

Ontstaan van Elementen

Henny J.G.L.M. Lamers

Sterrenkundig Instituut, Univ van Amsterdam

h.j.g.l.m.lamers@uu.nl

www.hennylamers.nl



Rob Walrecht cursus, 10 April 2019
“Verdiep je verder in het Heelal”

Element vorming bij de oerknal:

ongeveer na 3 minuten als $T = 10^9 \text{ K}$

Aantal		Massa	Gewichts %
H	100	1	$100/132 = 76 \%$
He	8	4	$32/132 = 24 \%$
D	0.002	2	$0.004/132 = 0.003 \%$
Rest	$< 10^{-6}$		$< 10^{-8}$

Samenstelling van de gaswolken = oppervlakte samenstelling van bijna alle sterren in ons melkwegstelsel

afgeleid uit spectrum

Waterstof (H) 70 %

Helium (He) 28 %

Zuurstof (O) 1 %

Koolstof (C) 0.4 %

Stikstof (N) 0.1 %

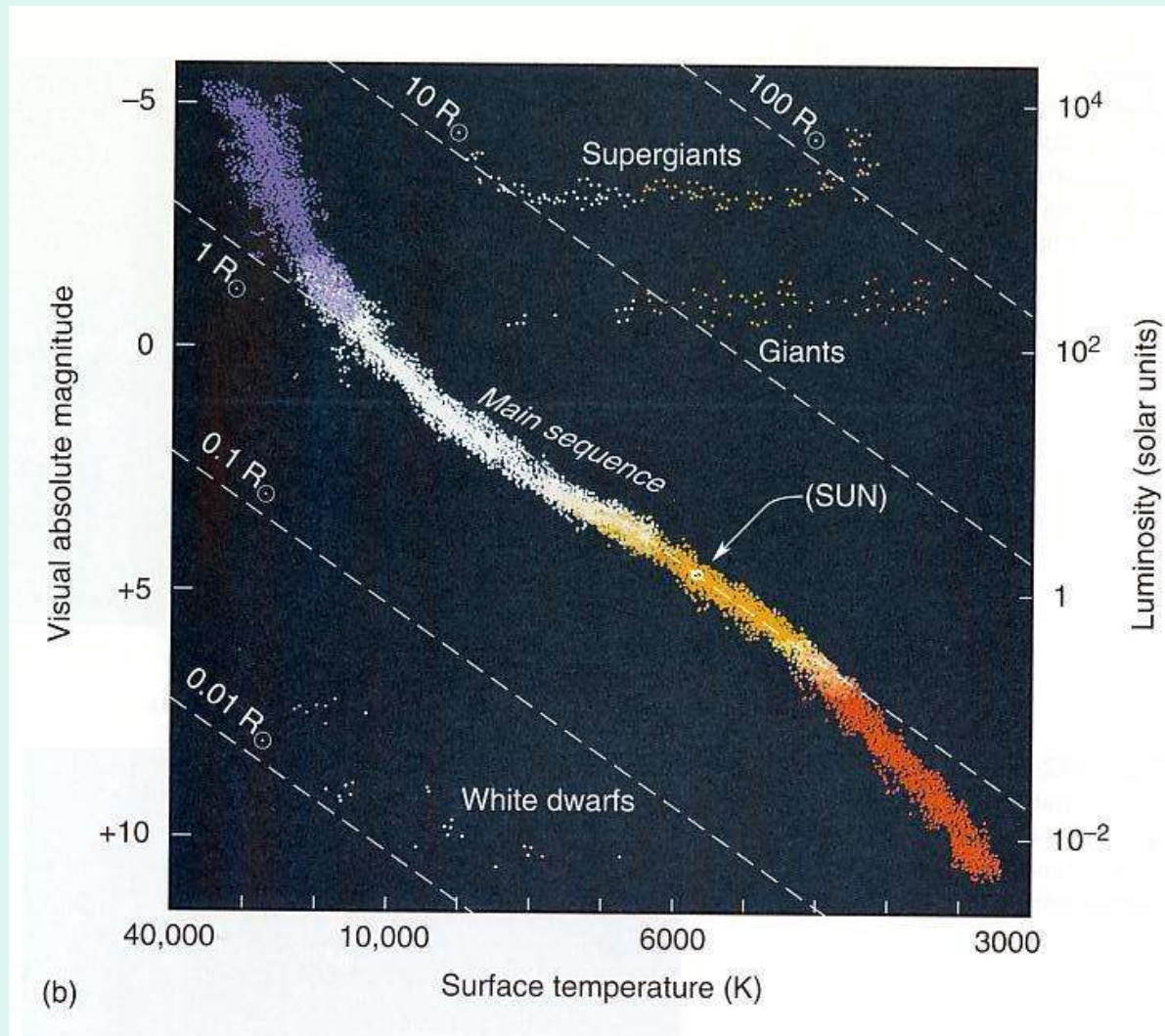
Rest 0.5 %

Dus: chemische samenstelling is veranderd sinds de oerknal !!!

Kern fusie in sterren

Het Hertzsprung-Russell diagram

L= helderheid tegen T =oppervlakte Temp



90% van sterren
zitten op de
Hoofdreeks !

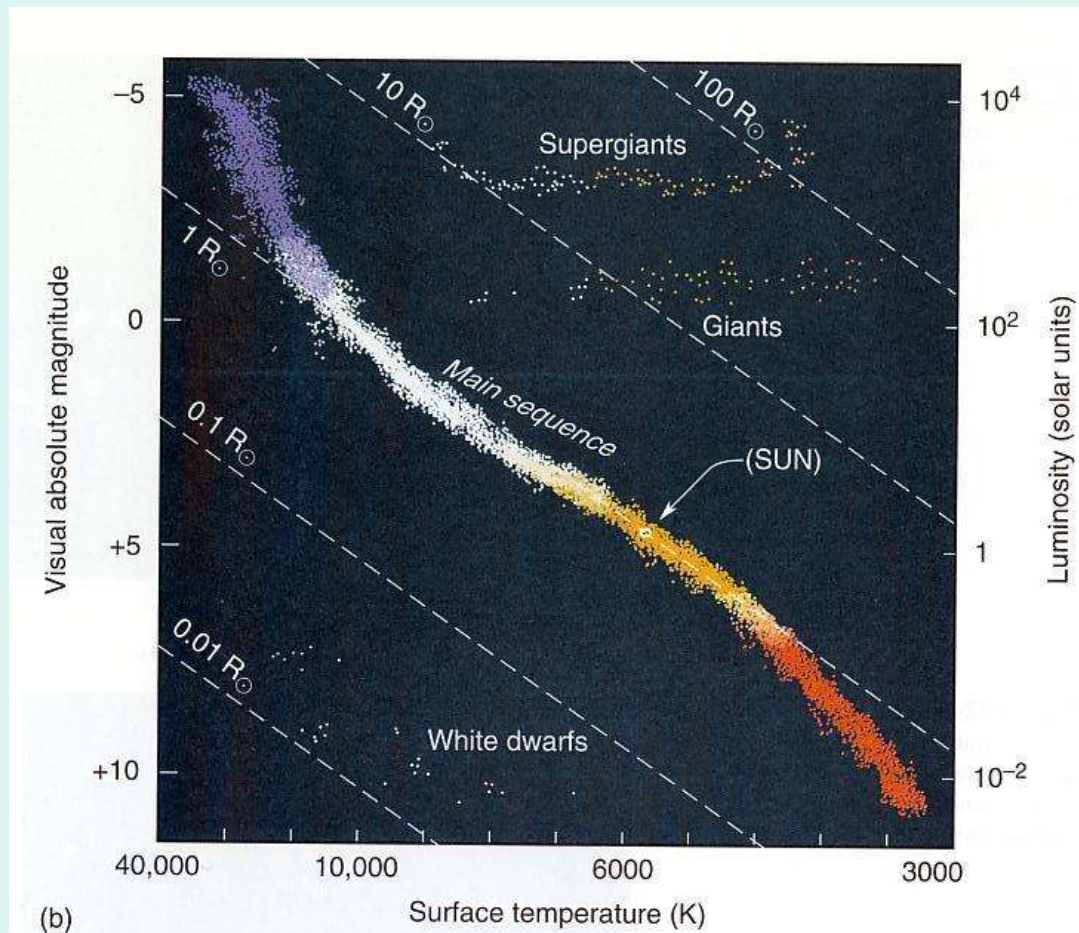
Hoofdreeks

Rechtsonder Linksboven

Teff (K)	3000	50 000
R (Rzon)	0.3	30
L (Lzon)	10^{-2}	10^5
M (Mzon)	0.1	120

Verder: Rode reuzen, Superreuzen, Witte dwergen

Het Hertzsprung-Russell diagram speelt een cruciale rol bij begrijpen van ster-evolutie



Hoofdreeks

Rechtsonder Linksboven

Teff (K)	3000	50 000
R (Rzon)	0.3	30
L (Lzon)	10^{-2}	10^5
M (Mzon)	0.1	120

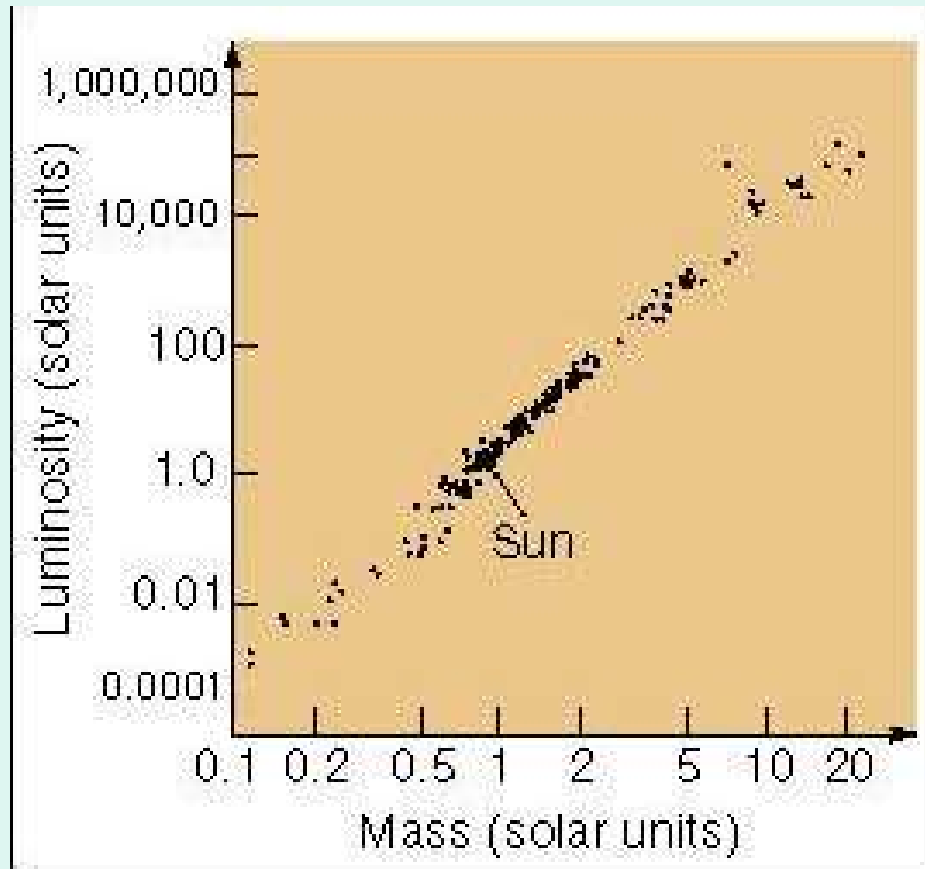
Rode reuzen

Superreuzen

Witte dwergen

1. De ster evolutie theorie moet locatie en aantallen in HRD kunnen verklaren !
2. Evolutie kan worden beschreven als “beweging” door HRD

Massa-Lichtkacht relatie voor hoofdreeks sterren ! $L \sim M^{3.5}$



Voor hoofdreeks
sterren is er een heel
nauwe relatie tussen

Massa $\leftrightarrow$

Lichtkracht $\leftrightarrow$

Temperatuur !!

Dus:

Massa bepaalt L , T

en dus ook R !

Ook dit moet de theorie van ster evolutie kunnen verklaren.

De structuur van sterren

Neem een ster van gegeven massa M
en gegeven chemische samenstelling

Vraag: wat bepaalt nu eigenlijk

- energie productie en dus L_*
- temperatuur structuur en dus T_c en $T_{opp} = T_*$
- dichtheid structuur en dus R_*

1. Het evenwicht van sterren

Sterren leven heel lang en zijn (bijna altijd) in evenwicht

1. Druk evenwicht: (lagen niet krimpen of uitzetten)

elke laag “voelt” het gewicht van de lagen daarboven.

dus de druk moet naar binnen toenemen,

dus zowel dichtheid als temperatuur nemen naar binnen toe.

1. Het evenwicht van sterren

Sterren leven heel lang en zijn (bijna altijd) in evenwicht

1. Hydrostatisch (druk) evenwicht: (lagen niet uitzetten of krimpen)

elke laag (r) “voelt” het gewicht van de lagen daarboven.

dus de druk moet naar binnen toenemen,

dus zowel dichtheid als temperatuur nemen naar binnen toe.

2. Energie evenwicht : (lagen niet afkoelen of opwarmen):

er moet per sec evenveel energie worden opgewerkt als uitgestraald.

elke lag moet precies de energie die van binnen komt doorgeven!

vanuit het centrum komt die energie door kernfusie

2.. Energie productie in sterren

meestal kernfusie maar als fusie fase stopt,
dan door contractie

1. Kernfusie

- Hangt af van reacties, d.w.z. van samenstelling
bijv: $H \rightarrow He$, of $He \rightarrow C$ enz
- zeer sterk afhankelijk van T
bijv: H fusie $\sim T^4$, He fusie $\sim T^{30}$

2. Contractie

- bij krimpen komt potentiële energie vrij
- die wordt omgezet in warmte en in de vorm van fotonen uitgestraald.

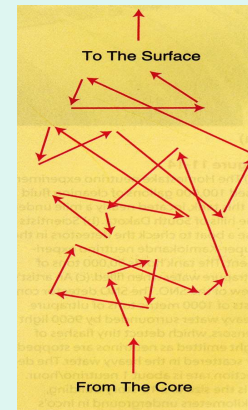
3. Energie transport in sterren

Energie transport kan op twee manieren:

1. Door straling:

fotonen worden geabsorbeerd en weer geëmitteerd en bereiken via “random walk” de buitenrand.

Dit vereist een specifieke T-struktuur !!



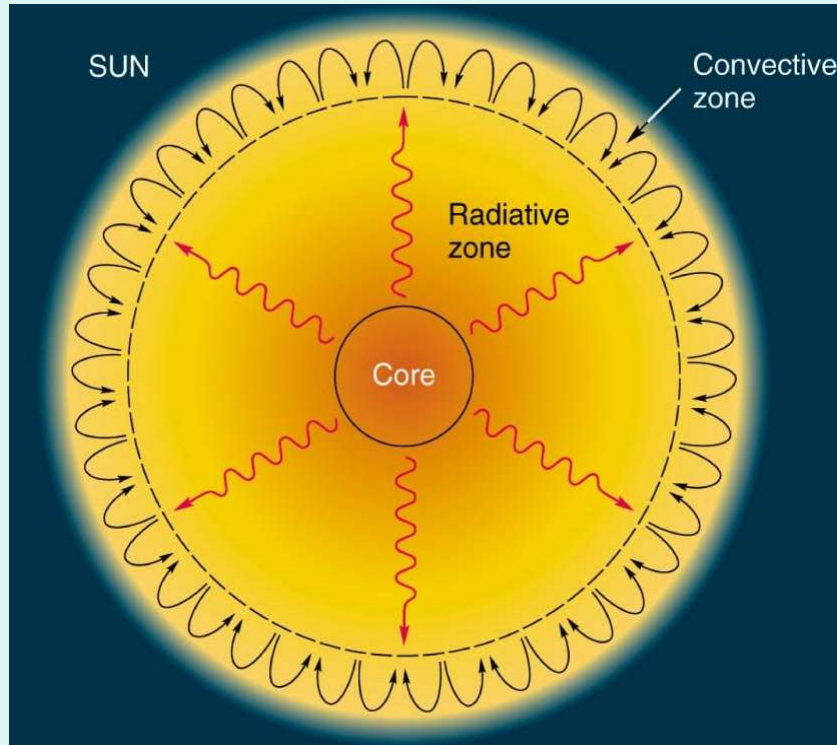
2. Door convectie:

als het gas moeilijk straling doorlaat, dan wordt het gas “convectief:” energie transport door hete opstijgende en koele dalende gasbellen.

