



Universidade Federal do ABC

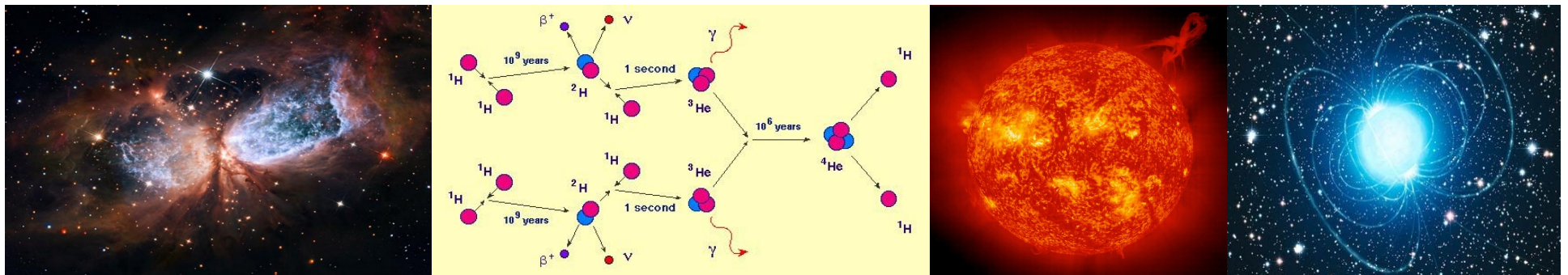
# Introdução à Física Estelar

## 11. Evolução Estelar

Prof. Pieter Westera

[pieter.westera@ufabc.edu.br](mailto:pieter.westera@ufabc.edu.br)

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Estelar.html>



# Evolução Estelar

Aula Interiores Estelares:

## Resultados dos Modelos Estelares

- O **destino** de uma estrela é determinado pela sua **massa** (e um pouquinho pela sua composição química).
- Quanto **maior** é a **massa** da estrela, tanto **maior** as **densidade, pressão e temperatura** no **interior**,  
=> tanto **mais rapidamente** decorre a sua **evolução** (incl. a sua evolução proto-estelar => aula anterior), e tanto **mais elementos** podem ser formados no seu caroço ou nas camadas a cima deste.

# Evolução Estelar

$M < 0.072 M_{\odot}$ :

$T_{\text{caroço}} < 10^7 \text{ K} \Rightarrow$  não ocorre fusão nuclear estável  
 $\Rightarrow$  “estrela frustrada”, Anã Marrom, “Jupiter” ( $\Rightarrow$  aula anterior)

$M > \sim 150 M_{\odot}$ :

Fusão já começa antes da relaxação da estrela  
 $\Rightarrow$  Estrela se desfaz antes de se formar ( $\Rightarrow$  aula anterior)

$0.072 M_{\odot} < M < \sim 150 M_{\odot}$ :

$T_{\text{caroço}} > 10^7 \text{ K} \Rightarrow$  ignição do H  $\Rightarrow$  fusão nuclear

$\Rightarrow$  Estrela comum, “estrela anã” como o Sol

-  $0.072 M_{\odot} < M < \sim 8 M_{\odot}$ : estrelas de baixa massa

-  $\sim 8 M_{\odot} < M < \sim 150 M_{\odot}$ : estrelas de alta massa

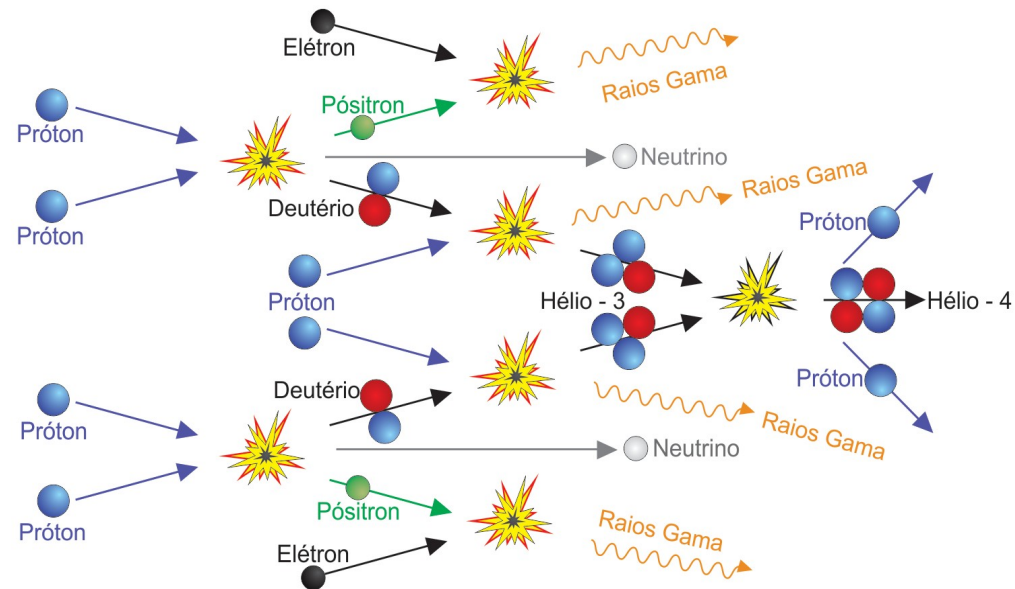
! Os limites entre as faixas de massa podem diferir muito de acordo com a fonte consultada. Alguns astrônomos ainda usam uma faixa de estrelas de massa intermediária.

# Evolução Estelar

## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

$T_{\text{caroço}} > 10^7 \text{ K}$ :

No caroço se forma  
hélio pelo **ciclo p-p**  
(=> aulas  
Nucleossíntese)



$$M_{\text{He}} \sim 0.993 \cdot 4 \cdot M_{\text{H}}$$

=> **perda de massa** => **Energia liberada**  
(já que massa é energia, segundo  $E = m \cdot c^2$ )

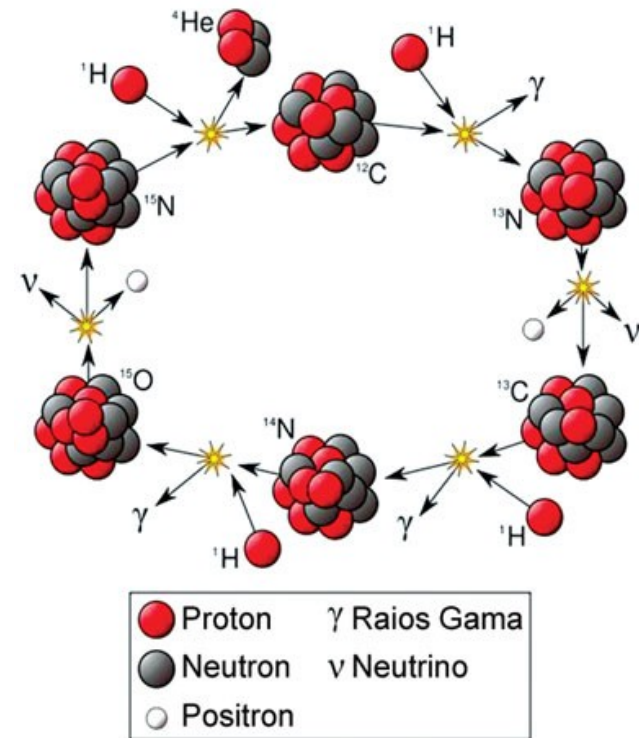
=> **Fonte quase inesgotável de energia**

$$\varepsilon \text{ prop. } T^4$$

# Evolução Estelar

## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

Caso  $M > 1.2 M_{\odot}$ , a temperatura no núcleo chega a  $15 \cdot 10^6$  K, tão alta, que a transformação de H em He pode ocorrer pelo **Ciclo CNO** ( $\Rightarrow$  Nucleossíntese).

