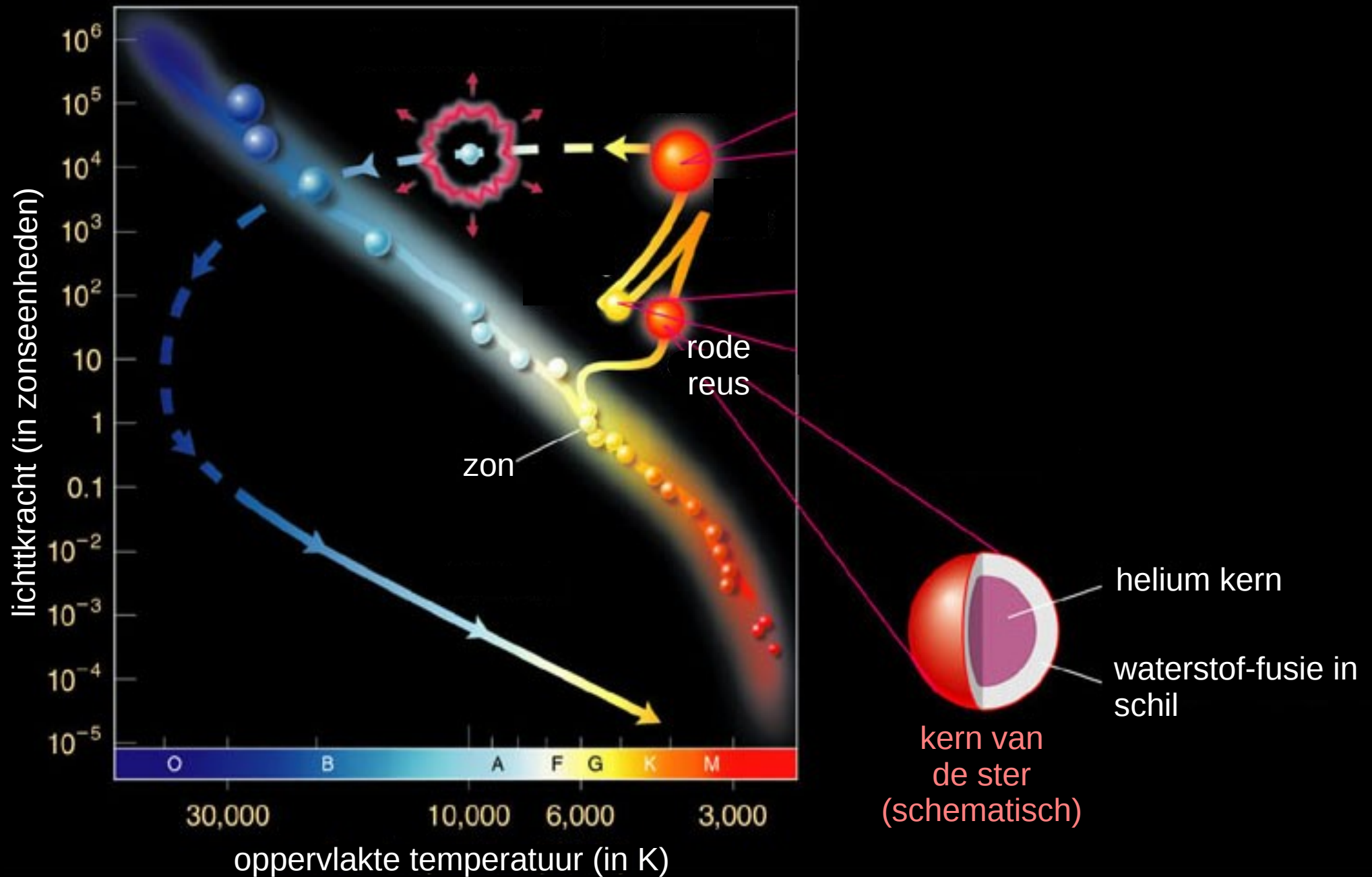
- hoe groter de **massa**, hoe hoger de **lichtkracht**
(bv. een ster van $10 M_{\text{zon}}$ heeft $L \approx 10,000 L_{\text{zon}}$!)
- **levensduur** op hoofdreeks = $H\text{-voorraad}/\text{lichtkracht} \propto M/L$
- levensduur neemt sterk af met toenemende massa:
 - zon: 10 miljard jaar
 - zwaarste sterren: 3 miljoen jaar