Ook dat vereist een specifieke T-struktuur !!

De temperatuur struktuur in een ster wordt bepaald door de eis dat de opgewekte energie naar buiten wordt getransporteerd.

Energie transport in de Zon



Kern:

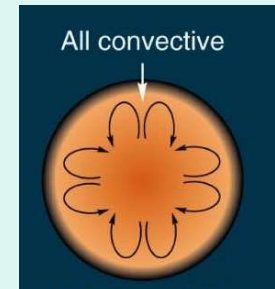
Energie opwekking
door fusie

Binnenlagen:

energie transport door
straling

Buitenlaag :

Energie transport
door convectieve
stromingen.

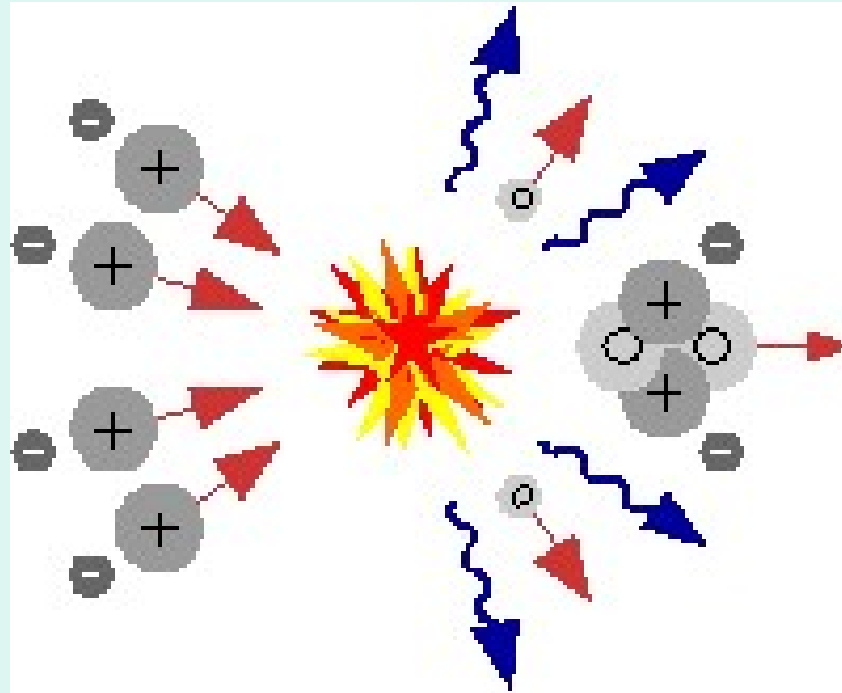


Maar: lage massa sterren zijn bijna helemaal convectief

Convectie geeft menging!!

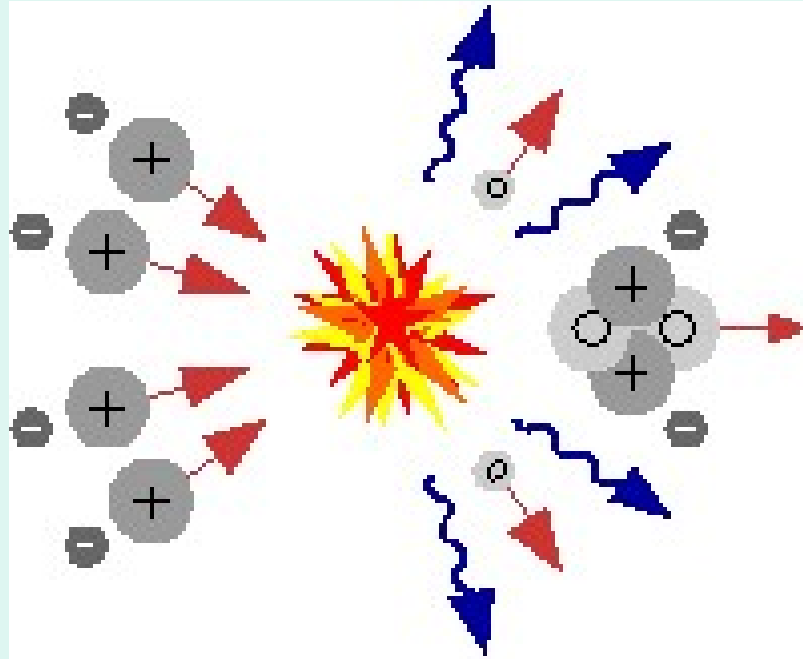
**Belangrijk voor fusie-producten die in centrum
worden geproduceerd.**

de “motor” van de zon en meeste sterren
H-fusie = kernfusie = “samensmelten”



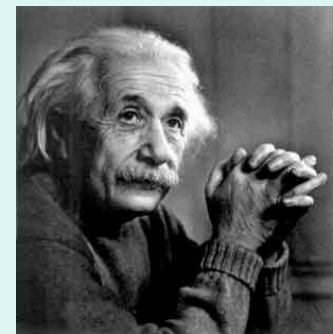
4 waterstof kernen smelten samen tot een helium kern
Daarbij vangen 2 protonen een electron in -> 2 neutronen
He –kern bestaat uit 2 protonen en twee neutronen

Het principe van $H \rightarrow He$ fusie



Hierbij gaat 0,7 % van de massa verloren
Die wordt omgezet in energie volgens

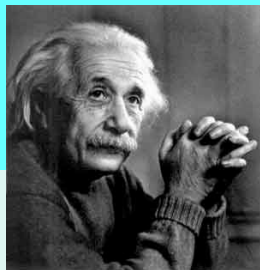
$$E = m c^2$$



Energie productie door H fusie

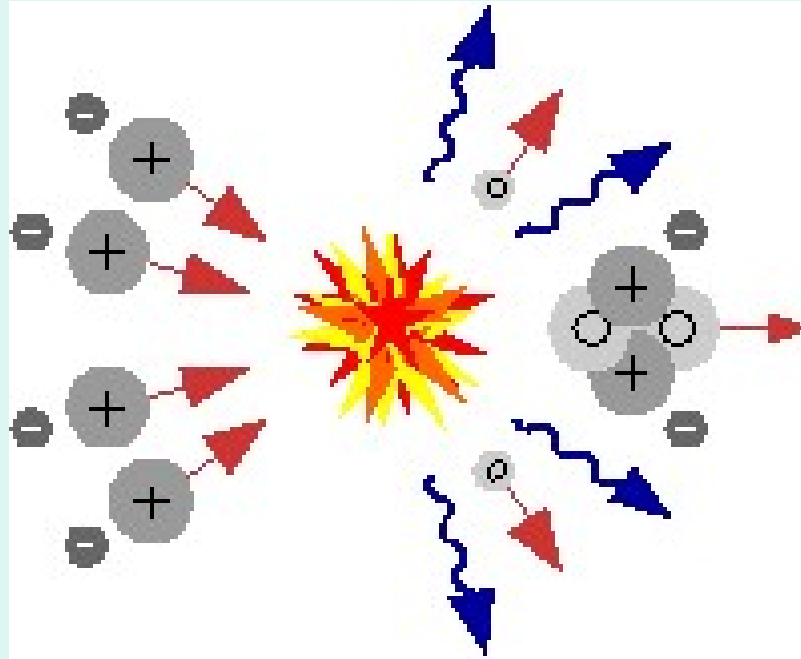
a.m.u =atomic mass unit

- 4 protonen : $4 \times 1.00727 = 4.0291$ a.m.u
- 2 electronen: $2 \times 0.00055 = 0.0011$ a.m.u
- -----
- in 4.0302 a.m.u
- He kern uit 4.0015 a.m.u
- -----
- omgezet in energie 0.0287 a.m.u.= 0.7 %



$$E = m c^2$$

Het principe van $H \rightarrow He$ fusie



Bedenk:

Atoom kernen zijn positief electrisch geladen, dus ze stoten elkaar af!

Dit kan dus alleen bij zeer grote dichtheid ($> 10^{24}$ atomen/cm³ = 1 g/cm³)

en bij zeer hoge temperatuur ($T > 10^7$ K $\rightarrow v = 100$ km/s)

Dus alleen in het inwendige van sterren!!

De maximale levensduur van de zon door H-fusie

Levensduur = Energie voorraad/Energie verbruik

- Massa van de zon = $2.0 \cdot 10^{30}$ kg
- 70% is waterstof = $1.4 \cdot 10^{30}$ kg H
- 12% van de massa zit in de kern (fusie) = $1.7 \cdot 10^{29}$ kg H
- Bij fusie wordt 0.7 % omgezet in energie = $1.2 \cdot 10^{27}$ kg H
- Totale energie voorraad ($E=mc^2$) = $1.1 \cdot 10^{44}$ J
- Energie verbruik van zon = $3.8 \cdot 10^{26}$ J/s
- Maximale levensduur van zon = Energie voorraad /Verbruik
= $2.9 \cdot 10^{17}$ s = 9 miljard jr !!

Zon is 4.6 miljard jaar oud = halverwege zijn leven

De levensduur van sterren

Maximale levensduur = energie voorraad/verbruik

$$t_{\max} = 9 \text{ miljard} \times (M/M_{\text{zon}})/(L/L_{\text{zon}}) \text{ jr} \quad \text{met } L \approx M^{3.5}$$

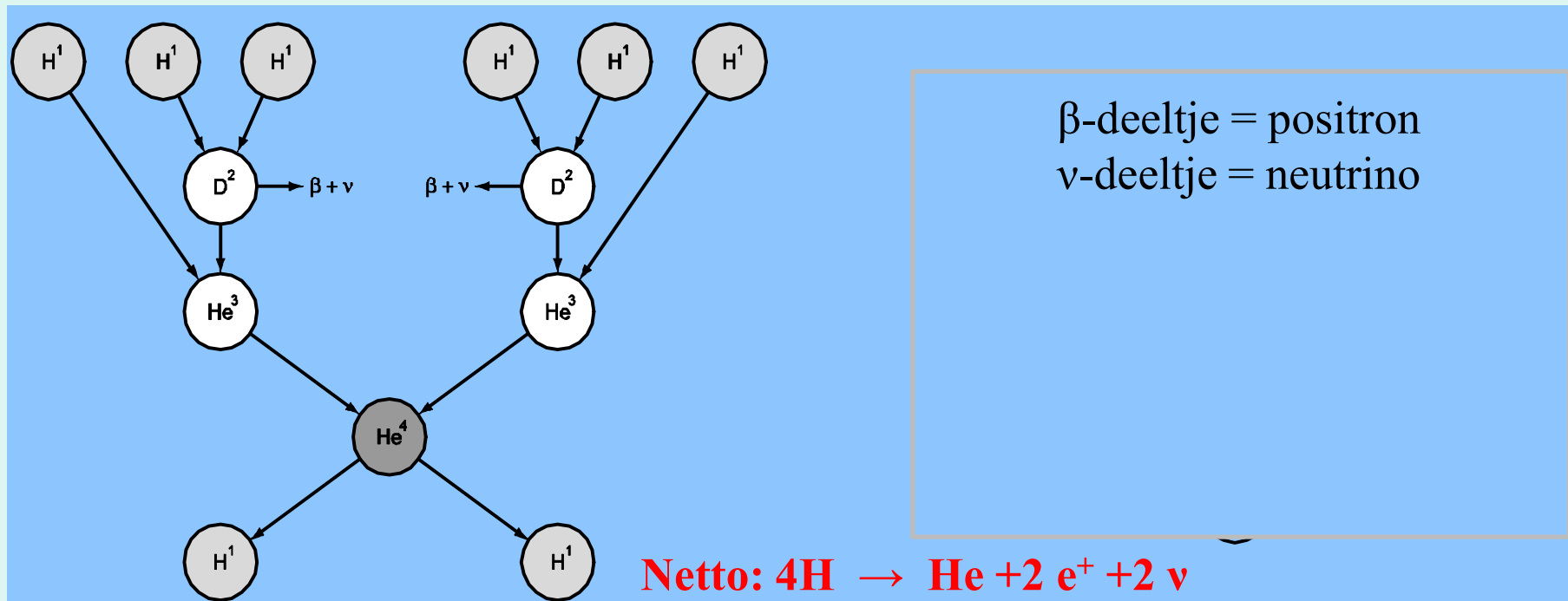
Massa (in Mzon)	Helderheid (in Lzon)	Levensduur(jr)	
		geschat	berekend
1	1	9 miljard	9
3	70	380 miljoen	380
5	450	100 miljoen	80
20	40 000	4.5 miljoen	9.0
60	500 000	1.1 miljoen	4.0
0.8	0.5	18 miljard	

1. Hoe zwaarder een ster, des te korter die leeft !! (groot energie verbruik)
2. Zware sterren zijn jong = "pas" gevormd !! (minder dan 5 miljoen jaar)
3. Heelal=14 miljard jaar.

Dus alle ooit gevormde sterren lichter dan 0.8x Zon leven nog !!

Hoofdreeks sterren: fusie van waterstof (H) tot helium (He)

Proton-proton-chain

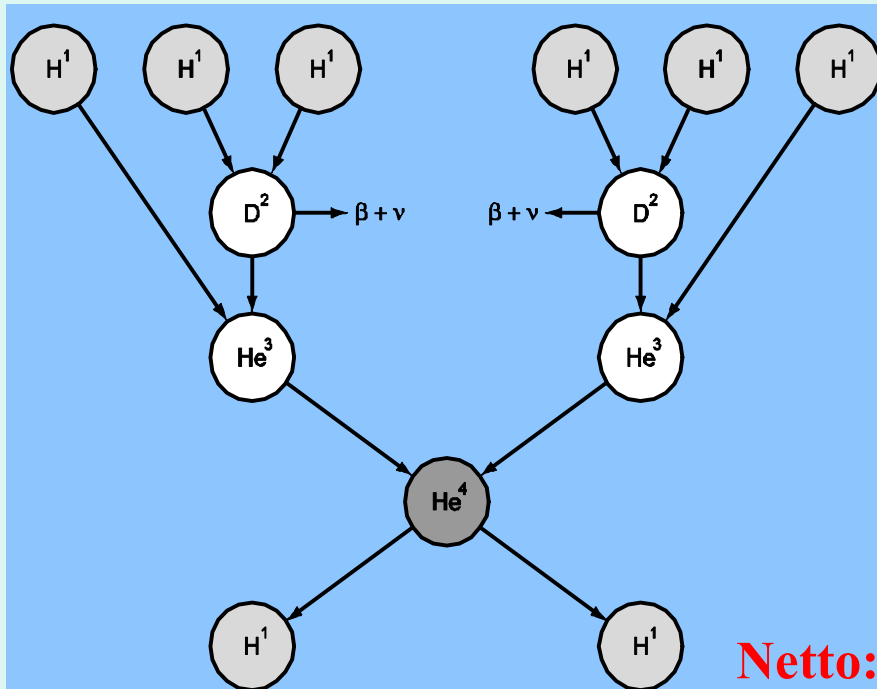


Hoofdreeks sterren $M < 1.5 M_{\odot}$

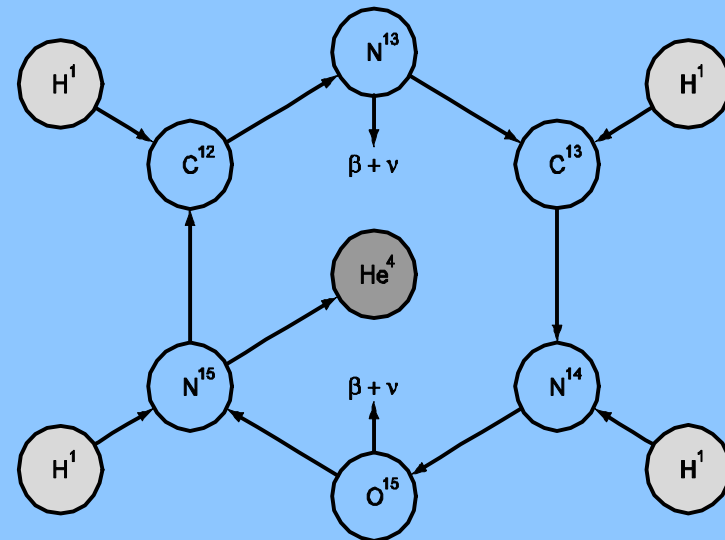
$T_c < 18 \cdot 10^6 \text{ K}$

Hoofdreeks sterren: fusie van waterstof (H) tot helium (He)