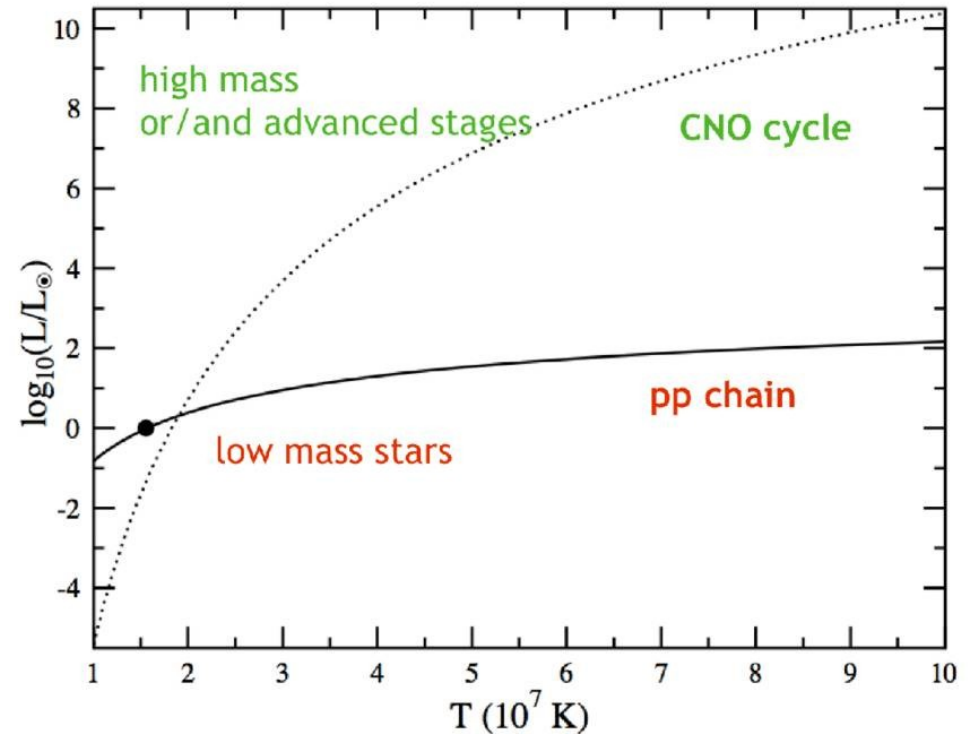


# Evolução Estelar

## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

Já que o ciclo CNO é muito mais dependente da temperatura que a cadeia p-p:  $\epsilon$  prop.  $T^{19.9}$

=> A partir de  $17 \cdot 10^6$  K, o ciclo CNO domina.



# Evolução Estelar

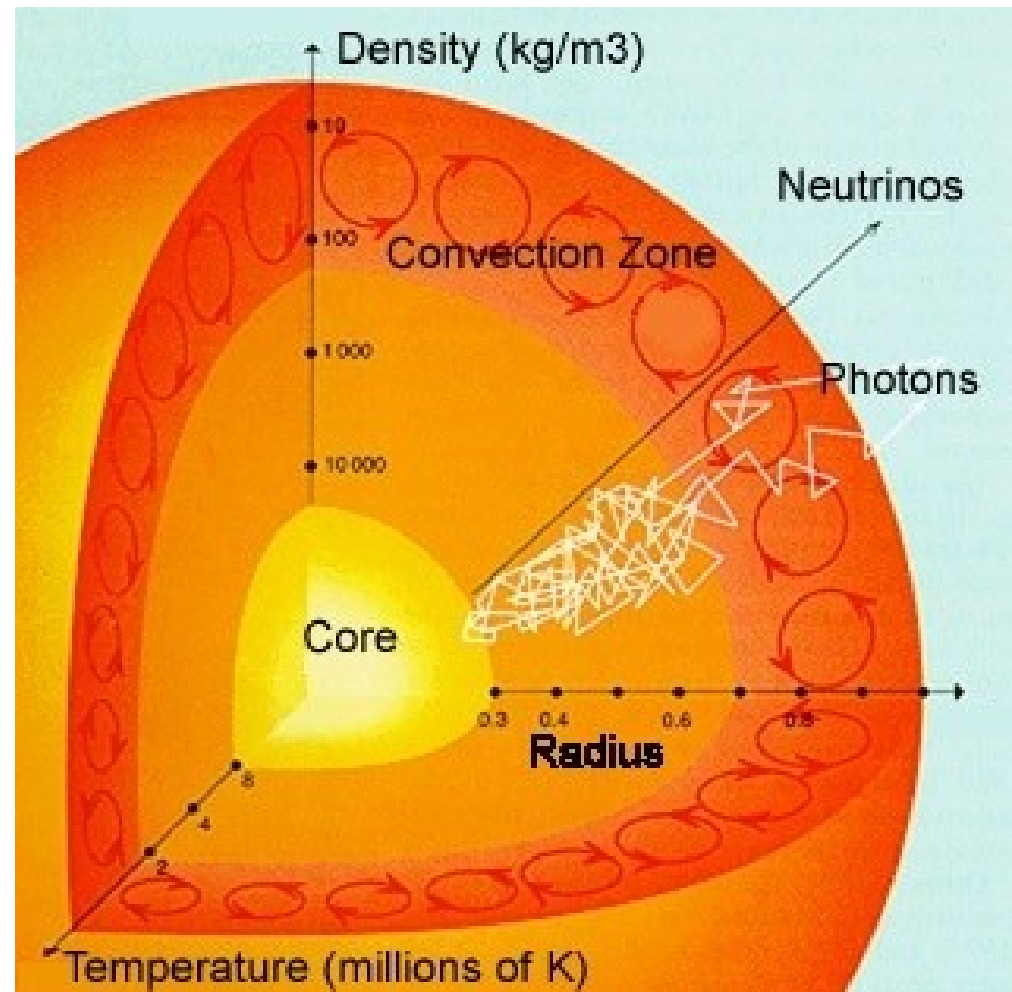
## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

Transporte de **energia**  
de **dentro** para **fora**

=> **Luz escapa**,  
a estrela **brilha**

=> **Estrela “anã”**, ou da  
Sequência Principal  
do tipo do Sol,  
brilhando por  
bilhões de anos,  
80 - 90 % da vida  
inteira da estrela.

Equilíbrio, parada no diagrama HR (=> aula Sol)



# Evolução Estelar

## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

Dependendo da **massa** da estrela, o transporte de energia do núcleo para fora ocorre por **radiação** ou **convecção** em **regiões diferentes** da estrela.

Lembrete (aula Interior das Estrelas II):

condição para que **convecção** pode acontecer:

$$\left| \frac{dT}{dr} \right|_{\text{act}} > \left| \frac{dT}{dr} \right|_{\text{ad}}$$

Na prática:

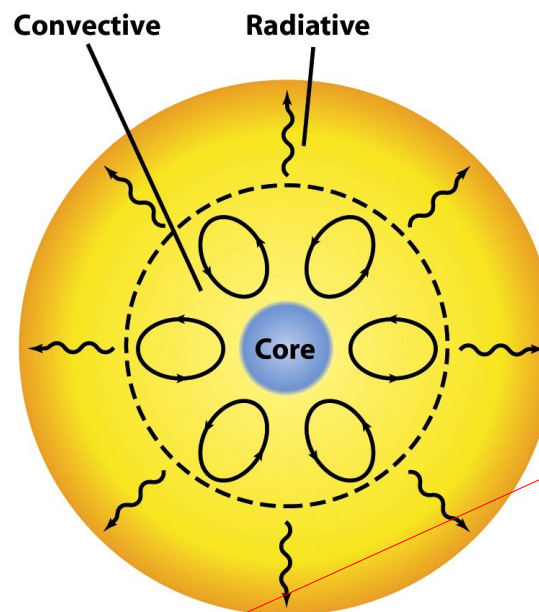
- Onde a **opacidade** do gás é **alta**
- Em zonas de ionização
- Onde a taxa de **fusão nuclear** depende **fortemente** da **temperatura** (i.e. nos processos triplo  $\alpha$  ou ciclo CNO).

# Evolução Estelar

## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

Em estrelas de massa  
>  $1.2 M_{\odot}$  ocorre o  
ciclo CNO no núcleo  
=> **convecção** no **núcleo**

Mais pra fora, radiação  
dá conta do transporte  
de energia  
=> **radiação** nas **camadas  
externas**



**Mass more than about  $4 M_{\odot}$ :**  
Energy flows by convection in  
the inner regions and by  
radiation in the outer regions.