evolutie na de hoofdreeks



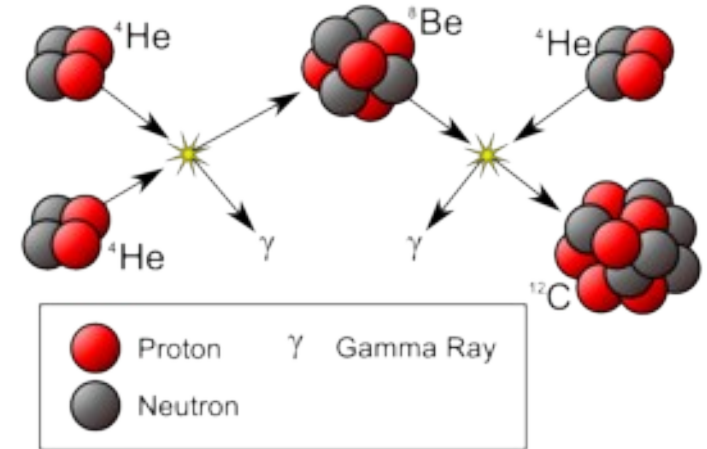
- als H-voorraad in centrum opgebruikt is:
 - binnenste **kern** van ster **krimpt** (zwaartekracht) en wordt **heter**
 - H-fusie in een schil rond de He-kern
 - buitenlagen zetten uit en worden convectief $\Rightarrow$ **rode reus**