Proton-proton-chain



CNO-cycle



Netto: $4H \rightarrow He + 2e^+ + 2\nu$

Hoofdreeks sterren $M < 1.5 M_{\odot}$

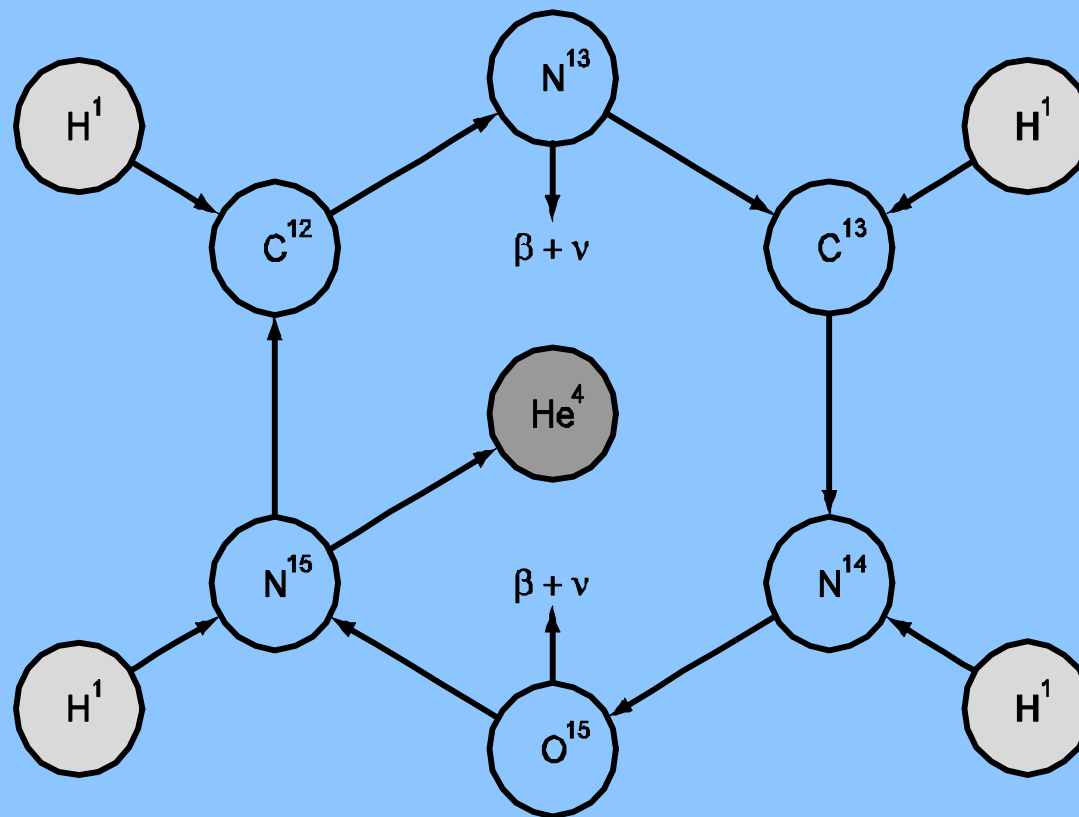
$T_c < 18 \cdot 10^6 \text{ K}$

$M > 1.5 M_{\odot}$

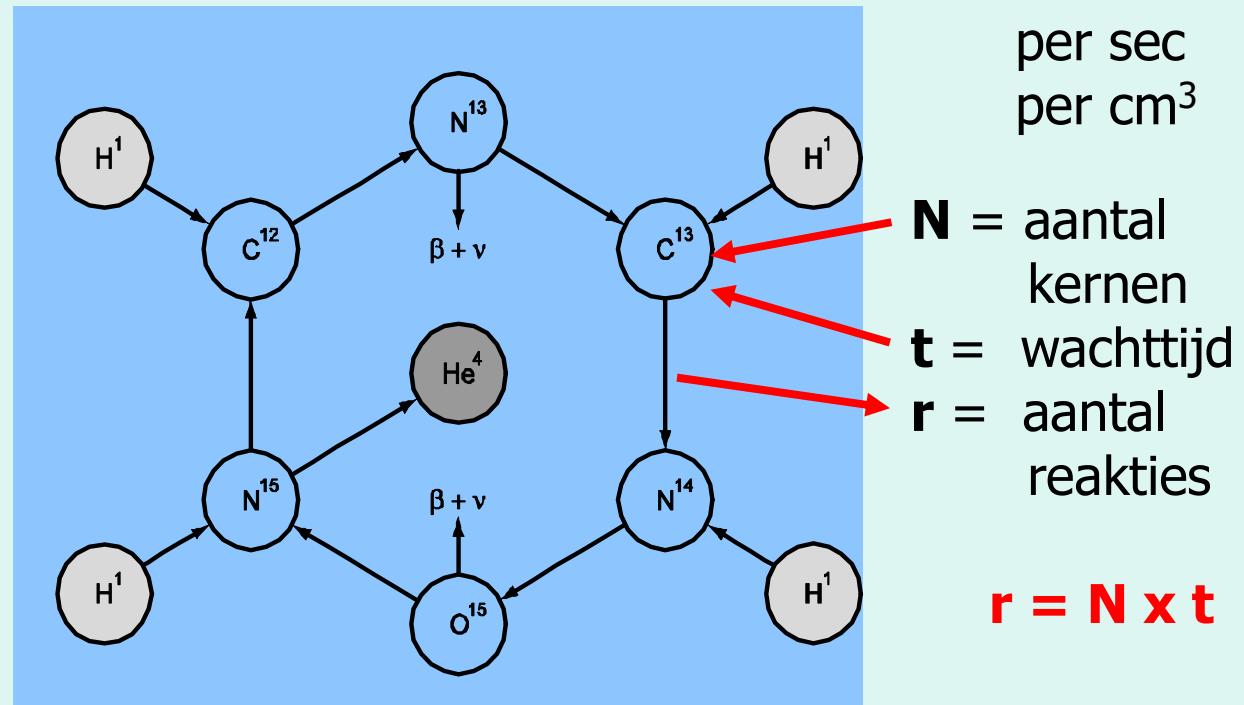
$T_c > 18 \cdot 10^6 \text{ K}$

H $\rightarrow$ He via de CNO-cyclus

The CNO - Cycle

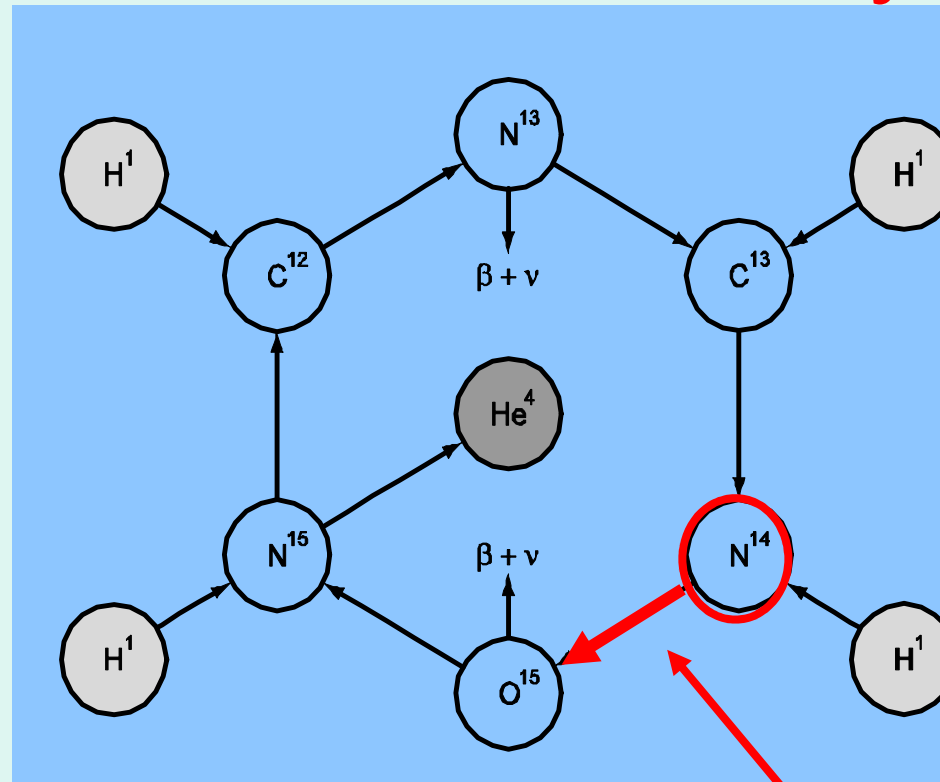


H $\rightarrow$ He via de CNO-cyclus



1. Cyclisch process: dus aantal overgangen per seconde per cm^3 is voor elke stap gelijk
2. Voor elke stap: aantal overgangen hangt af van: wachttijd x aantal kernen
3. Wachttijd hangt af van hoe groot de kans is op de reactie is
wachttijd is voor elke stap verschillend. Lange wachttijd $\rightarrow$ opstopping !
4. Dus als de cyclus eenmaal in evenwicht is, dan is het aantal kernen voor elk deeltje (isotoop) verschillend.

H $\rightarrow$ He via de CNO-cyclus



per sec
per cm^3

N = aantal
kernen
t = wachttijd
r = aantal
reakties r

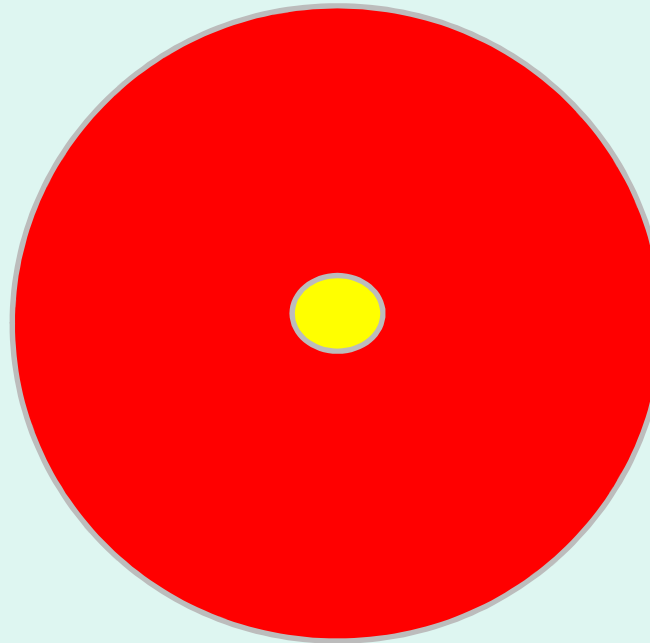
$$r = N \times t$$

Dit is de langzaamste stap!

1. Dus als de cyclus in evenwicht is (na ongeveer 100 000 jr)
dan is er een ophoping van ^{14}N ten koste van o.a. ^{12}C en ^{16}O
2. Dus tijdens de H fusie in zware sterren, neemt de hoeveelheid
N toe en de hoeveelheid C en O af !!

Het leven van een ster is
konstante strijd tussen
zwaartekracht en
tegendruk door heet gas

Zolang die elkaar in
evenwicht houden is de
ster stabiel.



Waterstof
mantel

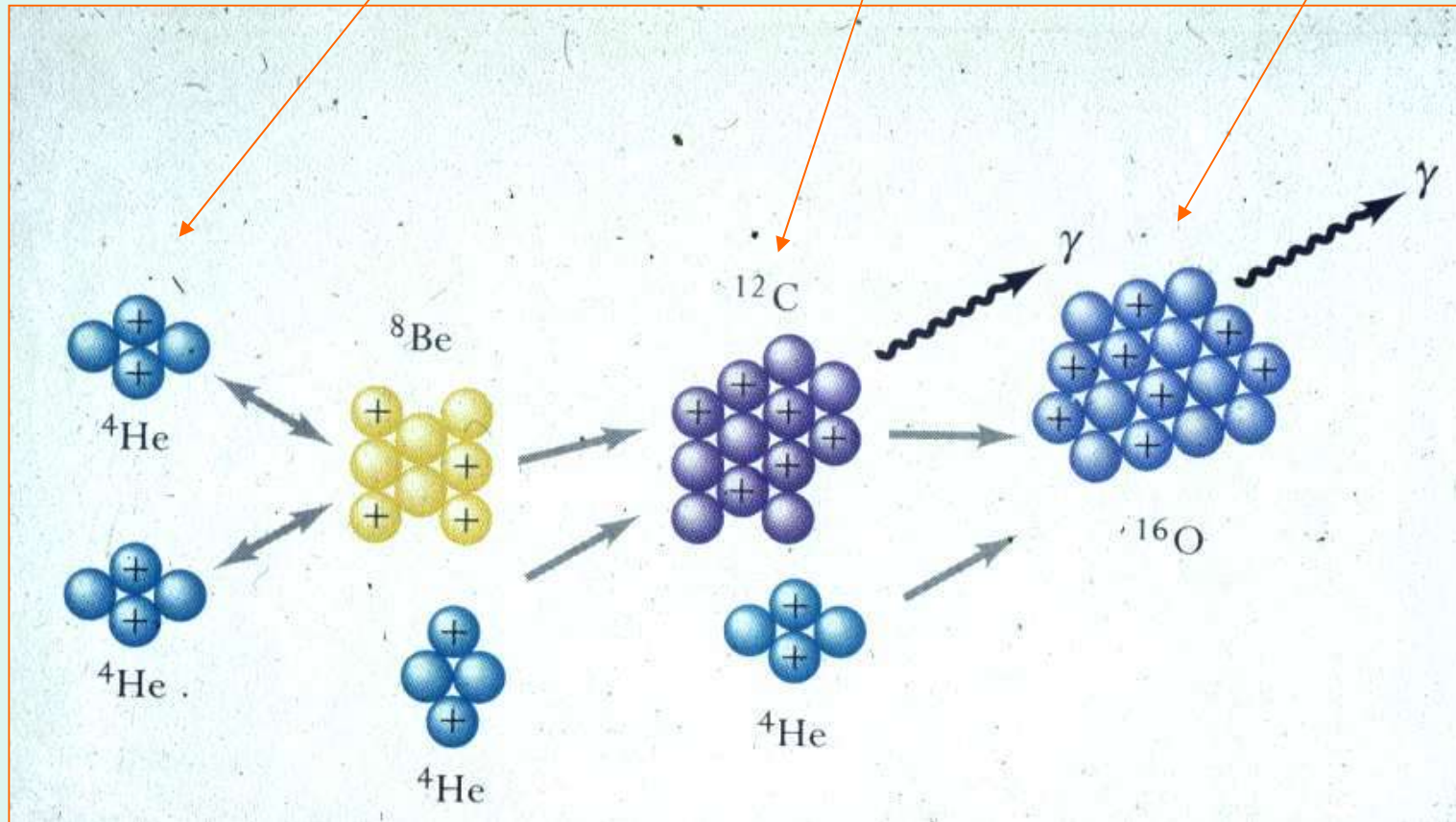
Helium kern

Aan eind van elke fusie-fase:

1. Ster produceert te weinig energie voor evenwicht
2. Daardoor dreigt kern niet meer genoeg energie/warmte te leveren om de gasdruk hoog genoeg te houden
3. Zwaartekracht van de mantel perst de kern samen
4. In samengedrukte kern loopt T en dichtheid op.
5. Totdat T hoog genoeg is voor de volgende fusiefase
6. Dan kan de ster weer in evenwicht zijn!

Zo kan een ster door een aantal fusie processen doorlopen.