Figure 18-12a  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W. H. Freeman and Company

O valor exato deste limite depende do modelo usado,  
e varia entre fontes

# Evolução Estelar

## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

Se  $M < 1.2 M_{\odot}$  (i.e. o Sol)

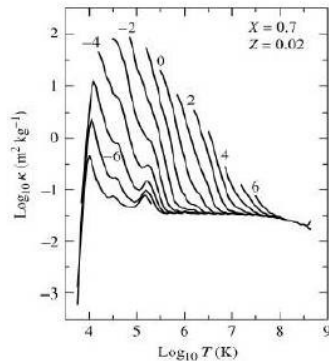
=> ciclo p-p domina

=> **núcleo radiativo**

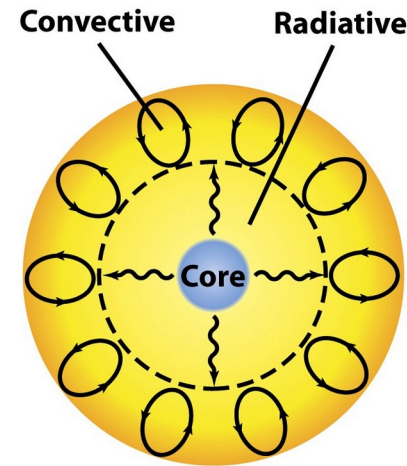
Perto da superfície, temperaturas baixas

=> alta opacidade

=> **convecção nas camadas externas**

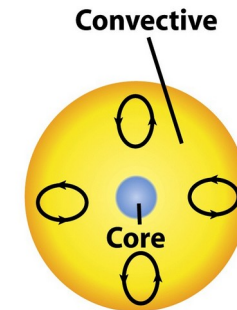


—  $\rho$ , os rótulos das curvas significam o logaritmo da densidade (em  $\text{kg m}^{-3}$ )



**Mass between about  $4 M_{\odot}$  and  $0.4 M_{\odot}$ : Energy flows by radiation in the inner regions and by convection in the outer regions.**

Figure 18-12b  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W. H. Freeman and Company



**Mass less than  $0.4 M_{\odot}$ : Energy flows by convection throughout the star's interior.**

Figure 18-12c  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W. H. Freeman and Company

Nas estrelas de mais baixa massa ainda ( $M < 0.3 M_{\odot}$ ), esta zona se estende até o centro => **convecção na estrela inteira**

Para este limite, idem

# Evolução Estelar

## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

A **luminosidade aumenta** com a massa:

$L \text{ prop. } M^{3.3}$ ,

e o **raio** também:

$R \text{ prop. } M^{0.78}$ .

Usando

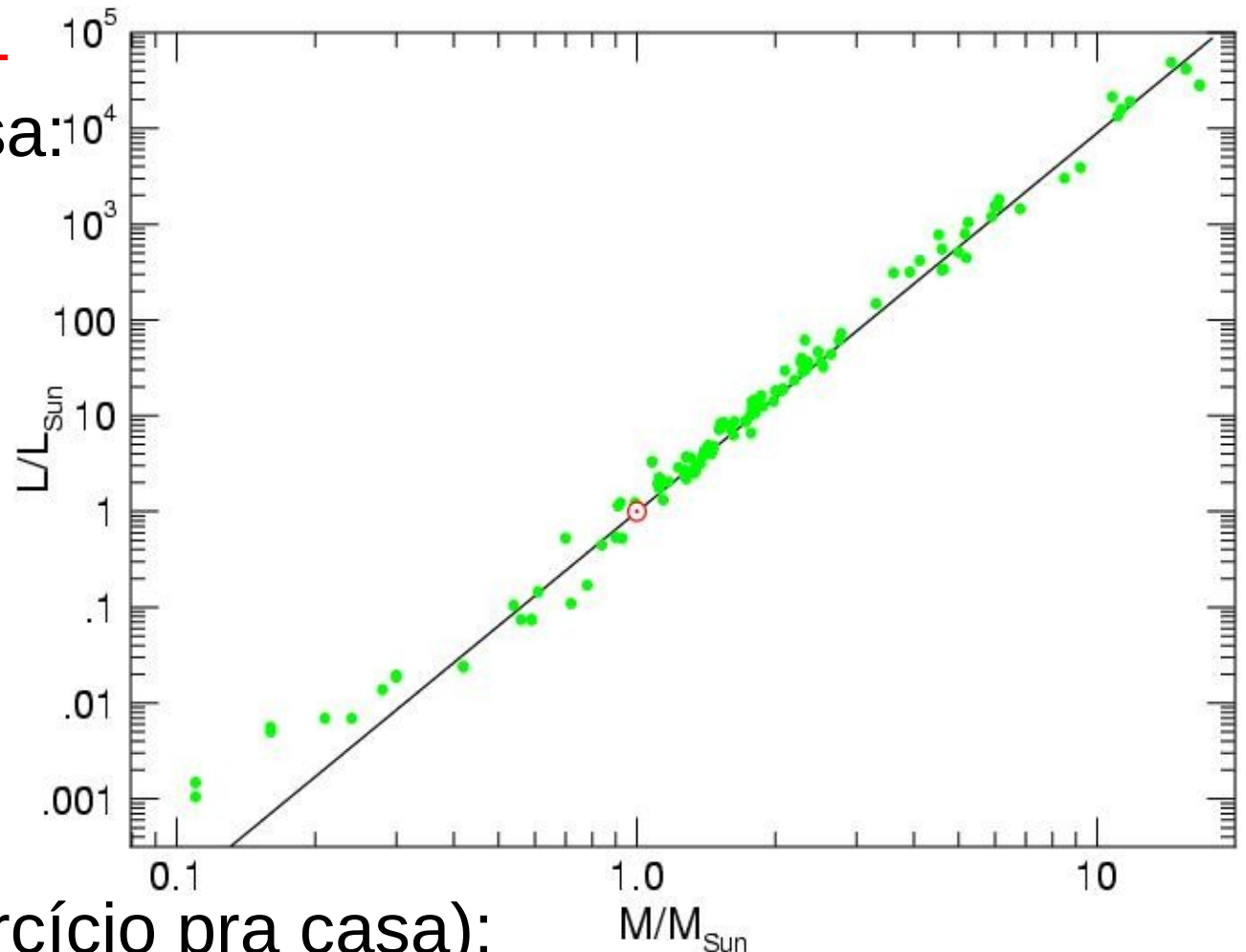
$L \text{ prop. } R^2 T^4$

vemos que a

**temperatura**  
também **aumenta**

com a **massa** (exercício pra casa):