evolutie van een ster als de zon



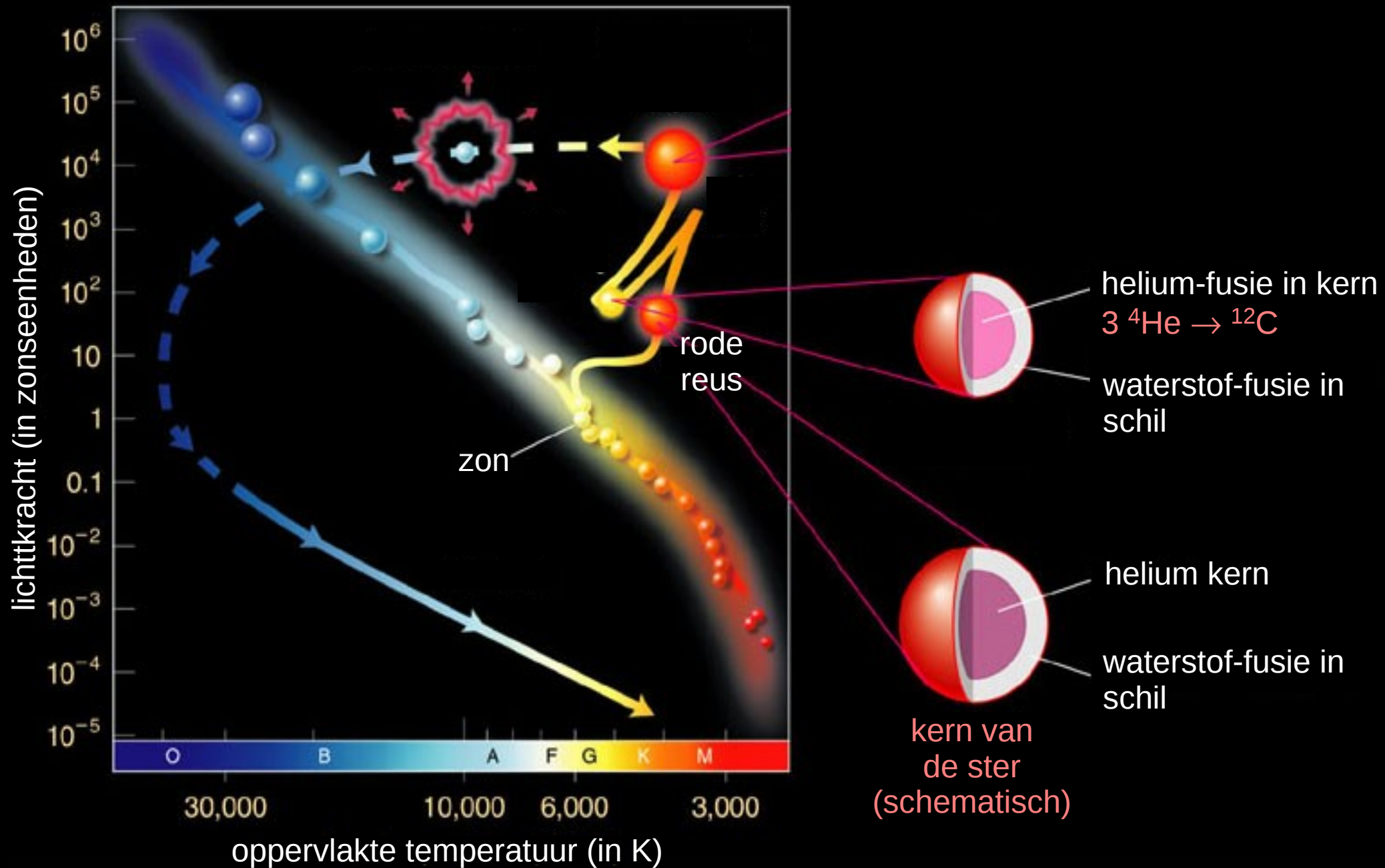
helium-fusie

- wanneer $T_c = 10^8 \text{ K} \Rightarrow$ kernfusie van helium in centrum ster
 - fusie van 2 ^4He -kernen tot ^8Be : zeer onstabiel!
 - onmiddellijke fusie met een derde ^4He -kern tot ^{12}C is nodig om de reactie te stabiliseren