Fusie van helium → koolstof → zuurstof



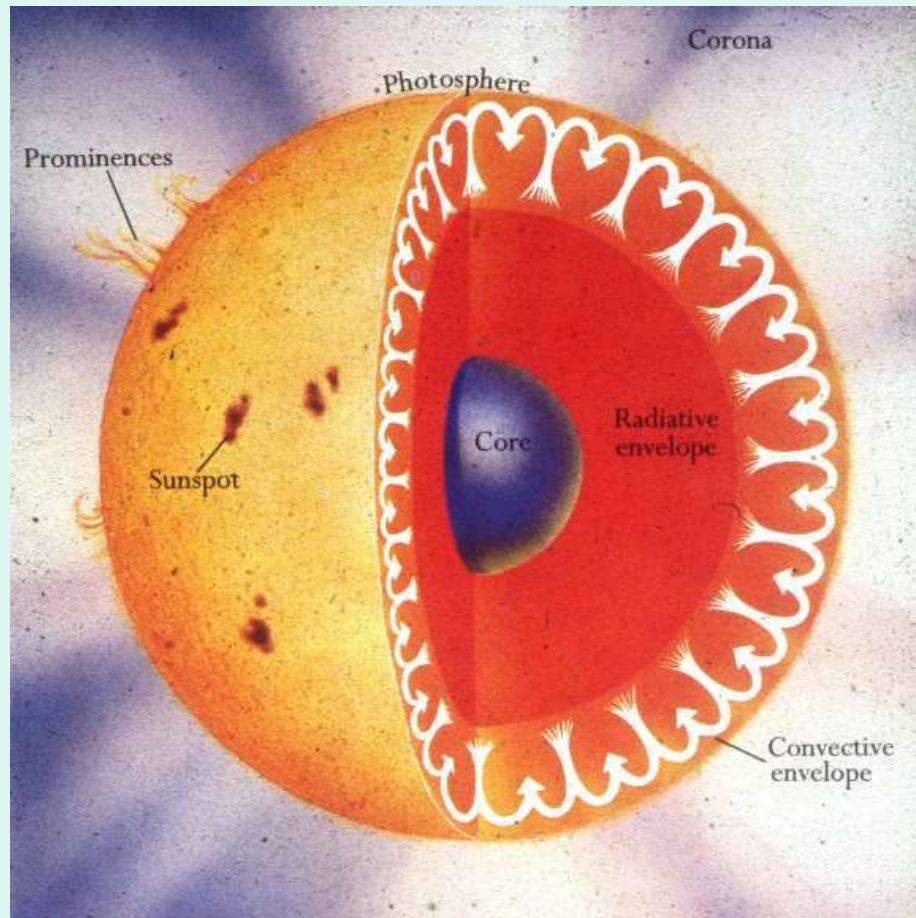
Belangrijkste fusie reacties in sterren

grondstof		produkt	T	reactie
Waterstof	→	Helium	10^7	$4 \text{ H} \rightarrow \text{He}^4$
Helium	→	Koolstof	10^8	$3 \text{ He}^4 \rightarrow \text{C}^{12}$
Koolstof + He	→	Zuurstof	$2 \cdot 10^8$	$\text{C}^{12} + \text{He}^4 \rightarrow \text{O}^{16}$
Zuurstof	→	Silicium	10^9	$2 \text{ O}^{16} \rightarrow \text{Si}^{28} + \text{He}^4$
Silicium	→	IJzer	$2 \cdot 10^9$	$2 \text{ Si}^{28} \rightarrow \text{Fe}^{56}$

Elke volgende reactie heeft een hogere T nodig!
Dit komt door grotere lading = sterkere afstotende kracht

De evolutie van lichte sterren

$M < 4 M_{\text{zon}}$

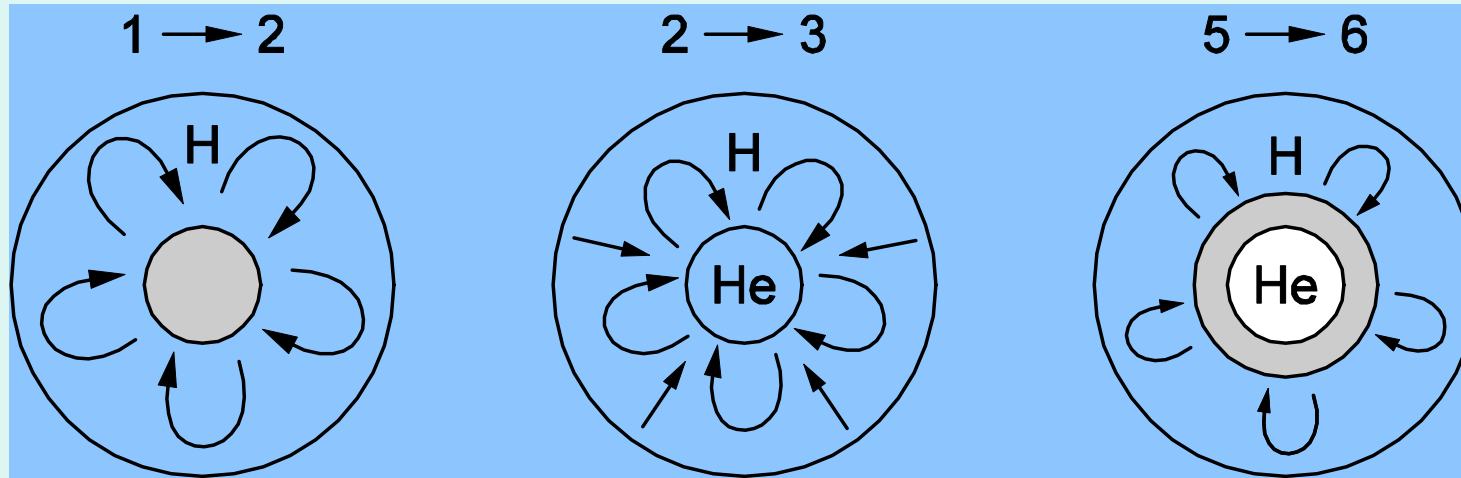


Aan einde van H-fusie
(9 miljard jaar voor Zon)
gaat de kern krimpen om
energie te produceren.

- Kern wordt heter
- H-fusie start **in schil** om kern
- Buitenlagen worden
convectief en ster zwelt op:
- L stijgt, R stijgt, T^* daalt
- Ster wordt rode reus

De evolutie van lichte sterren

$M < 4 M_{\text{zon}}$



1-2 : H-fusie in kern, ster op hoofdreeks

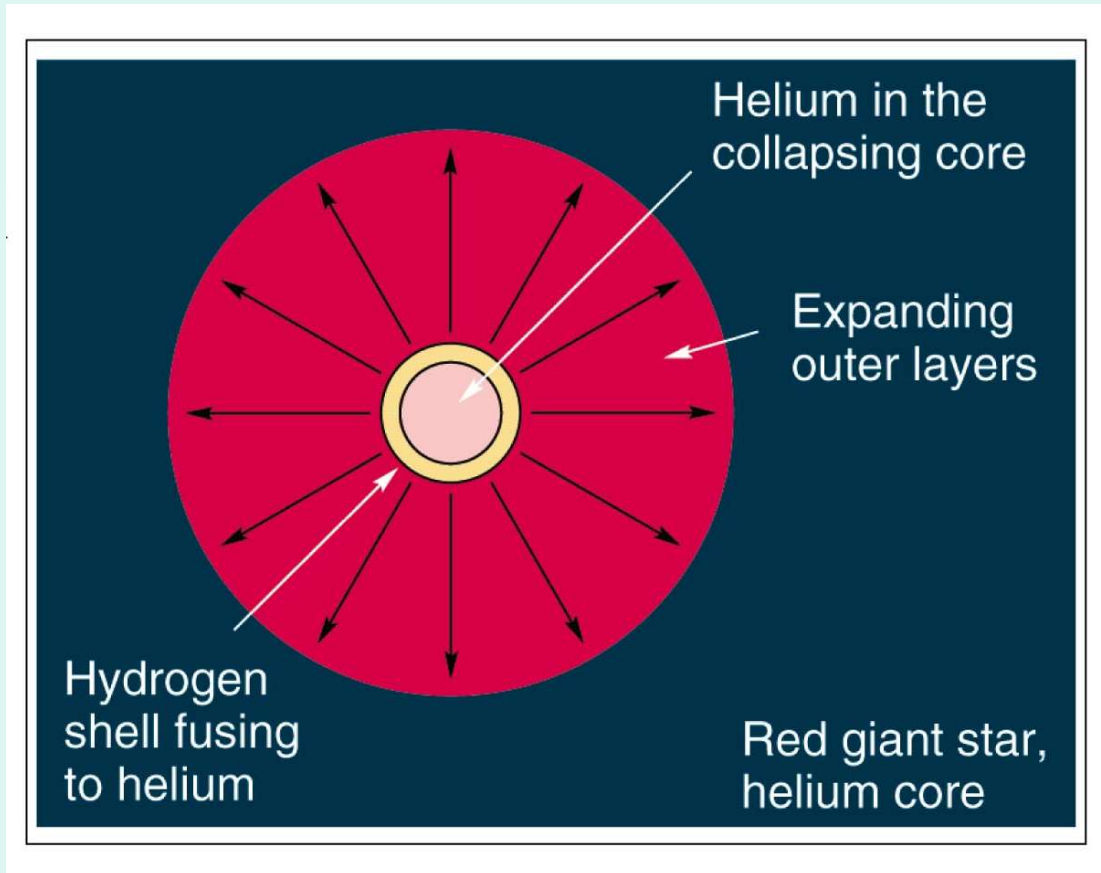
2-3: Aan eind van H-fusie heeft de ster een He kern. De kern krimpt om energieverlies door straling te dekken (pot. energie). Binnendelen worden heter.

5 : Nu start **H-fusie in schil rondom He kern**.

Buitenlagen worden convectief en zwellen op: L^* , R^* stijgen, T^* daalt

Ster is nu rode reus geworden!

Opbouw van een rode reus



Buitenlagen
convectief
a.h.w.
“opgeklapt”

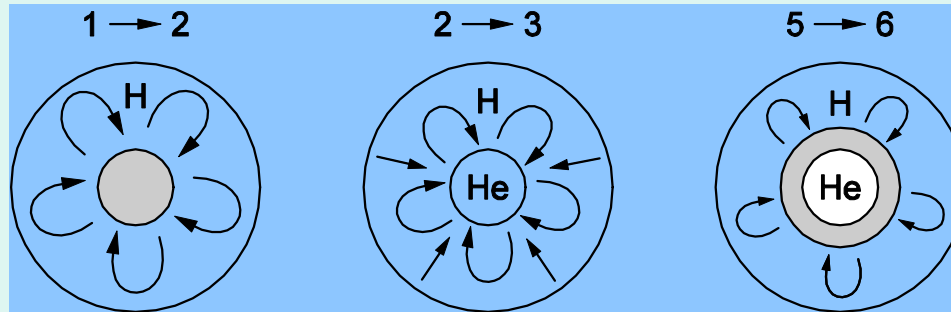
Daarom is de
ster zo groot !

Typische waarden voor een Rode Reus:

$L=500 L_{\text{zon}}$, $R=100 R_{\text{zon}}$ $T^*=3600 \text{ K}$

Van hoofdreeks naar rode reus

Intern

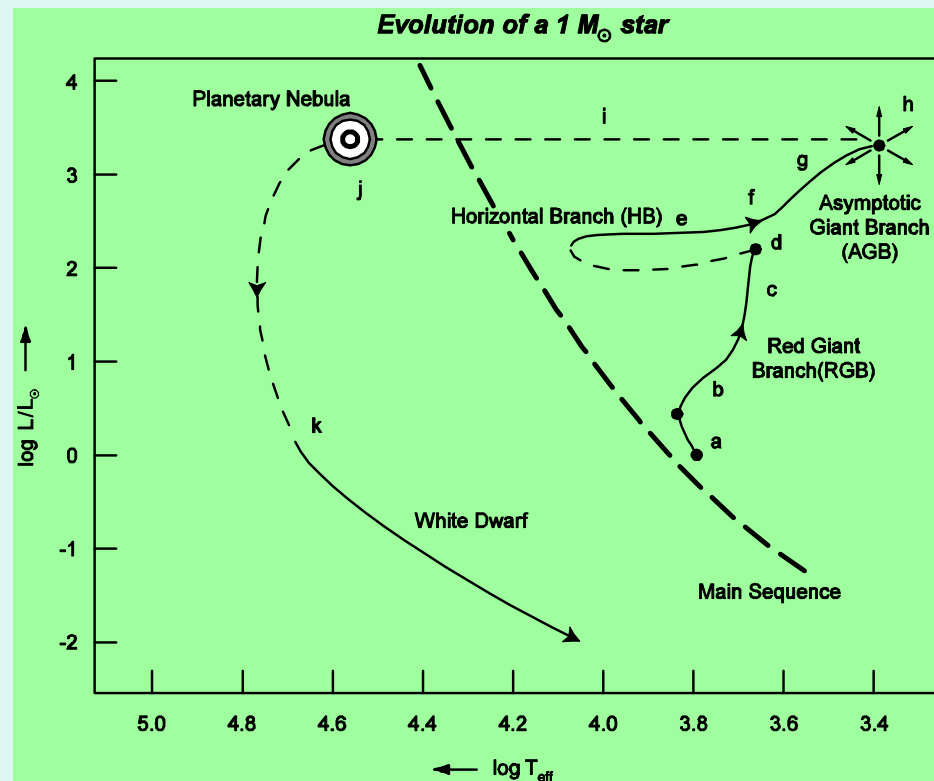


1-2 = a

2-3 = b

5-6 = c-d

Extern



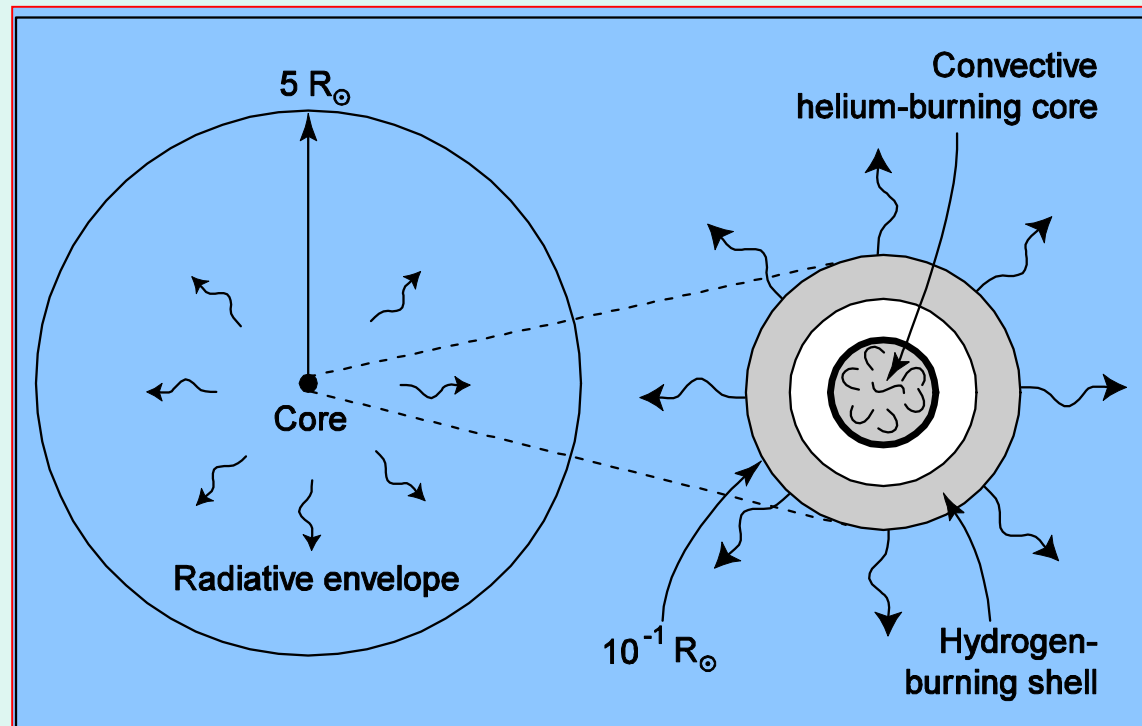
Identificeer het
evolutie spoor
van
hoofdreeks
ster tot rode
reus in het
Hertzsprung-
Russell
diagram!

De zon over 3.5 miljard jaar :
een rode reus: $R=50 R_{\text{zon}}$
opzwellen doordat ster convectief wordt
aarde verliest water en dampkring !



Verdroogde
aarde

Helium fusie start in de kern



Als H-fusie in de schil niet meer genoeg energie levert, dan krimpt het binnenste van de ster verder. Bij krimpen stijgt de T in centrum.