$T \text{ prop. } M^{0.435}$

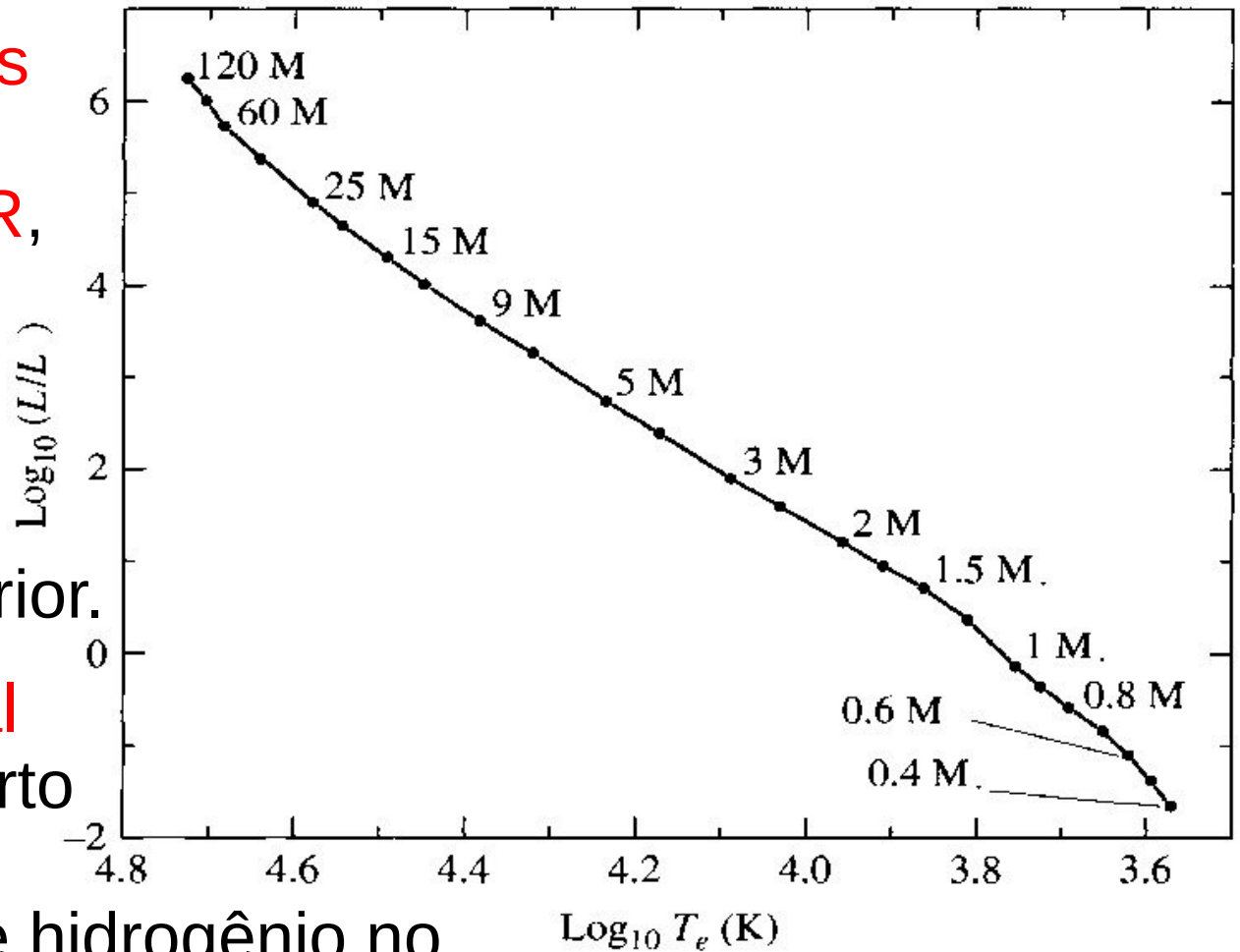


# Evolução Estelar

## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

Isto coloca as **estrelas** desta **1ª fase** num **ramo** no **diagrama HR**, chamado **Sequência Principal**, com as estrelas de maior massa no canto esquerdo superior.

A **Sequência Principal** corresponde a um certo **estágio evolutivo** das estrelas (a queima de hidrogênio no núcleo), com a **massa variando** ao longo da sequência (não é uma sequência evolutiva).

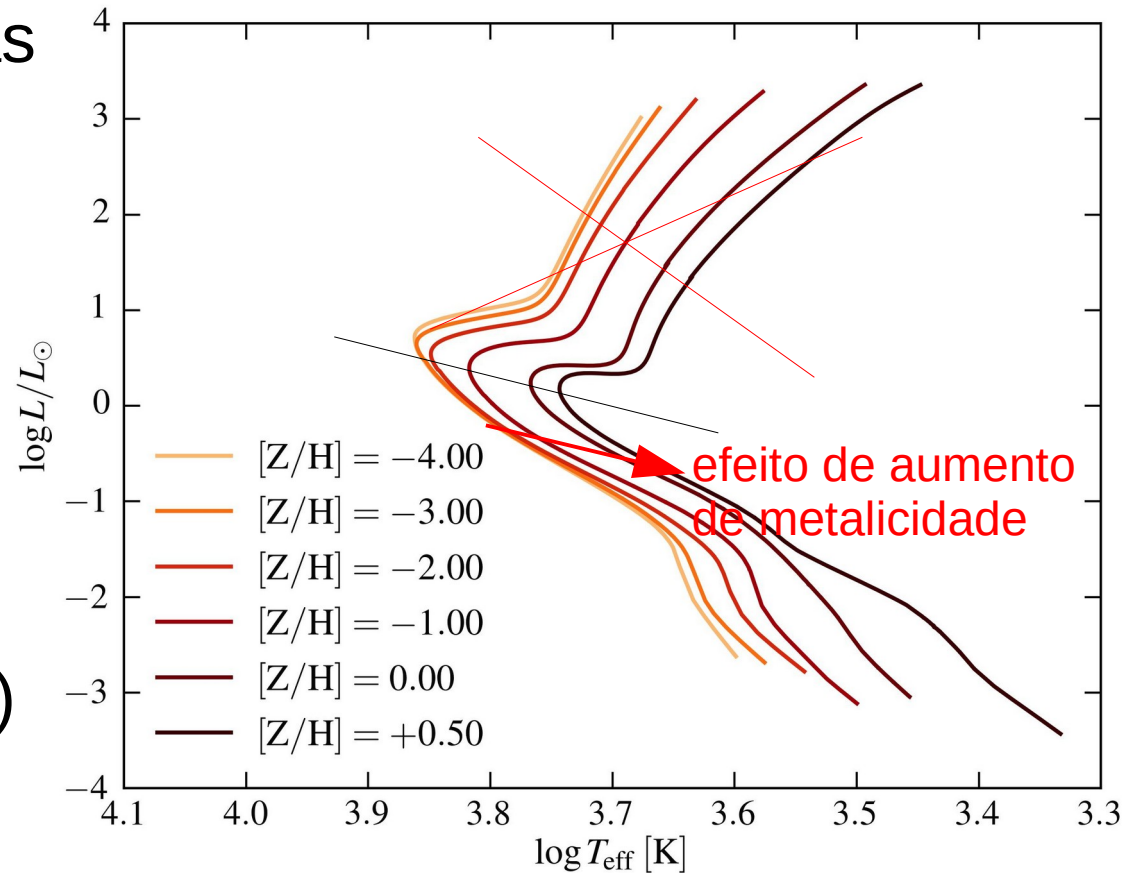


# Evolução Estelar

## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

A **metallicidade** das estrelas também influencia na **forma e posição** da Sequência Principal (e dos demais ramos):

Normalmente, em um dado ambiente (a vizinhança solar, ou algum aglomerado estelar) as estrelas têm praticamente a **mesma metallicidade** (vide mais pra frente)