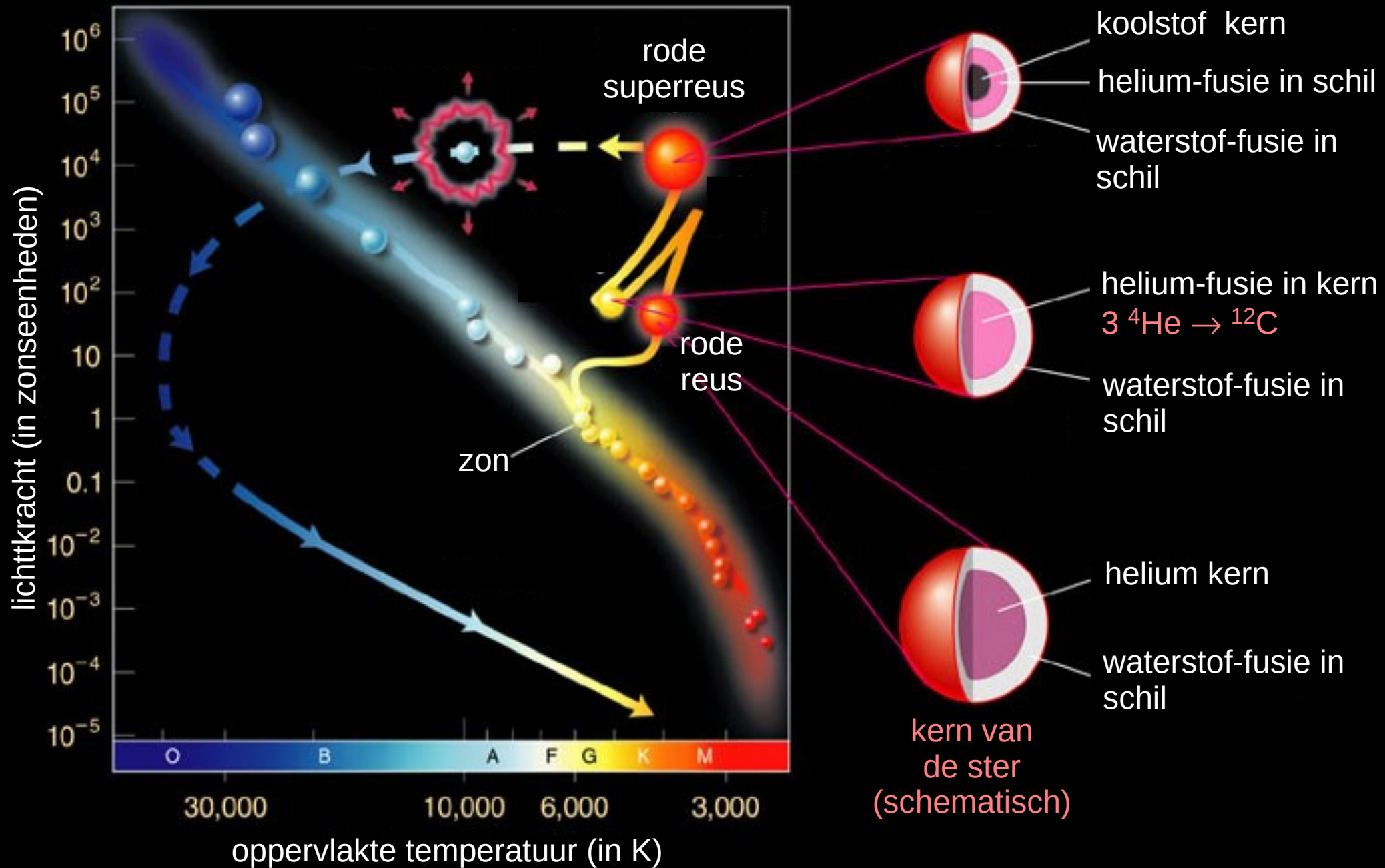


- helium-fusie $\Rightarrow$ ster opnieuw in evenwicht als rode reus (krimpen kern & uitzetting ster stopt)
- levensduur He-fusie $\approx 0.1 \times$ levensduur hoofdreeks (waarom?)