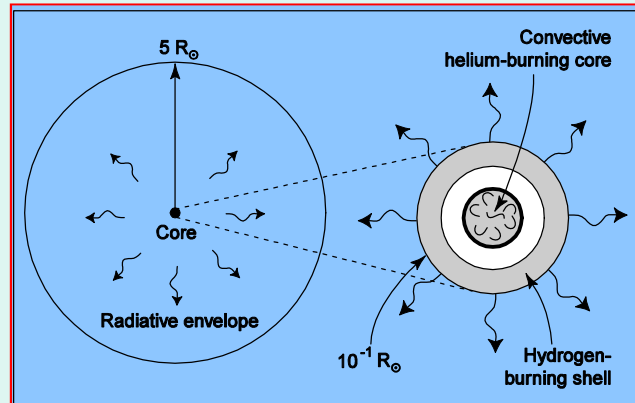
Als T ongeveer 100 miljoen graden is, dan start **Helium fusie in de kern** $\rightarrow$ **C**
met daaromheen nog een beetje **H-fusie in de schil** $\rightarrow$ **H**

De ster wordt dan iets minder convectief waardoor R^* afneemt, T^* neemt toe

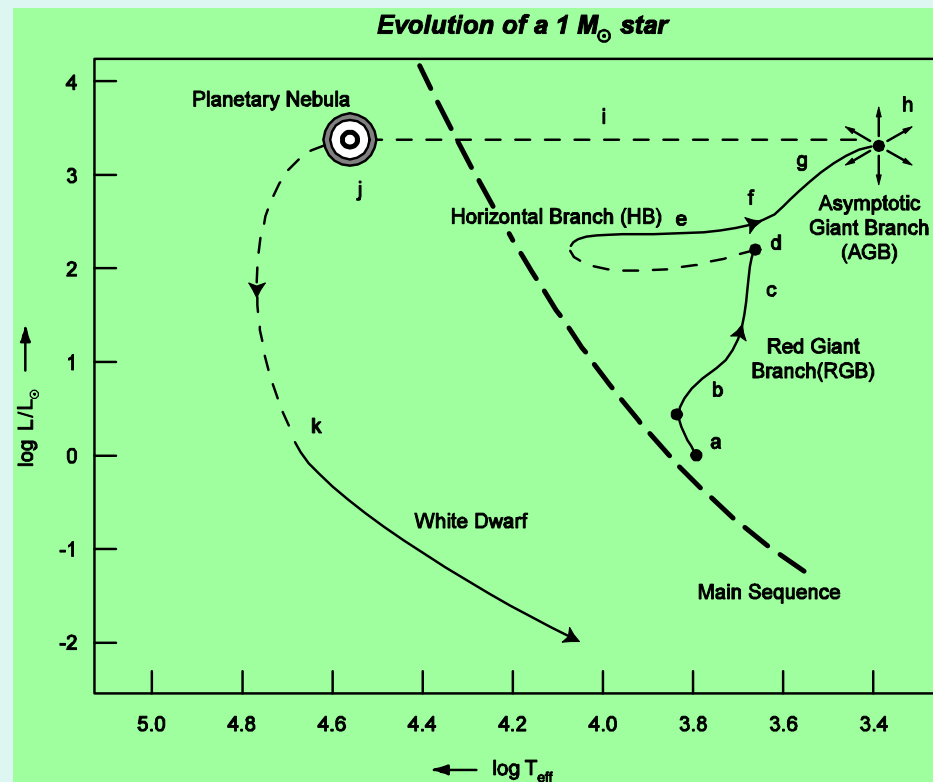
Ster maakt lus naar links in het HRD (horizontale tak ster)

Fase van Helium fusie in de kern = Horizontale tak

Intern



Extern



Tijdens He-fusie in
de kern zit de ster op
de

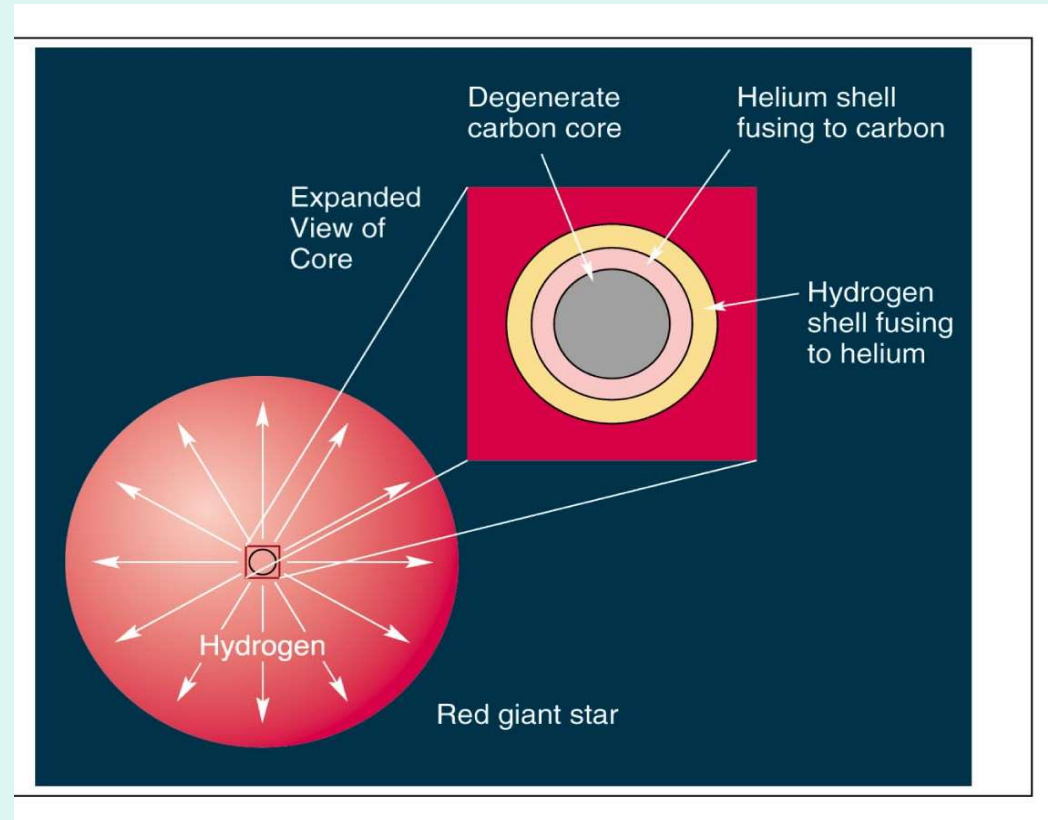
Horizontale Tak

(Horizontal Branch)

=fase d-e-f

Duur: ca 10^9 jaar

Dubbele schil fusie: H-fusie en He-fusie om C-kern



De
buitenlagen
zijn weer
helemaal
convectief

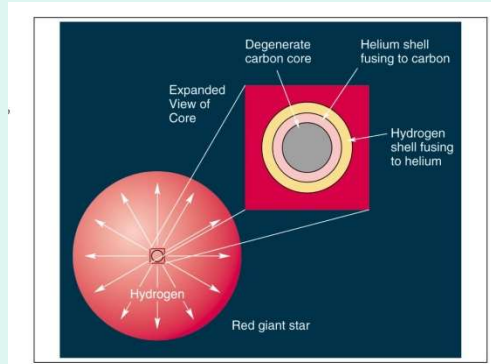
Als He-fusie in de kern stopt, dan heeft de ster een C kern.
dan krimpt het binnenste weer, om energie verlies te dekken en stijgt T
totdat He-fusie in een schil rondom de C –kern start = dubbele schilfusie.

De ster is nu een heel heldere rode superreus (Asymptotic Giant Branch star)

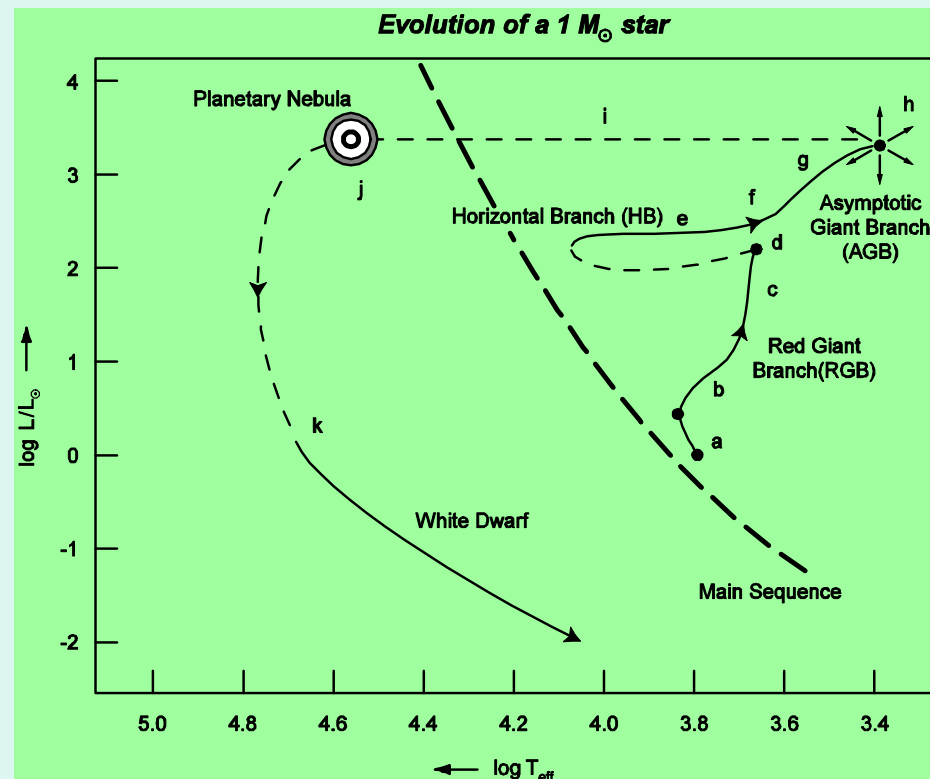
Dubbele schil fusie: H-fusie en He-fusie om C-kern

=AGB ster

Intern



Extern



Dubbele schil
fusie

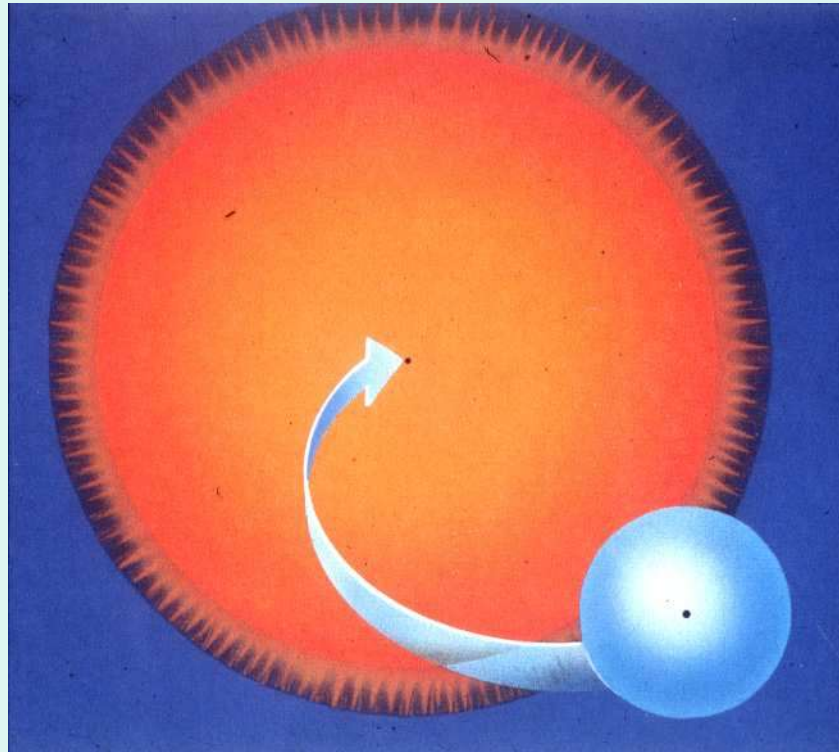
Fase: f-g-h

Asymptotic
Giant Branch
star (AGB)

Helderheid L
neemt toe.

Duur: ca 10^6
jaar

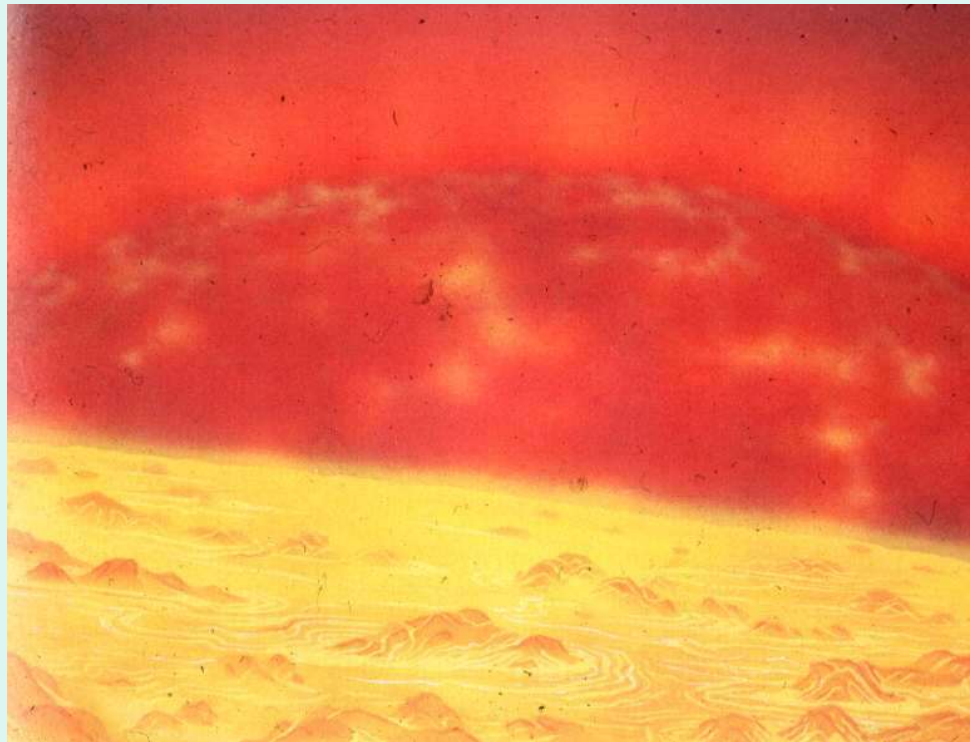
Rode superreus met kern van helium en koolstof = “pit” van de ster



De mantel is helemaal konvektief, tot grote diepte.
Dus fusie-producten kunnen uit het centrum naar buiten worden gemengd!
De helderste rode reuzen hebben een helium en koolstof rijke mantel !!

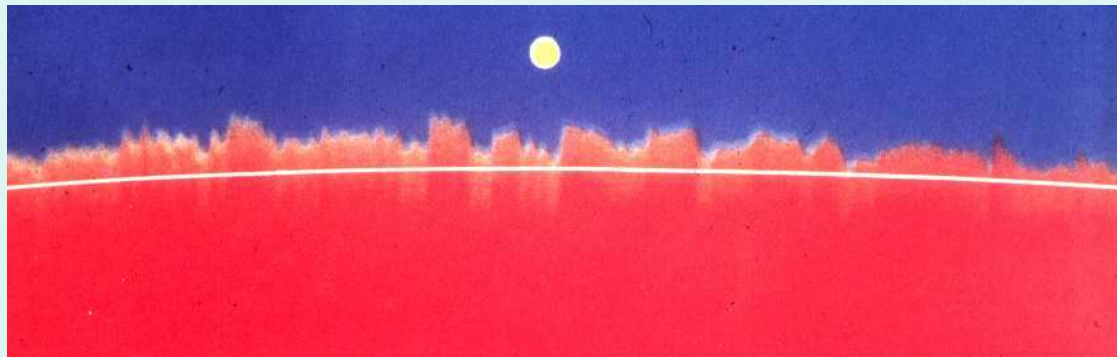
300 miljoen jaar later :
rode superreus : $R=300 R_{\text{zon}}$

einde van de aarde !!

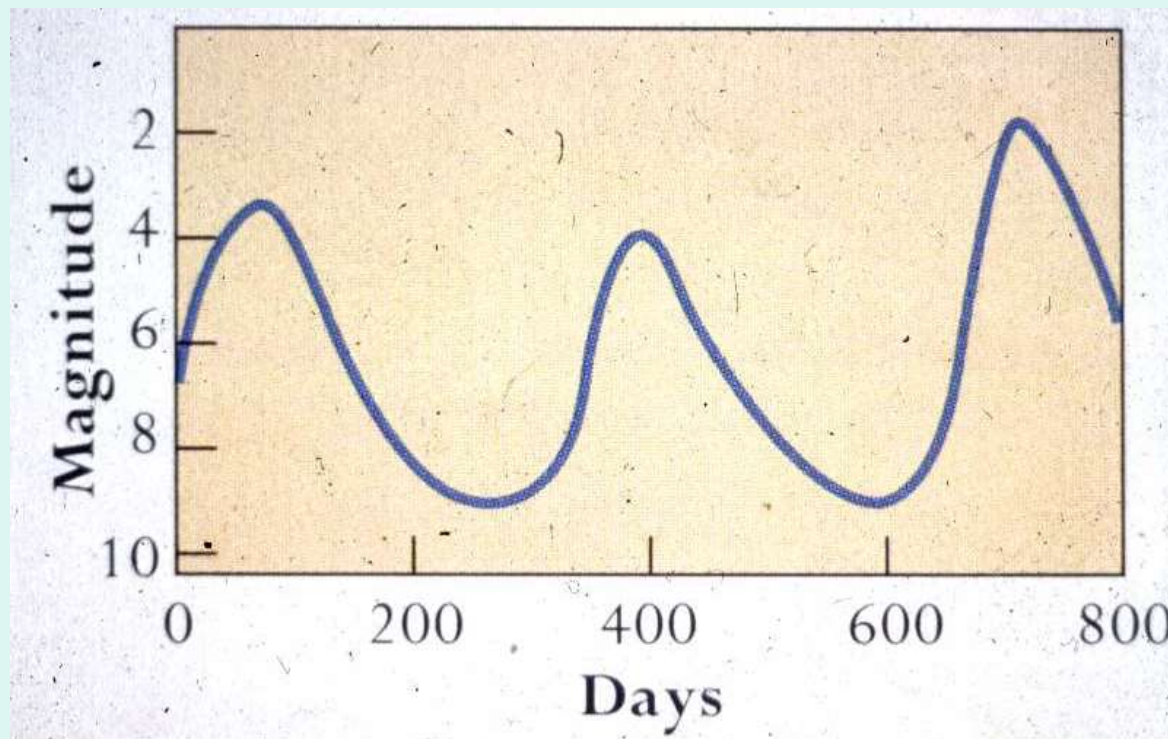


Artist impression van het gesmolten oppervlak van Mars.
De rode bol op de achtergrond is de zon die een rode superreus is geworden.