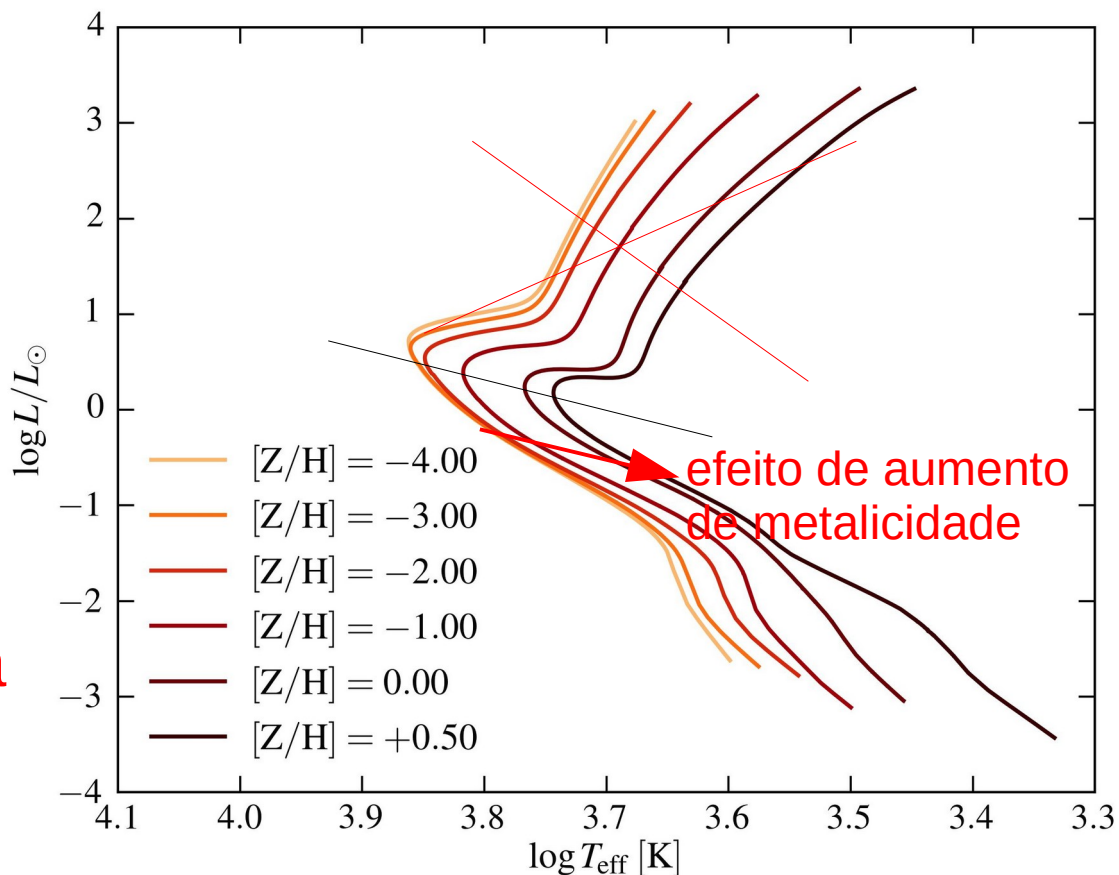


# Evolução Estelar

## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

Estrelas **ricas** em **metais** são mais **vermelhas** que as pobres em metais da **mesma massa**:

- **Maior número de elétrons por átomo** com aumento da metalicidade
- => aumento da **opacidade**
- => maior **pressão radiativa**
- => maior **raio**
- => **menor temperatura**
- => mais **vermelha**



(ignorem a parte de cima do gráfico, que representa estrelas que já saíram da Sequência Principal)

# Evolução Estelar

## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

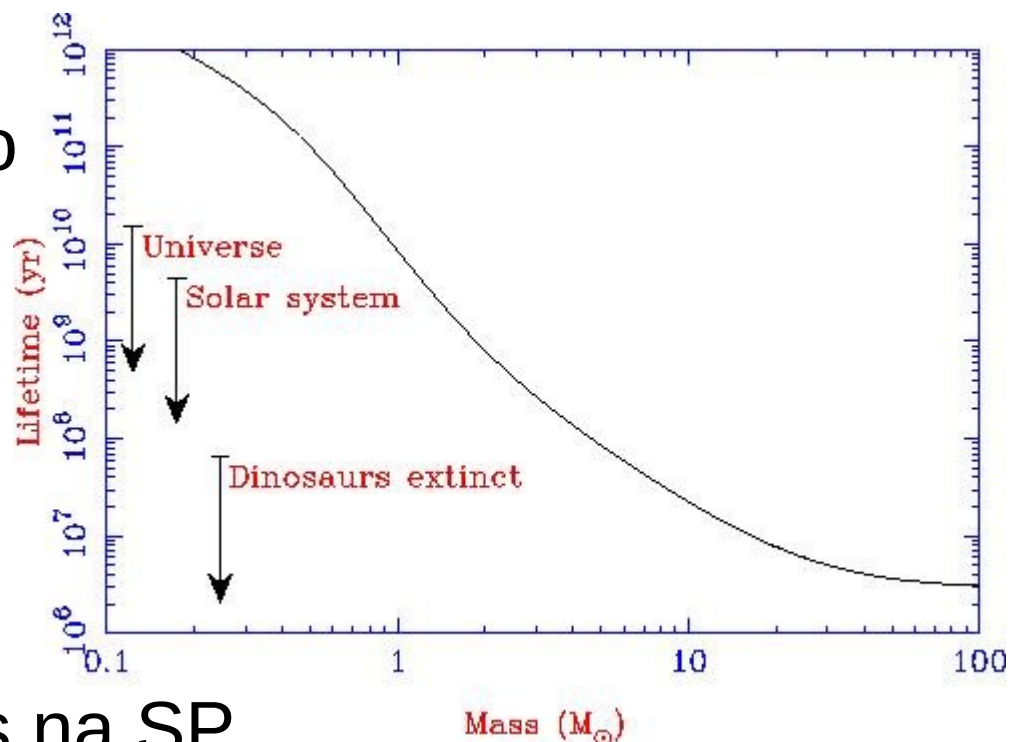
Usando  $L \propto M^{3.3}$ ,  
conseguimos estimar, como  
o **Tempo de Vida** na **SP**,  
 $\tau$ , depende da **massa**:

$\tau = \text{Energia disponível} /$   
 $\text{taxa de energia emitida}$   
 $\propto M/L \propto M^{-2.3}$ .

=> O Sol vive ~10 bio. anos na SP.

Todas as estrelas com  $< \sim 0.85 M_{\odot}$  ainda estão na SP.

A Sequência Principal corresponde a 80 % a 90 % da vida de uma estrela, e 90% das estrelas observadas estão na SP.



# Evolução Estelar

## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

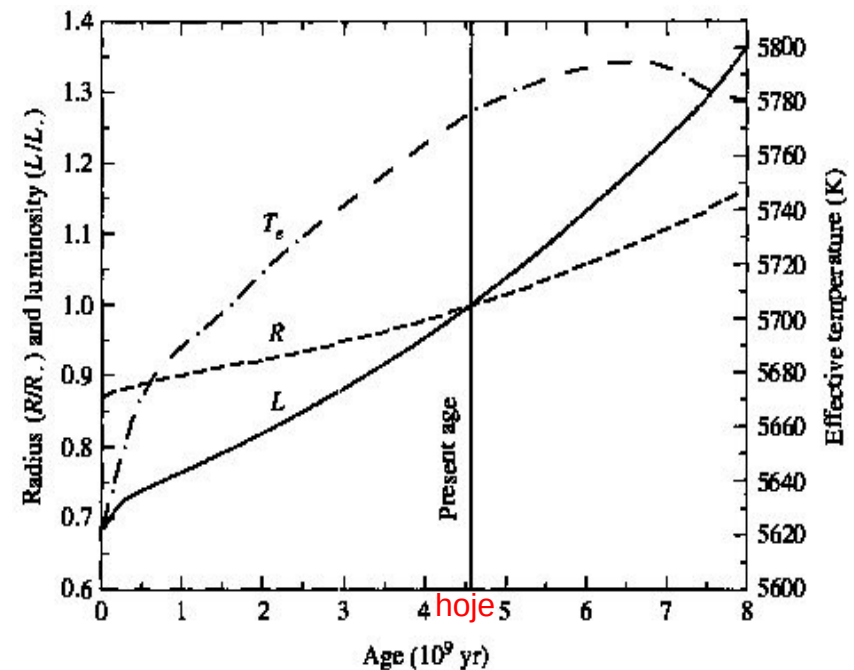
Uma estrela na Sequência Principal está parada no diagrama HR só na primeira aproximação.

Durante esta fase, elas **mudam**, sim, **lentamente** suas propriedades como **luminosidade**, **temperatura** na superfície, etc.

Lembram que no Sol

- $L$  aumentou por ~50 %,
- $R$  por 15 % e
- $T_e$ , de 5620 K para 5777 K desde sua formação?

Por quê esta evolução lenta?



# Evolução Estelar

1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

No núcleo, hidrogênio é transformado em hélio.

=> a massa molecular média  $\bar{m} = \mu m_H$  aumenta.

Pela lei dos gases ideais:  $\mu = \rho k_B T / m_H P_g$

Para isto aumentar,  $\rho$  ou  $T$  tem que aumentar, ou  $P_g$  diminuir.

O que acontece é o último: A pressão do gás diminui e o núcleo se contrai, o que libera energia gravitacional potencial.

# Evolução Estelar

1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

Em estrelas de **baixa massa**

Teorema do virial: Metade da energia liberada é irradiada para fora e metade **esquenta** o gás do núcleo e da **camada acima**.

=> A **zona** de **queima** de H **aumenta**.

Já que  $\epsilon_{pp} \approx \epsilon_{0,pp} X^2 \rho T^4$ , a **luminosidade** da estrela **aumenta** ( $T^4$  aumenta muito mais, do que  $X^2$  diminui), junto com o **raio** e a **temperatura** (vide o Sol).