evolutie van een ster als de zon

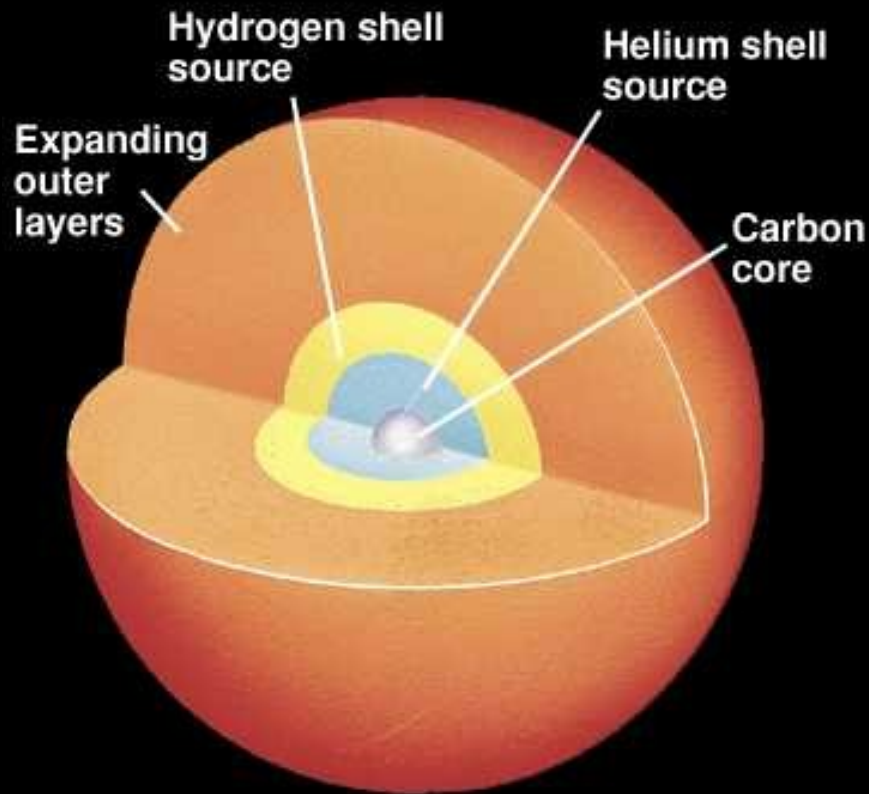


evolutie van een ster als de zon



eindstadium van ster als de zon

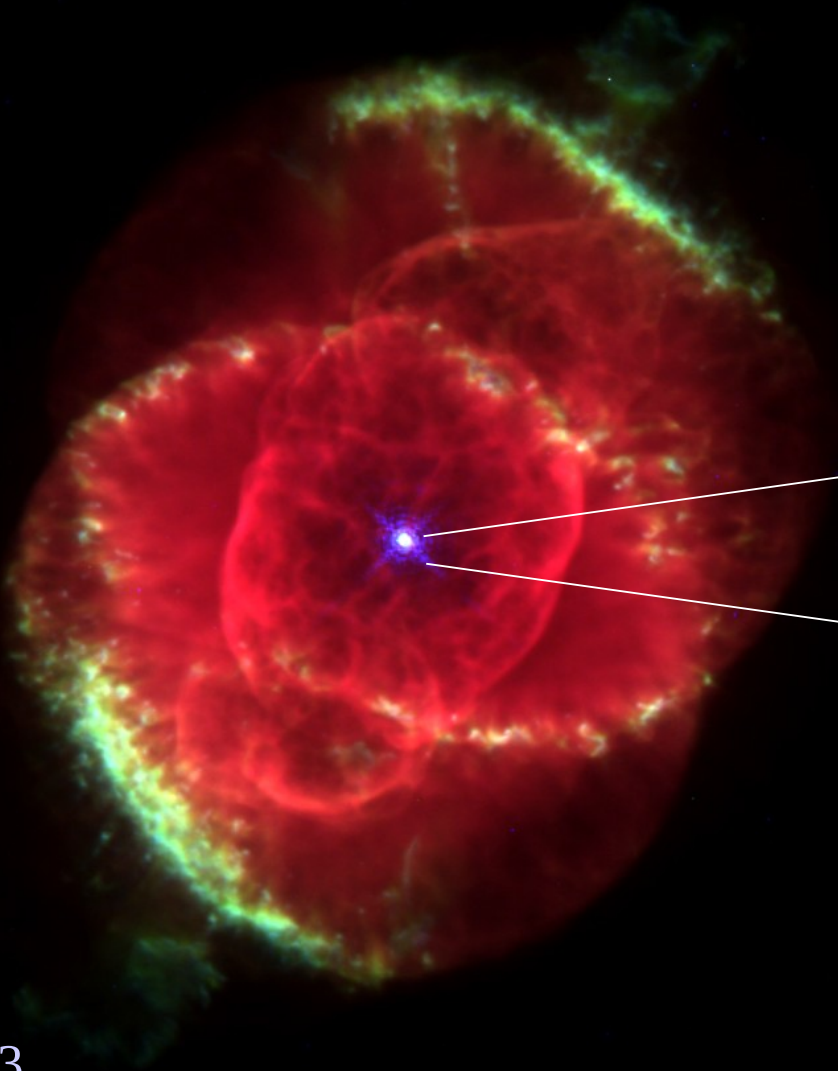
rode superreus



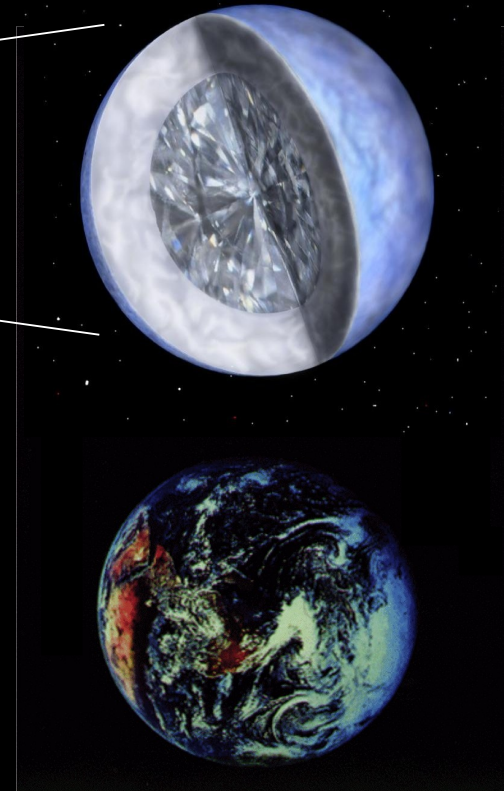
- zeer compacte sterkern (ca $0.6 M_{\text{zon}}$)
bestaande uit C + O
- H- en He-fusie in schillen rond sterkern
- buitenlagen zijn zeer sterk uitgezet ($200 - 1000 R_{\text{zon}}$)
 - zwak gebonden door zwaartekracht
 - regelmatige pulsaties
 - gas uit mantel langzaam weggeblazen: “sterrewind”