Afmeting van rode superreus op schaal t.o.v. zon



Heldere rode reuzen gaan
“pulseren” = uitzetten en inkrimpen
en stoten daarbij hun buitenlagen af



Het waargenomen helderheids verloop van een heldere rode reus.
De ster zet uit en krimpt in (pulseert) ongeveer om het jaar.

Buitenlagen die de ster heeft uitgestoten: “ring nevel” of “planetaire nevel”

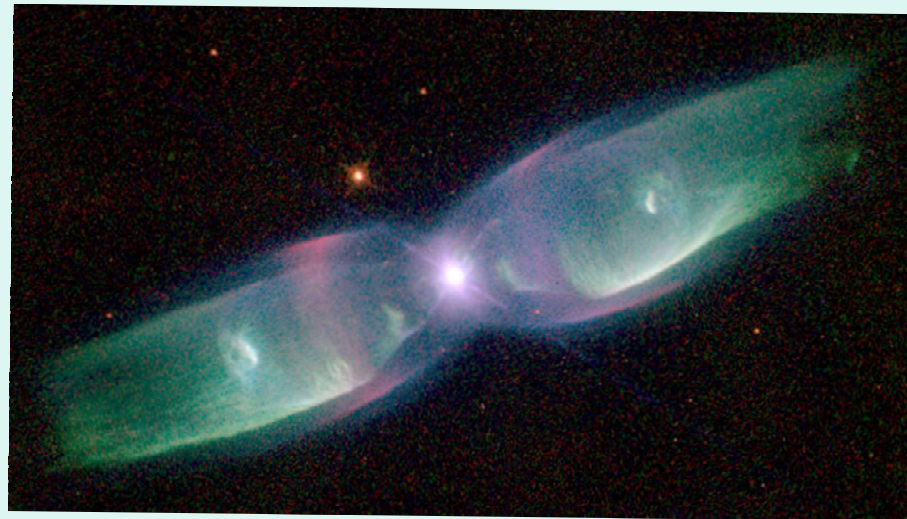
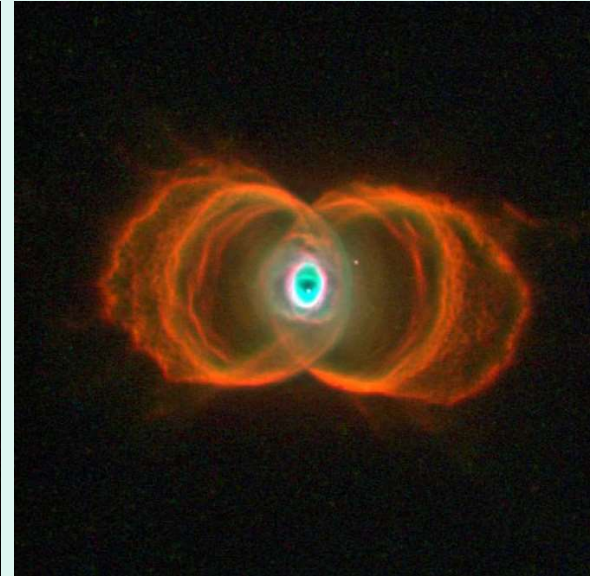
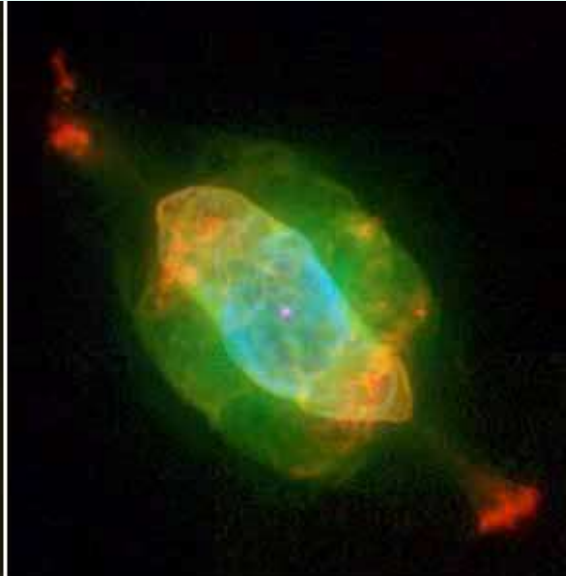


De overblijvende pit = Witte Dwerg

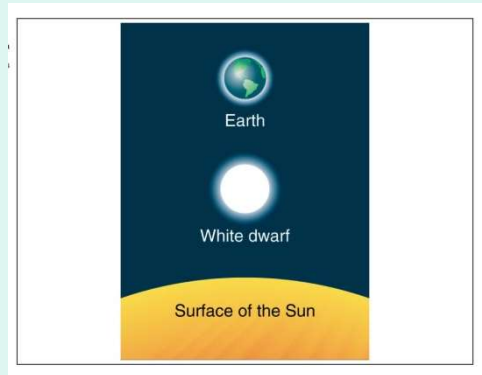
Typisch planetaire nevel

- diameter 1 lichtjaar
- expansie snelheid: 50 km/s
- massa van de nevel: 0.2 $M_{\odot}$
- samenstelling: H en He en C
- ouderdom $t=r/v$ ca 10 000 jr
- In het centrum: klein heet sterretje,
 - = “pit” van de rode reus
 - = He en C kern

Vormen van Ringnevels



Evolutie van PN naar witte dwerg

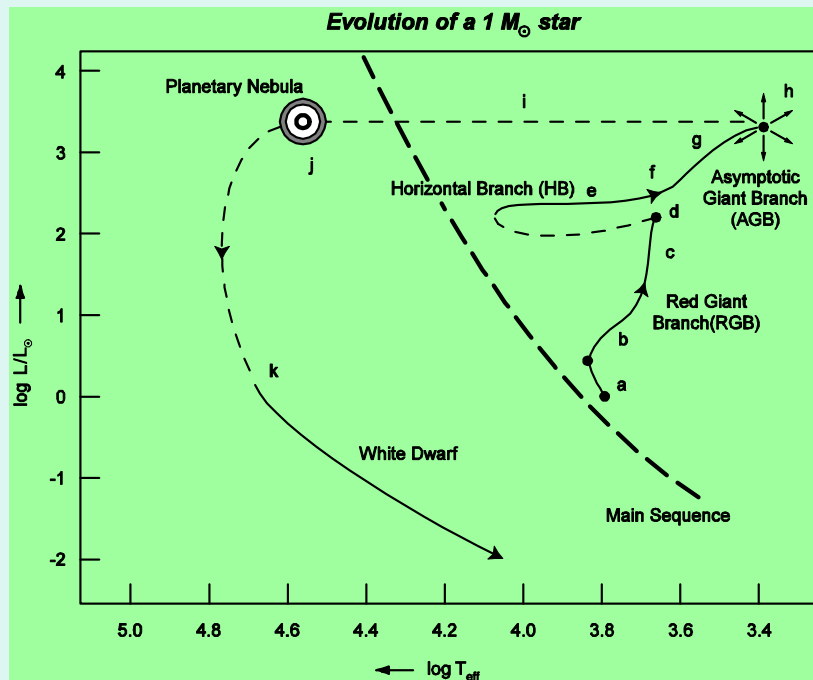


Kort nadat de planetaire nevel verdwenen is, stopt de fusie in de ster helemaal.

De ster wordt dan snel kleiner en zwakker en wordt een

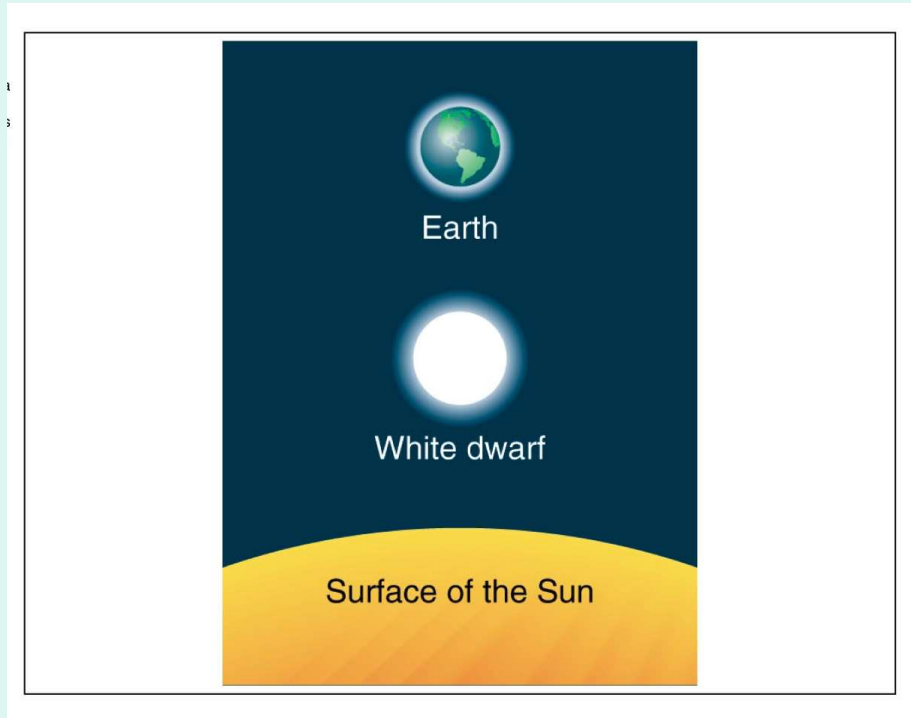
Witte Dwerg

Langzaam zwakker en kouder



Identificeer die fase in het HR diagram !

Het einde van een lichte ster: een witte dwerg



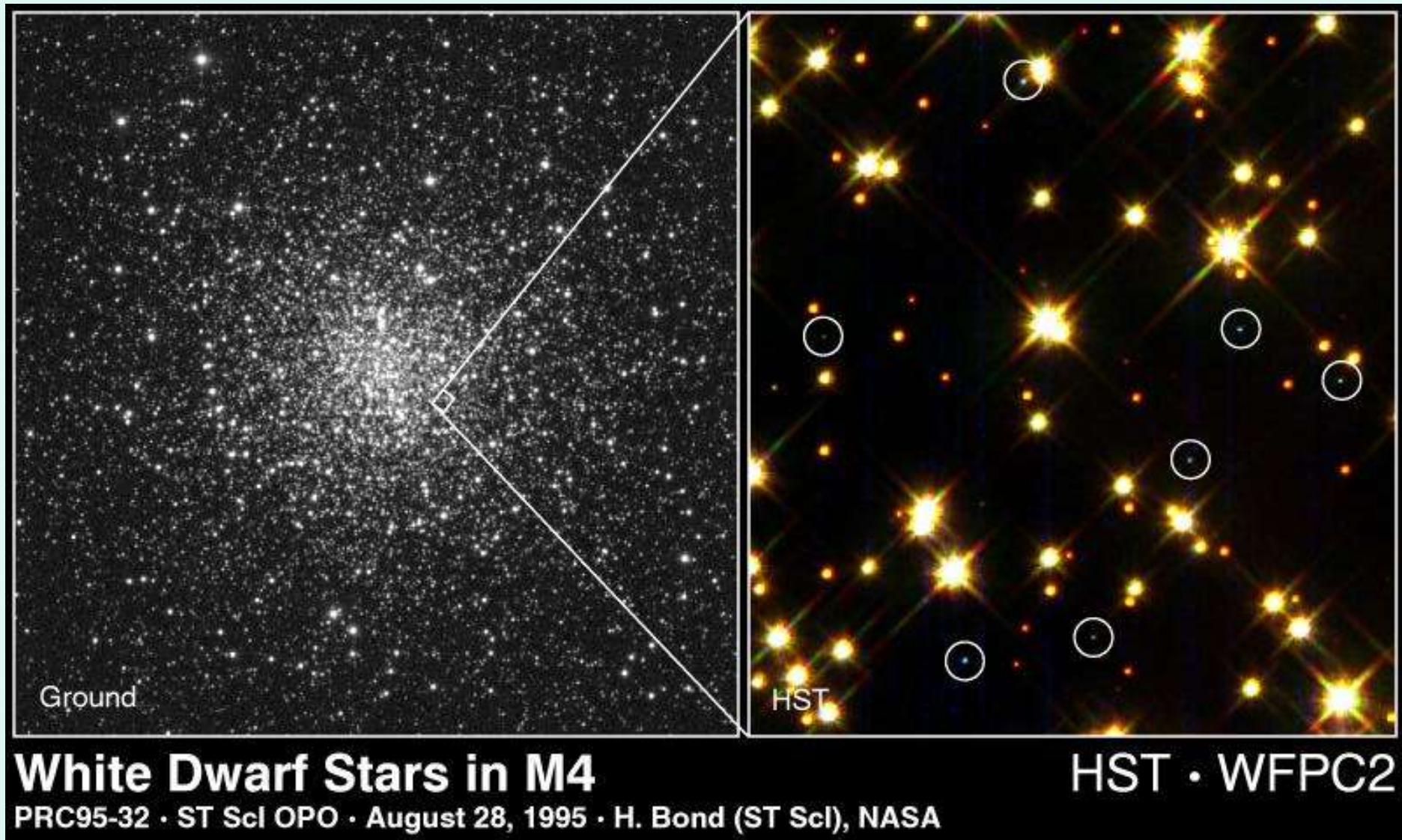
Kort nadat de planetaire nevel verdwenen is, stopt de fusie in de ster helemaal.

De ster wordt dan snel kleiner en zwakker en wordt een

Witte Dwerg

Een Witte Dwerg is een zeer kompacte ster, met een massa van ca $0.6 M_{\text{zon}}$ en een straal van ca $0.01 R_{\text{zon}}$, dwz zo groot als aarde! Dichtheid 1000 kg/cm^3 !

Witte dwergen in een sterhoop



Onthouden

Evolutie fasen van lage massa sterren: $M < 4 M_{\odot}$

1. hoofdreeks fase = H-fusie in kern
2. H-fusie rondom He kern : rode reus
4. He-fusie in kern (horizontale tak ster)
5. Schillen van He-fusie en H-fusie rondom C-kern: (heldere rode reus)
6. Ster pulseert en blaast buitenleggen weg
7. Als bijna alle buitenlagen weg zijn gaat ster krimpen en heter worden
8. We zien de weggeblazen buitenlagen als Planetaire nevel met
in het midden de “pit” van de ster = C-He ster
9. Fusie stopt en pit wordt witte dwerg

Evolutie van zware sterren

Evolutie van zware sterren

$M = 4 - 100 M_{\text{zon}}$

De evolutie fasen van zware sterren gaan door soortgelijke fusie fasen als van lichte sterren.

Het belangrijkste verschil is:

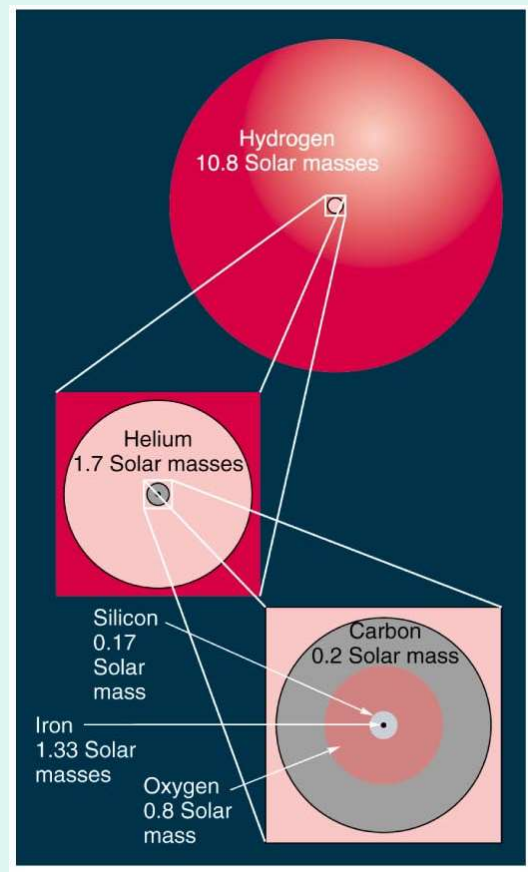
De sterren gaan door veel meer fusie fasen, omdat ze een hogere T in centrum kunnen bereiken. (waarom?)