# Evolução Estelar

## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

Em estrelas de **alta massa**

Estas têm um **núcleo convectivo**, o que mantém o núcleo **homogêneo** e não permite, que a **zona de queima de hidrogênio** aumente.

Pelo contrário, ela **diminui** e junto com ela a zona convectiva, causando um gradiente de composição química.

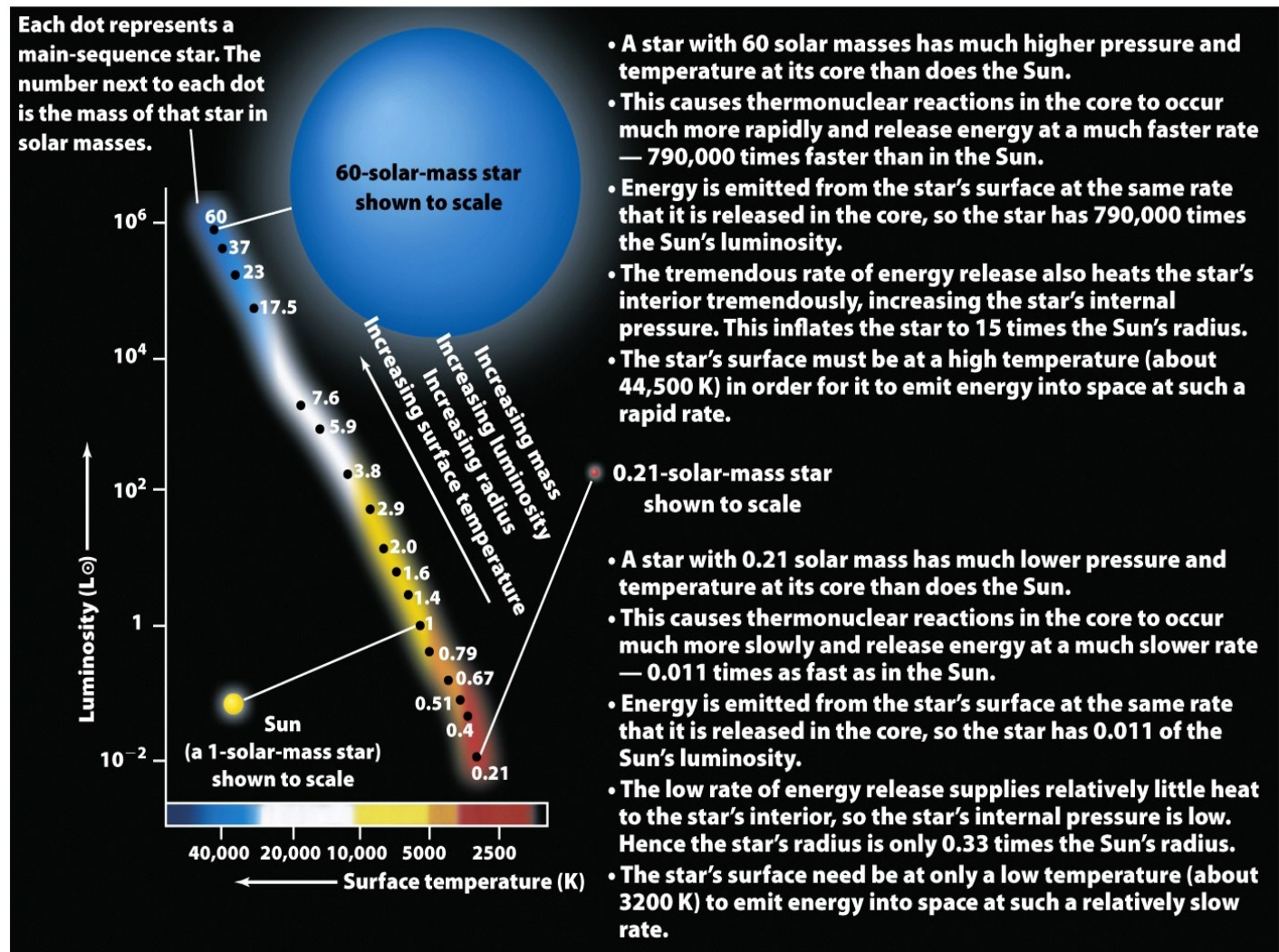
Certa hora antes que o H no centro se esgota, a **zona convectiva some**, e logo depois, a **queima de H para** (quando  $X \leq 0.05$ ).

O **núcleo se contrai mais**, libera mais energia potencial, o **envelope cresce** mas com temperatura diminuindo (?).

# Evolução Estelar

## 1ª fase: Queima de Hidrogênio (Sequência Principal)

### Resumo da Sequência Principal



# Evolução Estelar

## Anãs Azuis e Anãs Brancas de Hélio

Quando o **Hidrogênio** no **caroço** se **esgota** ( $< 0.5 M_{\odot}$ ):

- Se a estrela tiver **menos** que  $0.5 M_{\odot}$ , ela **nunca** alcançará a **temperatura** necessária para começar o **próximo processo de fusão nuclear** (o processo  $\alpha$  triplo, vide aula Nucleossíntese).

Segundo modelos estelares, ela passará por uma fase chamada **Anã Azul** e “morrerá” como **Anã Branca** de **hélio**.

Porém, a “vida” na Sequência Principal de uma estrela de menos que  $0.5 M_{\odot}$  demora mais que a idade atual do Universo, tal que ainda não devem existir Anãs Azuis e Anãs Brancas de hélio formadas desta maneira.

As Anãs Brancas de Hélio observadas devem ter outra origem (estrelas com núcleos de hélio que perderam as camadas externas por interação com outras estrelas).

# Evolução Estelar

## 2ª fase: Gigante Vermelha

Quando o **Hidrogênio** no **caroço** se **esgota** ( $> 0.5 M_{\odot}$ ):

Melhor dito: quando a densidade de partículas no núcleo diminui demais para suportar as camadas exteriores da estrela, isto é, quando a **massa molecular média** no **núcleo** fica **alta** demais.

Isto acontece, quando o **núcleo** de **He** alcança uma **massa limite** chamada **limite de Schönberg-Chandrasekhar** (dedução de 4 páginas no livro, vamos deixar pra lá):

$$\left(\frac{M_{ic}}{M}\right)_{SC} \simeq 0.37 \left(\frac{\mu_{env}}{\mu_{ic}}\right)^2,$$

onde  $\mu_{ic}$  e  $\mu_{env}$  são as massas moleculares médias no núcleo isotérmico e no envelope.

Com  $\mu_{ic} \sim 1.33$  e  $\mu_{env} \sim 0.6$  (aula interiores estelares),  $M_{SC} \sim 0.1$ .

# Evolução Estelar

## 2ª fase: Gigante Vermelha

Quando o **Hidrogênio** no **caroço** se **esgota** ( $> 0.5 M_{\odot}$ ):

- O **caroço** se **contraí**.
- A **camada acima** “cai” em cima do caroço, se esquentada e começa a **queimar hidrogênio**.
- O **envelope** se esquentada e **expande**.  
Em reação, a **superfície esfria**.

=> A estrela passa por uma fase de transição chamada **Subgigante**, ...

Para estrelas a cima de  $1.25 M_{\odot}$ , a fase de Subgigante é tão curta, que raramente flagramos uma estrela nesta faixa de massa durante esta fase.

# Evolução Estelar

## 2ª fase: Gigante Vermelha

..., e, chegando no limite de Hayashi (=> aula anterior) se torna uma **Gigante Vermelha**.

Resfriar mais tornaria a estrela instável (ela passaria pelo limite de Hayashi).

=> A partir de lá ela **cresce a temperatura ~constante**.