eindstadium van ster als de zon

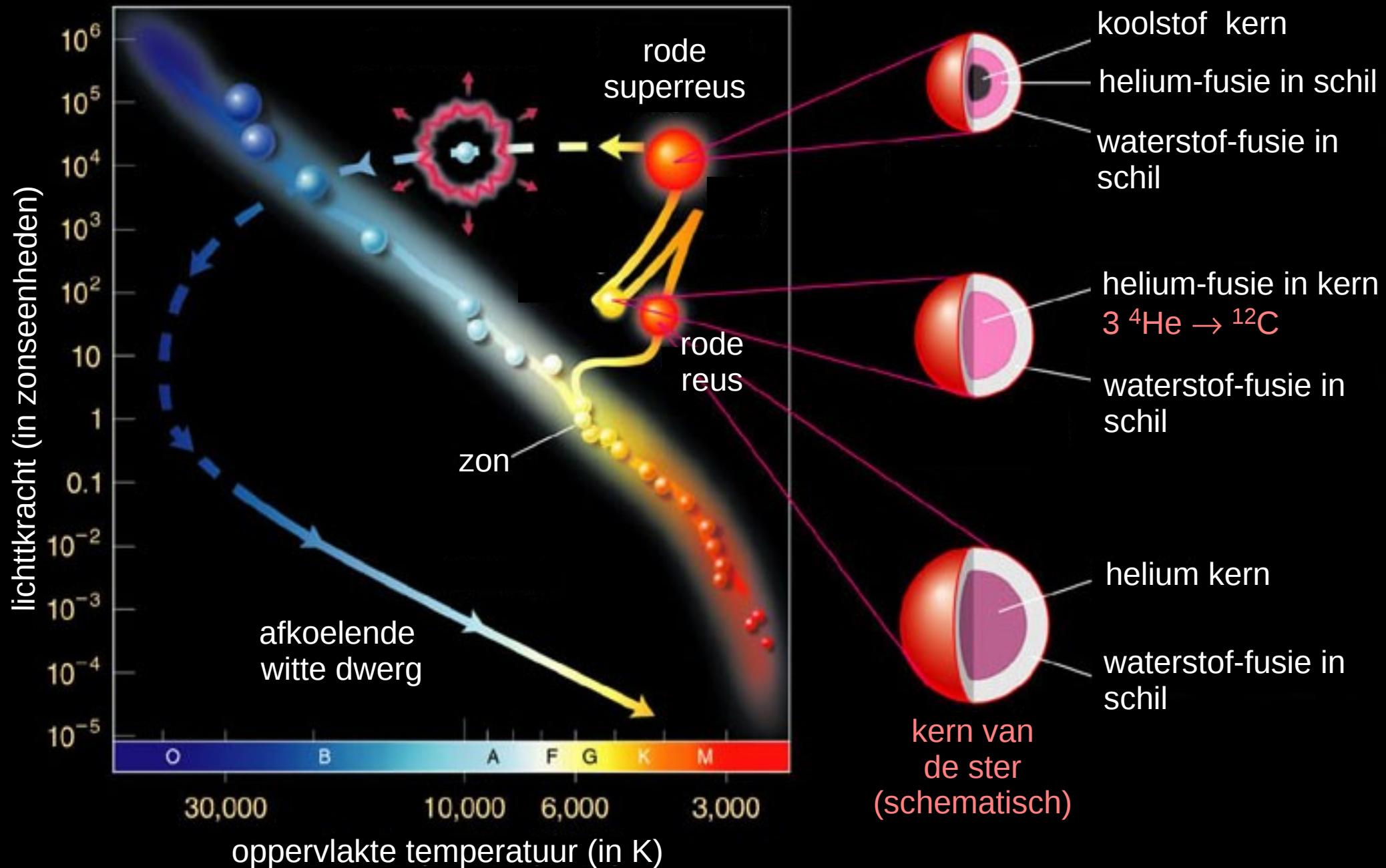
- weggestoten buitenlagen enige tijd zichtbaar als **planetaire nevel**
- sterker kern wordt **witte dwerg**
($R \approx R_{\text{aarde}} \approx 0.01 R_{\text{zon}}$)