Fusie gaat door tot en met vorming van Fe

Belangrijkste fusie reacties in sterren en relatieve duur van die fasen voor een ster van 15 zons massa

grondstof	produkt	T	reactie	duur (15Mzon)
H	→ Helium	10^7	$4 \text{ H} \rightarrow \text{He}^4$	10^7 jaar
He	→ Koolstof	10^8	$3 \text{ He}^4 \rightarrow \text{C}^{12}$	10^6 jaar
C + He	→ Zuurstof	$2 \cdot 10^8$	$\text{C}^{12} + \text{He}^4 \rightarrow \text{O}^{16}$	10^3 jaar
O	→ Silicium	10^9	$2 \text{ O}^{16} \rightarrow \text{Si}^{28} + \text{He}^4$	1 jaar
Si	→ IJzer	$2 \cdot 10^9$	$2 \text{ Si}^{28} \rightarrow \text{Fe}^{56}$	dagen

Opbouw van een 15 Mzon ster tegen einde van zijn evolutie



Van binnen naar buiten:

Fe : 1.33 Mzon

Si : 0.17 Mzon

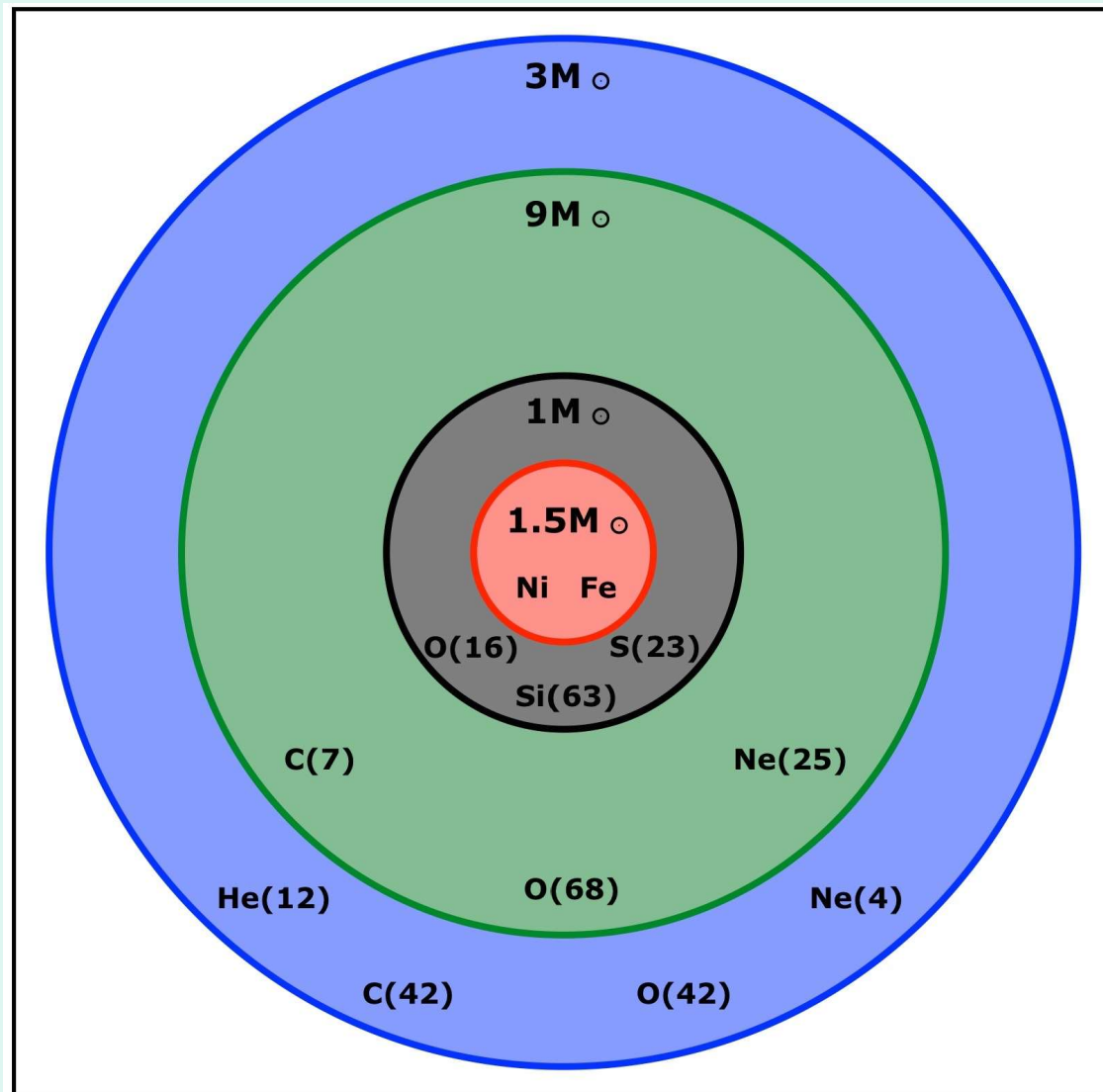
O : 0.8 Mzon

C : 0.2 Mzon

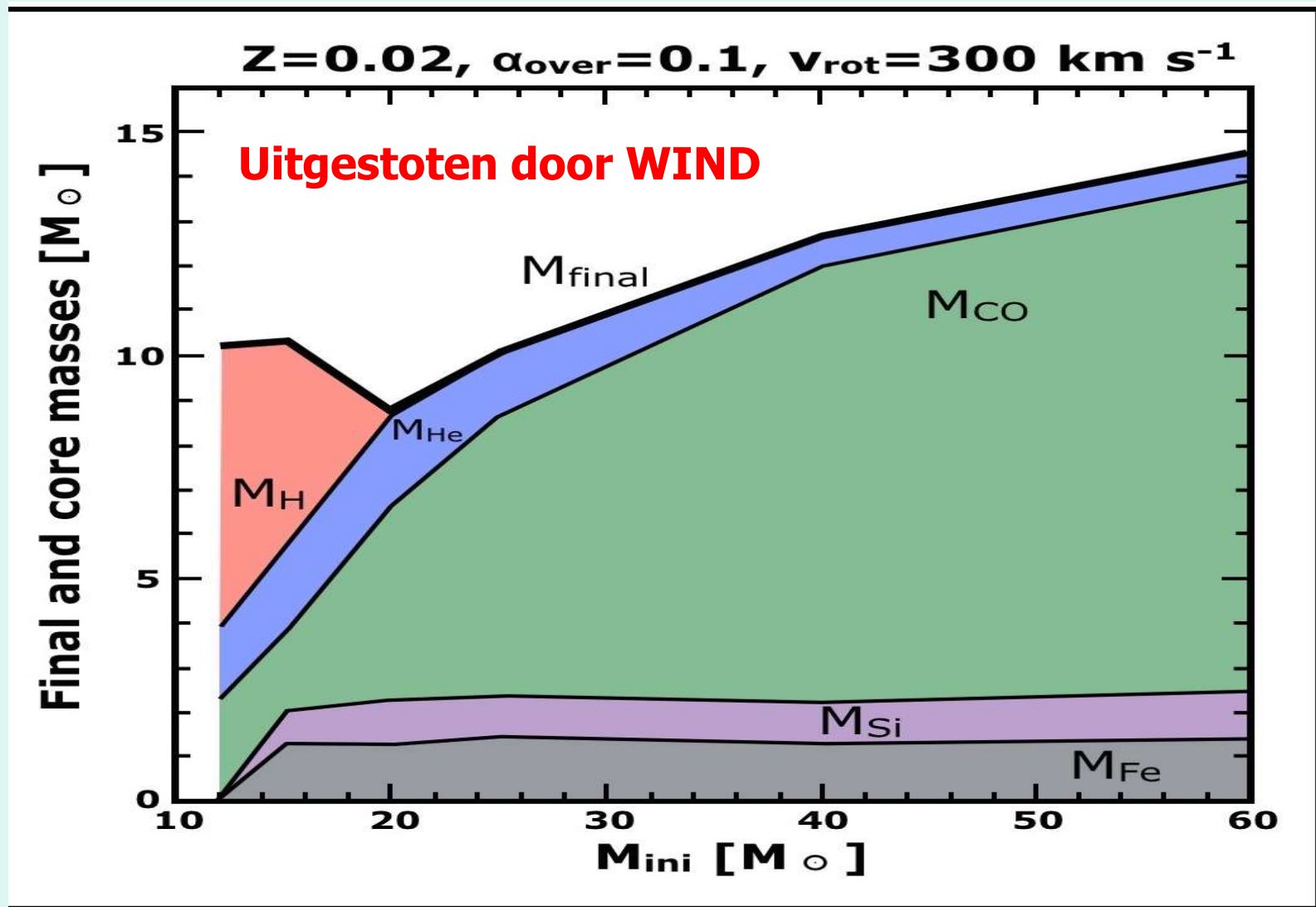
He : 1.7 Mzon

H : 10.8 Mzon

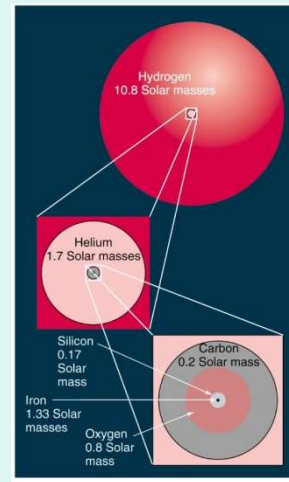
Het einde van een ster van 60 Mzon



Chemische samenstelling aan eind van de Si-fusie



Het einde van een zware ster : $> 8 M_{\text{zon}}$



Als de fusie tot Fe gestopt is heeft de ster geen energiebron meer.
De zwaartekracht wint uiteindelijk en het centrum stort in !
Door de energie die vrijkomt krijgen de buitenlagen zo'n grote schok dat ze worden weggeblazen.

De ster ontploft !!

Supernova 1987A

een ontploffende zware ster $\sim 25 M_{\text{zon}}$



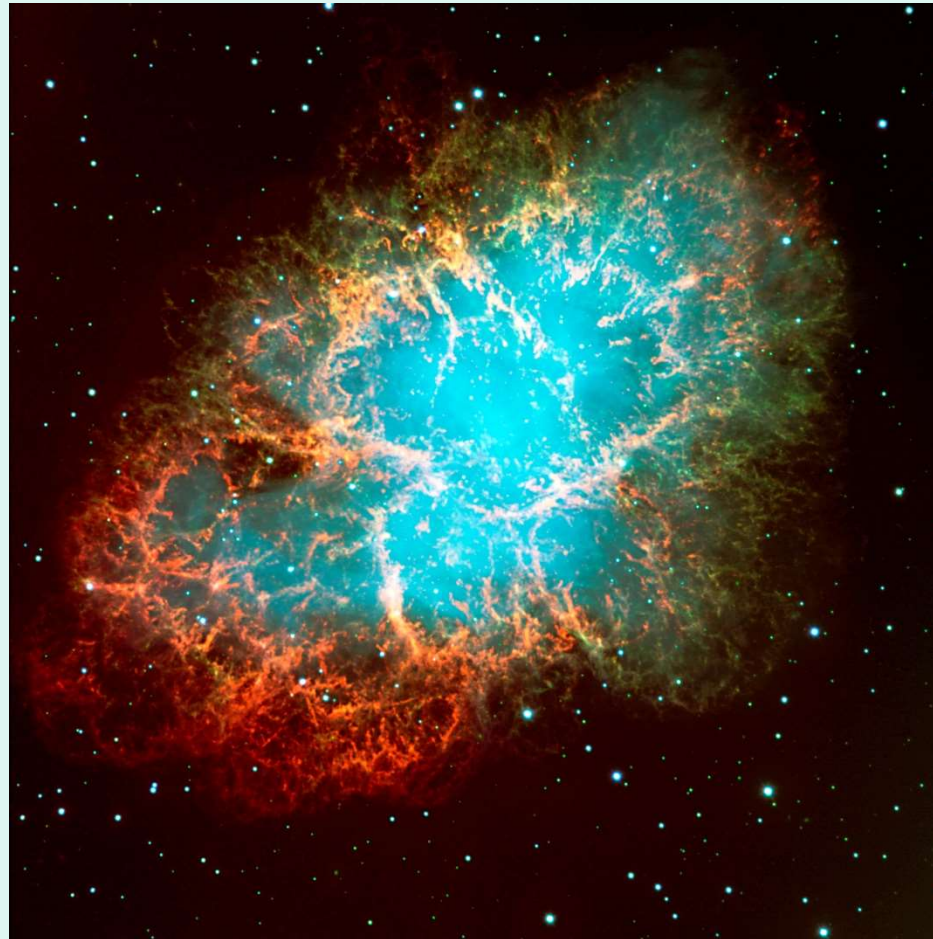
Opname van jaren 70



25 febr 1987

Helderheid
 $10^8 \times \text{Zon}$
Maanden lang

“krab-nevel”
restant van ster die in 1054 ontplofte
expansie snelheid ~ 1500 km/s



“sluier nevel” =

restant van oude supernova explosie van duizenden jaren geleden

chemisch verrijkt met He, C, N, O, Fe enz



Onthouden

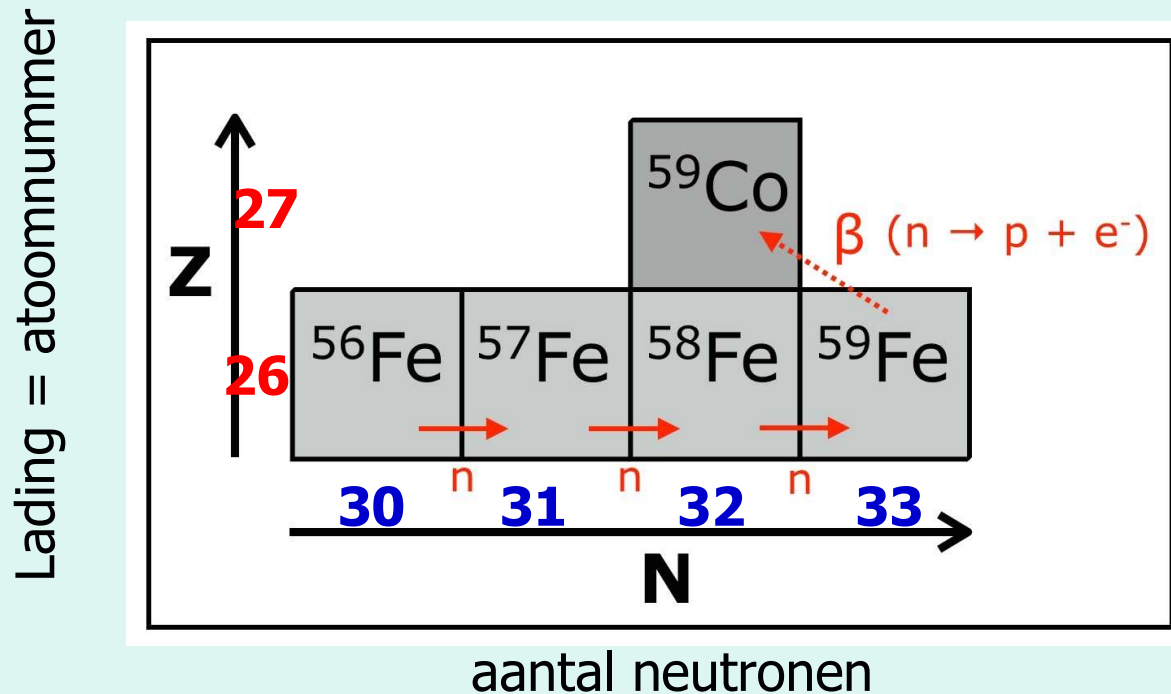
1. Zware sterren gaan door alle fusie-fasen to Fe –kern
2. Laatste evolutiefasen gaan heel snel
3. Als ster Fe-kern heeft stort die in .
4. Schokgolf van binnenuit is zo sterk dat buitenlagen worden uitgestoten met snelheden van 10^4 km/s
5. Dit zien we als Supernova explosie, tijdelijk (maanden) $L > 10^8 L_{\text{zon}}$
6. Later zien we supernova resten, ala Krab-nevel
7. In centrum blijft neutronen ster of zwart gat over.