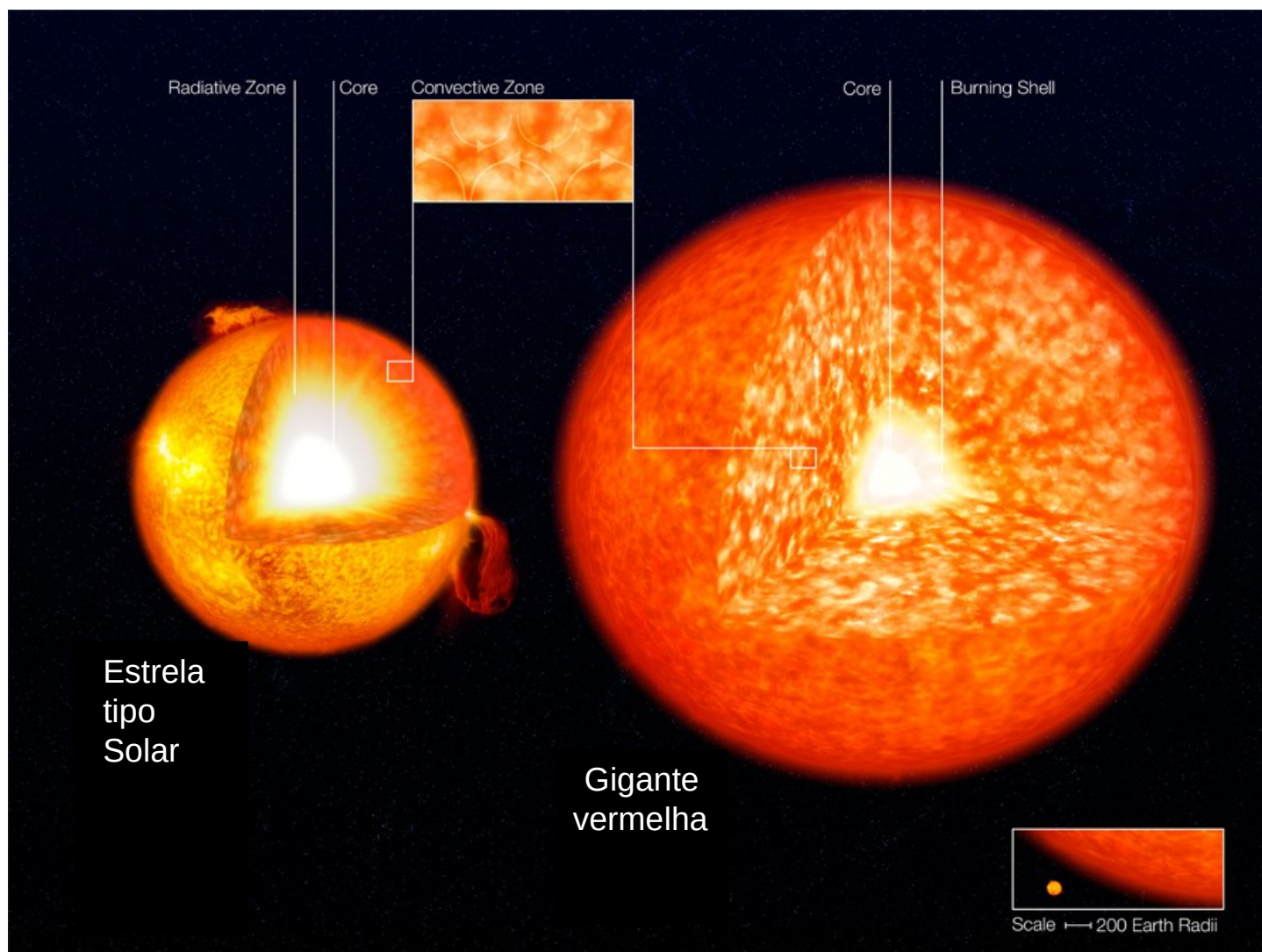
Além do aumento de tamanho, esta fase é caracterizada por **ventos fortes**.

Enquanto isto, o **caroço** continua se **aquecendo**.

# Evolução Estelar

## 2ª fase: Gigante Vermelha

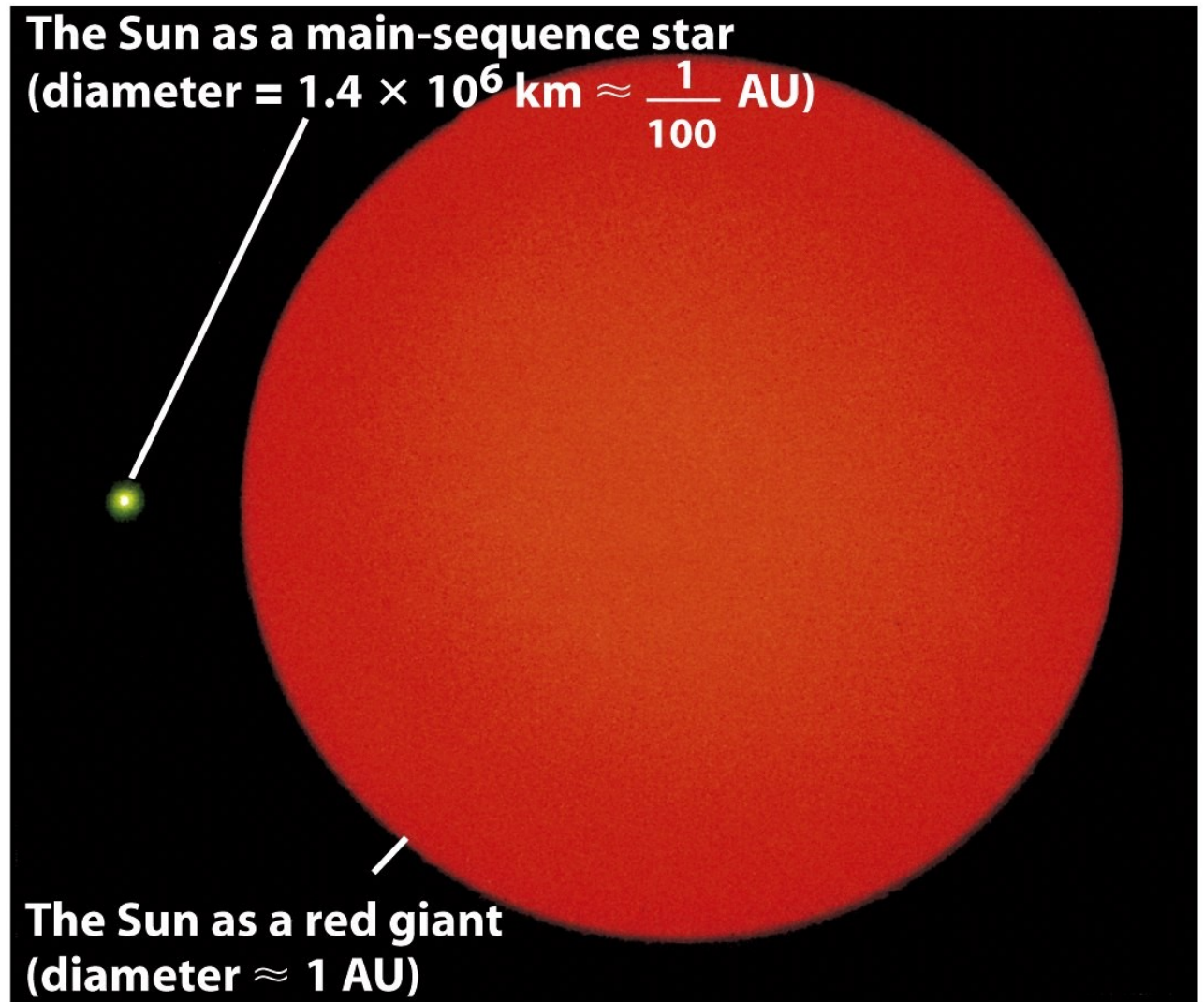
Comparação da **estrutura** do **Sol** atual com a **Gigante Vermelha** que ele será, ...



# Evolução Estelar

## 2ª fase: Gigante Vermelha

... e do seu tamanho antes e depois.