NGC 6543
“Cat's Eye Nebula”



evolutie van een ster als de zon



lichte sterren en zware sterren

- **lichte sterren:** massa $M < 8 M_{\text{zon}}$
 - evolutie verloopt als die van de zon
 - lange levensduur: 50 miljoen – 15 miljard jaar
 - na H- en He-fusie geen verdere kernfusie
 - sterkern (C + O) wordt langzaam koelende **witte dwerg** ($0.6 - 1.2 M_{\text{zon}}$)
- **zware sterren:** massa $M > 8 M_{\text{zon}}$
 - veel helderder $\Rightarrow$ veel kortere levensduur (3 – 50 miljoen jaar)
 - temperatuur in sterkern blijft verder stijgen $\Rightarrow$ **kernfusie gaat verder...**

verdere kernfusie in zware sterren

- $T_c = 6 \times 10^8$ K: fusie van **koolstof**



(met wat $^{20}\text{Ne} + ^{23}\text{Na}$)

- duur: ca. 1000 jaar
- snel gevolgd door $^{20}\text{Ne} \rightarrow ^{16}\text{O} + ^4\text{He}$

- $T_c = 2 \times 10^9$ K: fusie van **zuurstof**

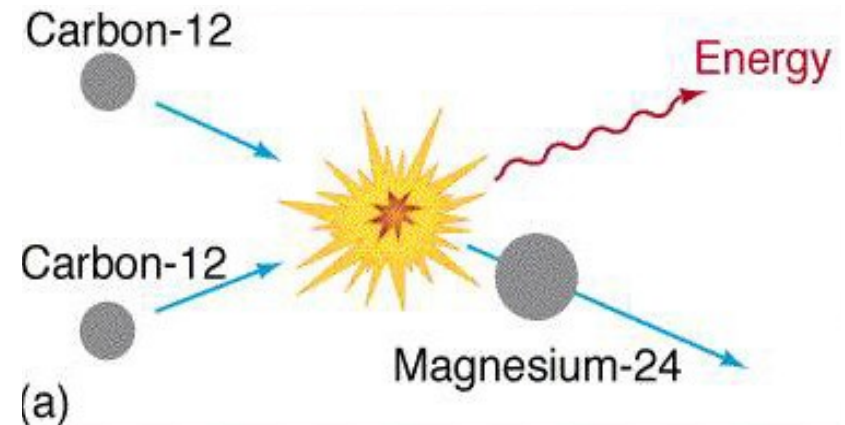


- duur: ca. 1 jaar

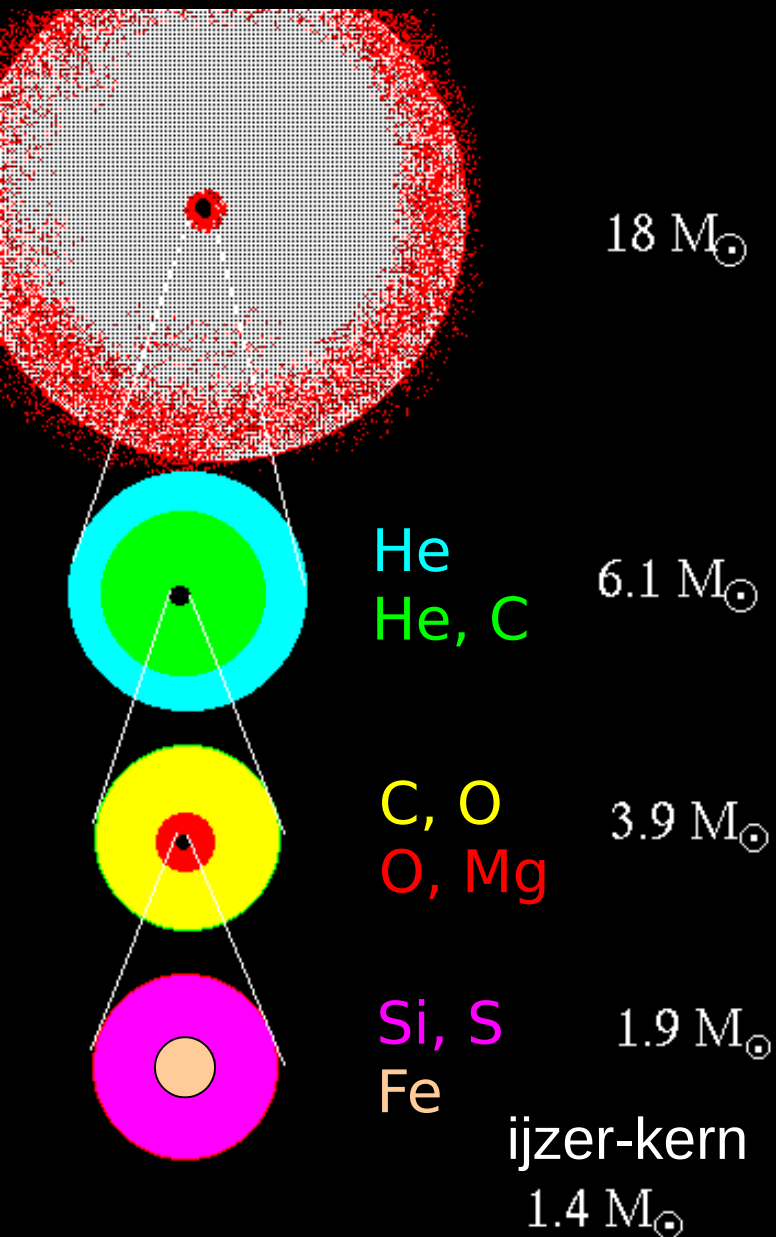
- $T_c = 3 \times 10^9$ K: fusie van **silicium**



- duur: ca. 1 dag!



eindstadium van zware sterren



- opeenvolgende fusie leidt tot een **uenschil** structuur
- uiteindelijk bestaat de binnenste kern geheel uit **ijzer** (^{56}Fe) $\Rightarrow$ geen verdere energiewinst mogelijk