Vorming van zware elementen tijdens de SuperNova explosie

Door snelle neutronen vangst

1. Aan het eind van de Si-fusie fase als sterkern weer gaat krimpen, stijgt T tot 3 miljard K!
2. Bij die T zijn de fotonen zo energie-rijk, dat ze Si atomen kunnen afbreken :
 $\text{Si} \rightarrow \text{Mg} \rightarrow \text{Ne} \rightarrow \text{O} \rightarrow \text{C} \rightarrow \text{He} \rightarrow \text{H}$
Daarbij ontstaan ook veel neutronen (protonen zonder elektrische lading)
3. Neutronen zeer snel worden ingevangen in bestaande atomen:
4. Daardoor worden er door het spervuur van neutronen van lichte atomen heel zware atomen gemaakt, met neutronen-rijke kernen.

Voorbeeld van neutronen vangst



1. Begin met ^{56}Fe : lading = 26, aantal neutronen = 30
2. Neutronen vangst: $^{56}\text{Fe} + n + n + n = ^{59}\text{Fe}$ met 33 neutr
3. Maar ^{59}Fe is instabiel : een neutron vervalt tot proton
4. Dus dan krijg je lading 27 = ^{59}Co

Voorbeelden van neutronen vangst

r = rapid = snelle neutronen vangst

s = slow = langzame neutronenvangst

s-process and r-process



- stable isotopes



- s-process



- r-process



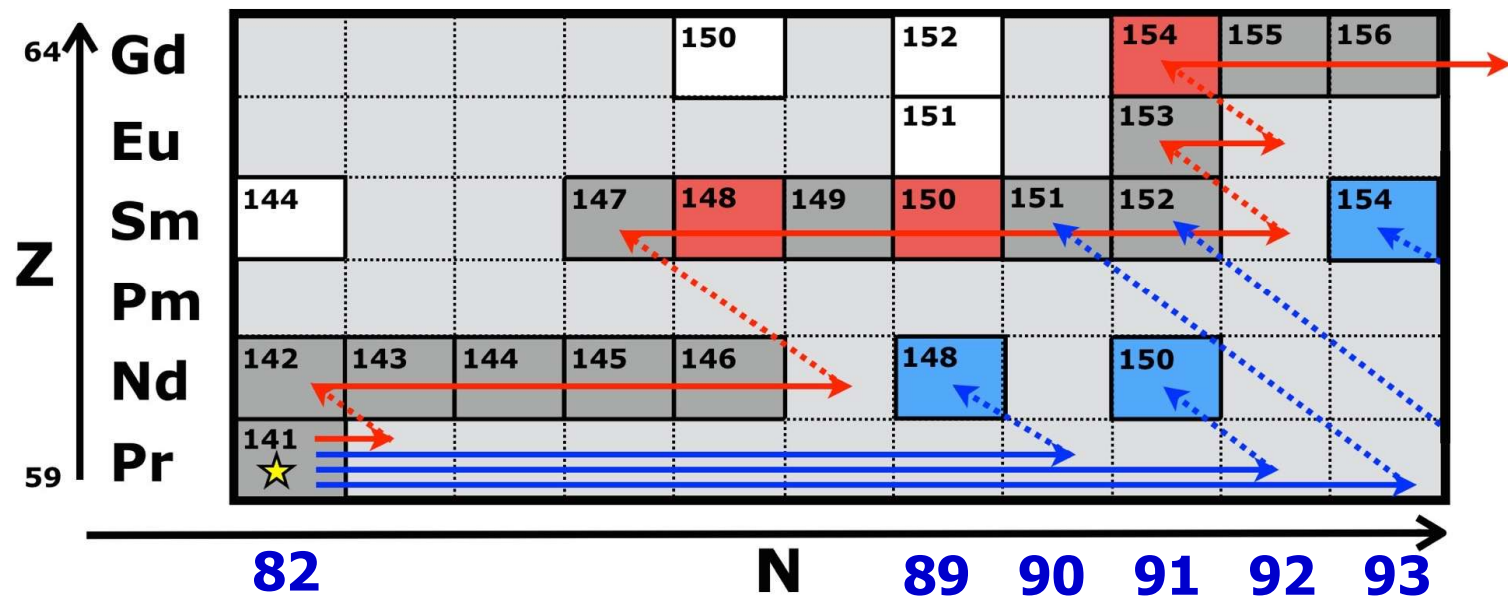
- r-process only



- s-process only



- neither process



Elementen gevormd door neutronen vangst

Door langzame neutronenvangst :

Zirconium (Zr), Strontium (Sr), Barium (Ba), Lood (Pb)

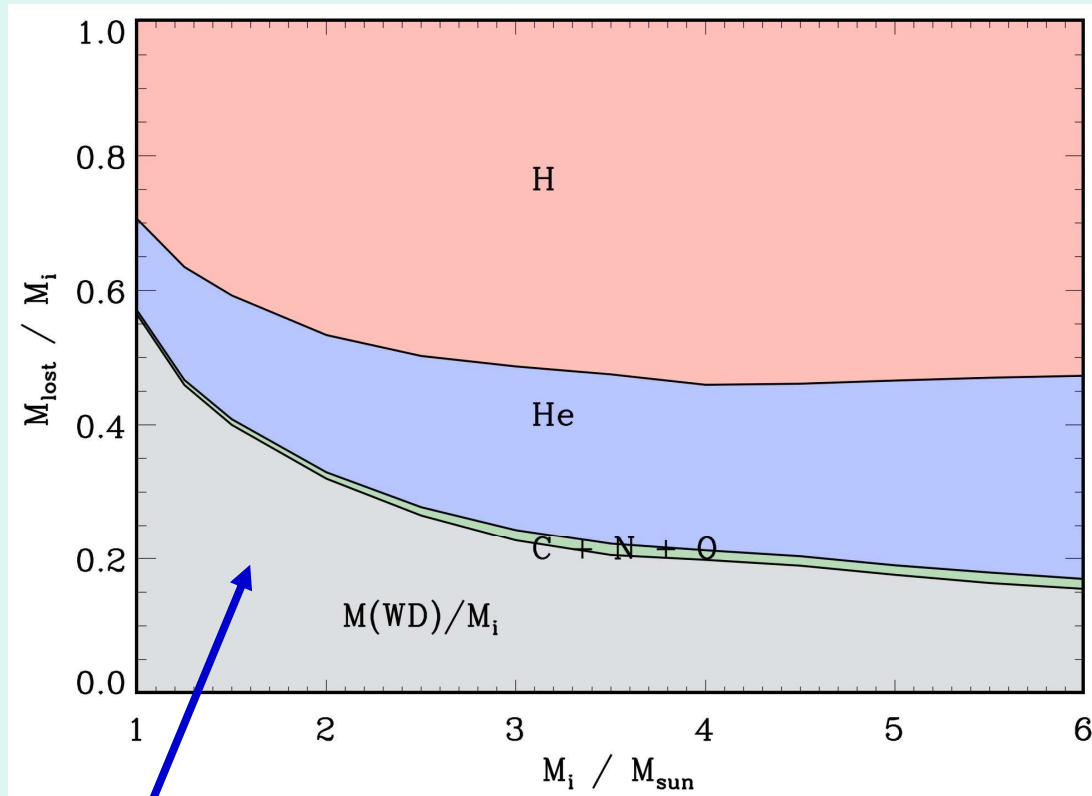
Door snelle neutronenvangst:

Goud (Au), Europium (Eu), Xenon (Xe), Platinum (Pt)

Plus nog vele andere!

Uitgestoten elementen door lichte sterren

Fractie van oorspronkelijke massa

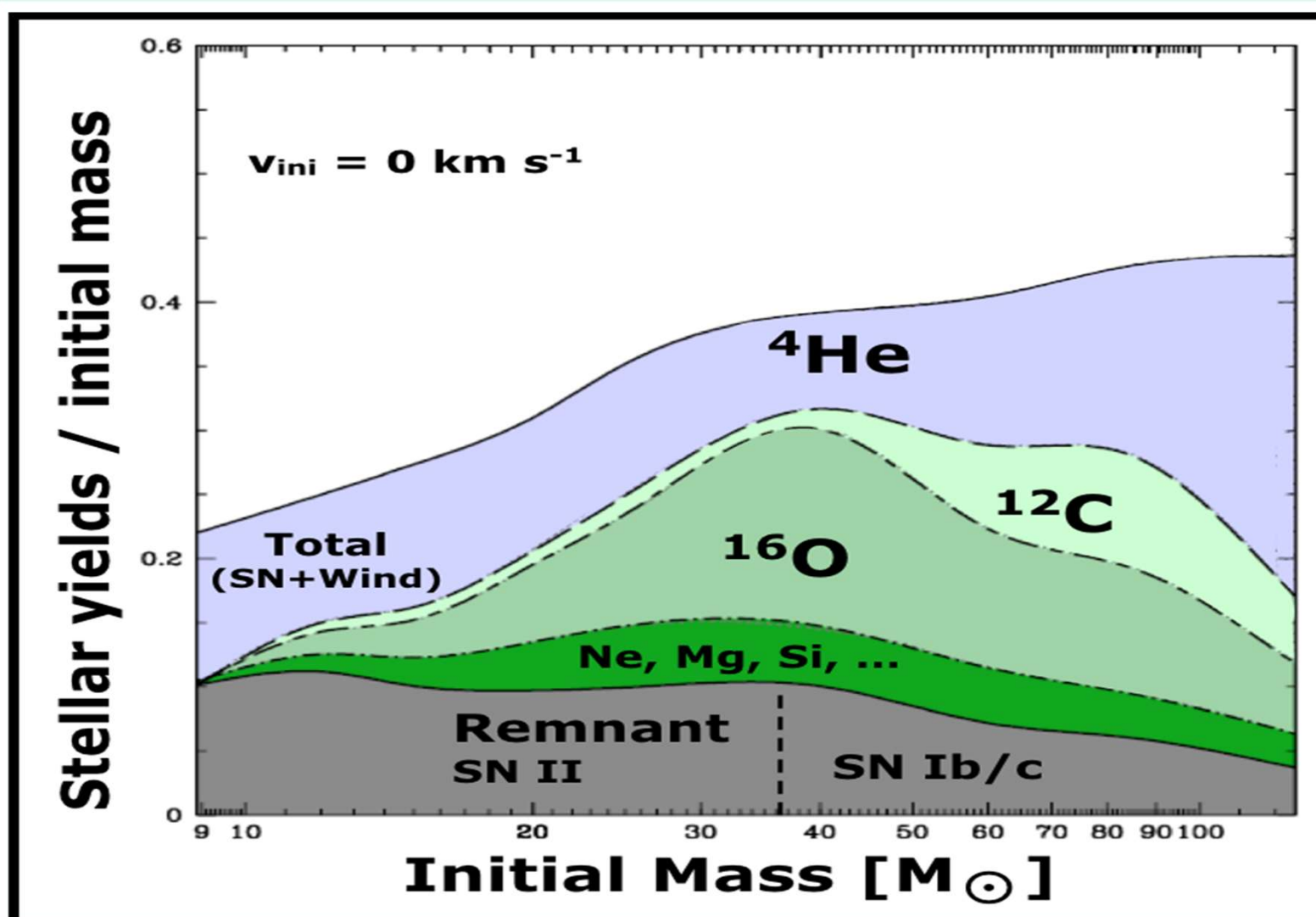


Begin massa

**Dit is
allemaal
weggeblazen
door de
sterrenwind**

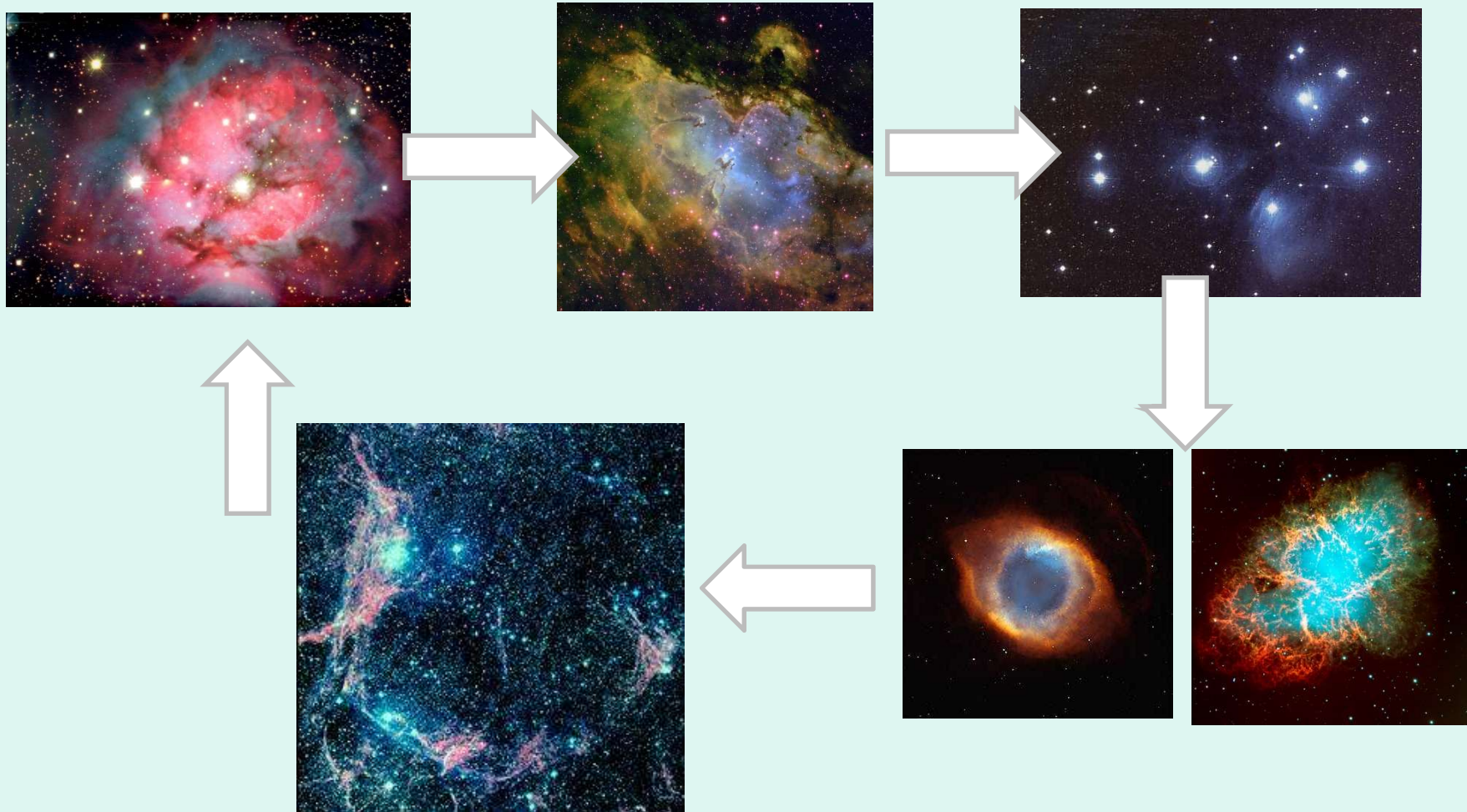
Dit blijft achter in witte dwerg

Uitgestoten elementen door zware sterren



De cyclus is rond:

Sterren ontstaan uit gaswolken en leveren aan het einde van hun leven weer gas voor de vorming van nieuwe wolken, maar dan **chemisch verrijkt** met fusie producten !



Waar komen de chemische elementen vandaan?

- H** gevormd in Oerknal (aanvankelijk 76 %) afgebroken in sterren (tot 70%)
- He** voornamelijk in Oerknal (aanvankelijk 24%) verrijkt door sterren van 1 tot 30 Mzon (tot 28%)
- C** verrijkt door zware sterren en door lichte sterren
- O** verrijkt in zware sterren en uitgeblazen als sterrenwind en in Supernova explosies
- Fe en zwaarder:** gevormd tijdens SN explosie

That's all, folks !!!

THE END

DE MENS TUSSEN DE STERREN

WIJ ZIJN GEMAAKT VAN STERRENSTOF



Prof. Henny J.G.L.M. Lamers
Sterrenkundig Instituut
Universiteit van Amsterdam

AstroBoekjes: deel 1

AstroBoekje 1

**De Mens tussen de
Sterren:
wij zijn gemaakt van
sterrenstof**

21e druk

Januari 2019

20 geïllustreerde pagina's

Hier: Euro 5,00

Ik signeer op verzoek

Ook te bestellen via mijn
website

www.hennylamers.nl voor € 7,50