- de **ijzerkern stort ineen** door zwaartekracht (massa $> 1.4 M_{\text{zon}}$) $\Rightarrow$ neutronenster of zwart gat
- vrijkomende energie drijft mantel weg in een **supernova explosie**

samenvatting

- de **zwaartekracht** veroorzaakt het samentrekken van gaswolken en de vorming van sterren
- sterren stralen en verliezen dus energie, dit wordt gecompenseerd door
 - of: verdere **samentrekking** door de zwaartekracht
 - of: **kernfusie**, een energiebron waarop sterren vele miljoenen tot miljarden jaren kunnen “leven”
- **lichte sterren** (< 8 zonsmassa's) leven lang, en vormen aan het eind van hun leven ($\text{fusie } \text{H} \rightarrow \text{He} \rightarrow \text{C} + \text{O}$) een compacte kern, waarin de electronen gedegenereerd raken: een **witte dwerg**
- **zware sterren** (> 8 zonsmassa's) leven relatief kort, en vormen door verdere fusie ($\text{C} + \text{O} \rightarrow \dots \text{Fe}$) een zeer compacte kern, die door de zwaartekracht ineenstort tot een **neutronenster**
 - de vrijkomende zwaartekrachtsenergie veroorzaakt een krachtige **supernova explosie**
- de **zwaarste sterren** ($> \text{ca } 30$ zonsmassa's) storten ineen tot een **zwart gat**