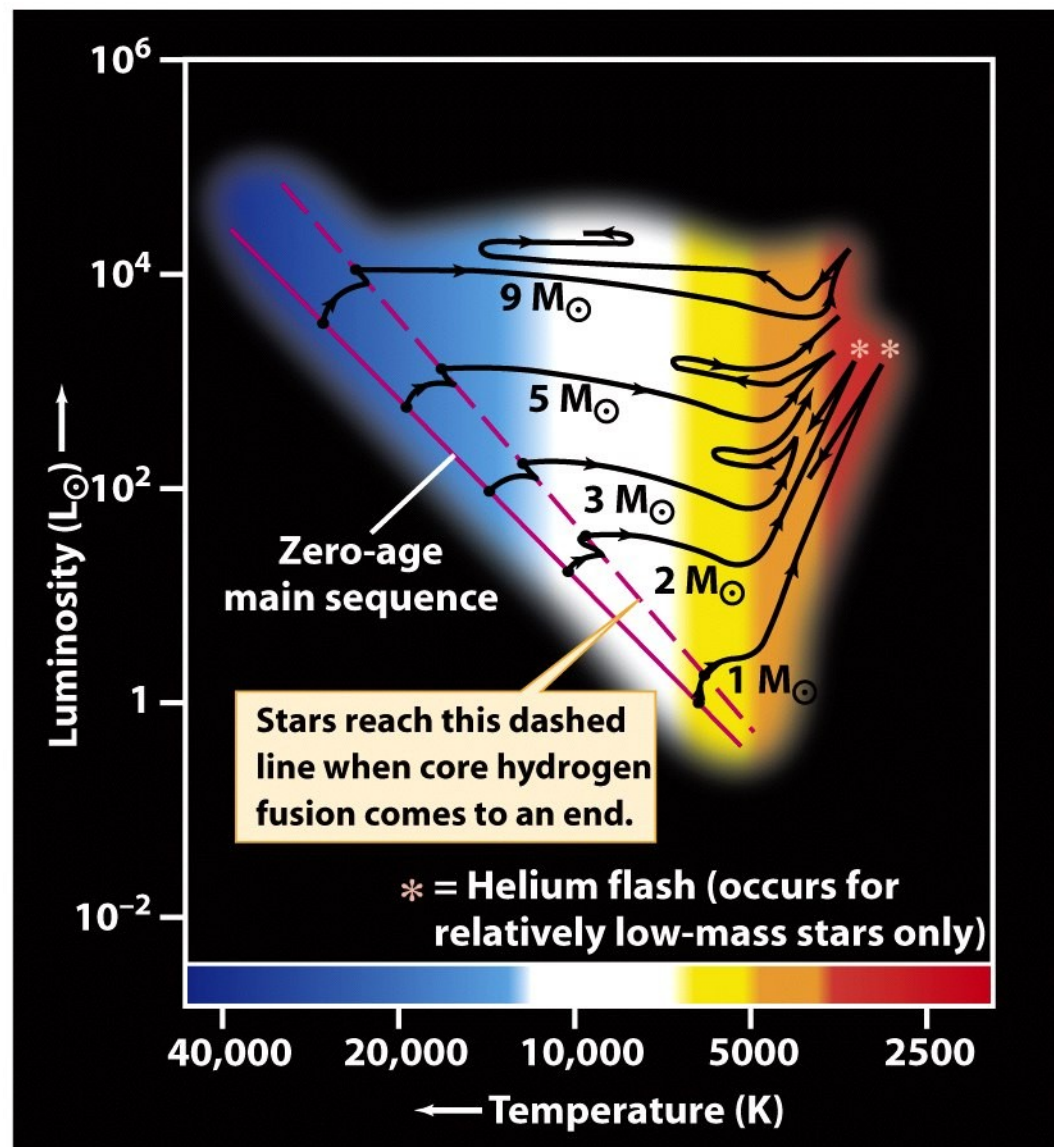


The Sun today and as a red giant

# Evolução Estelar

## 2ª fase: Gigante Vermelha

Já que a **temperatura cai**, e no final, o **tamanho** e com este, a **luminosidade aumenta**, as estrelas fazem um caminho pra direita (Subgigantes), e depois pra cima (Gigantes Vermelhas) no diagrama Hertzsprung-Russell.

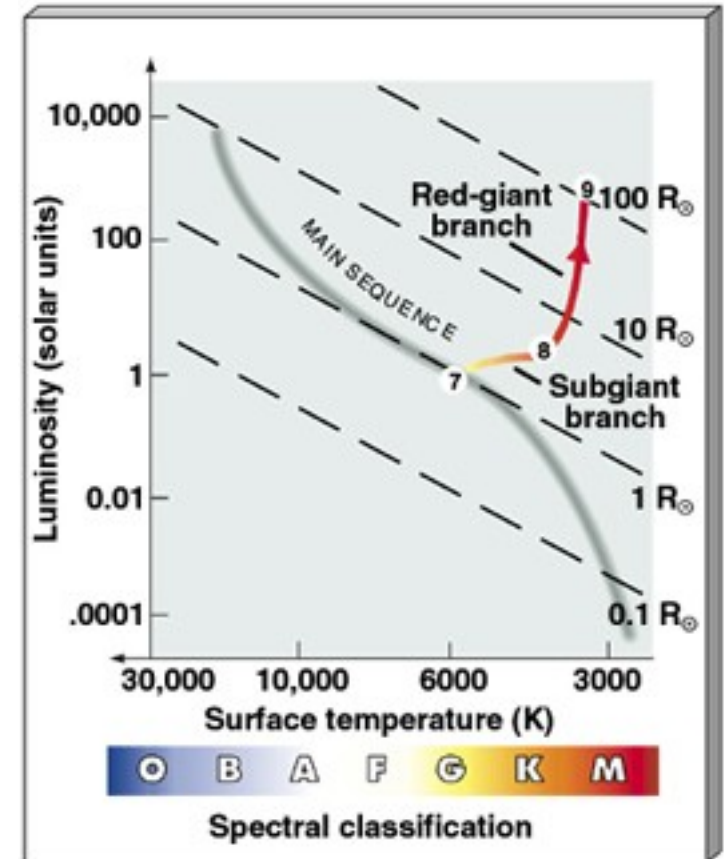


Post-main-sequence evolutionary tracks of five stars with different mass

# Evolução Estelar

## 2ª fase: Gigante Vermelha

As estrelas de massas diferentes, e, por isto, em fases diferentes da evolução Sequência Principal - Subgigante - Gigante Vermelha (já que elas saíram da Sequência Principal em momentos diferentes) compõem os **Ramos** de **Subgigantes** e de **Gigantes Vermelhas**.



# Evolução Estelar

## 3ª fase: Queima de Hélio

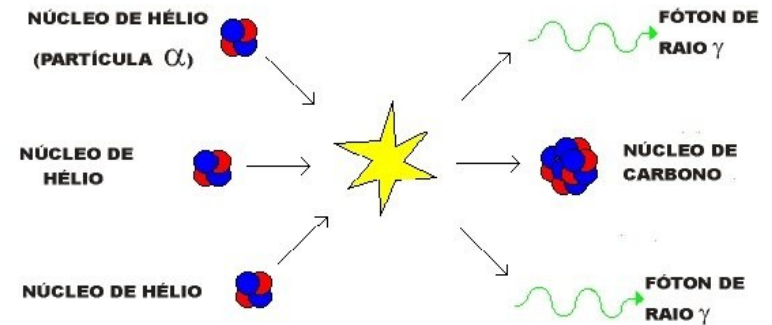
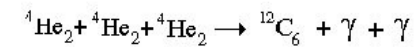
Quando  $T_{\text{caroço}} > 10^8$  K:

No caroço se forma **carbono**,  
pelo processo  **$\alpha$  triplo**  
(=> aulas Nucleossíntese).

Lembrete:

É aquele “choque de três partículas” que é **raro**, até nas temperaturas certas, e é considerado o “gargalo” da nucleossíntese, tal que e a **formação** de um montante significativo de **carbono** demora **mi. de anos**.

### PROCESSO ALFA-TRIPLO



Quando a temperatura nas regiões centrais da estrela atinge uns 100 milhões de graus, inicia-se o processo alfa-triplo pelo qual 3 núcleos de Hélio se fundem para formar um núcleo de Carbono

# Evolução Estelar

## 3ª fase: Queima de Hélio

Mas quando ele ocorre, a energia gerada é prop.  $T^{41}$ (!)  
Por isto, enquanto o núcleo não consegue expandir (em estrelas  $< 2.25 M_{\odot}$ ), a ignição acontece numa **reação em cadeia**, chamada *Helium Flash* (“Relâmpago de hélio”), processo tão rápido que a simulação numérica não consegue acompanhar:

Os códigos computacionais de evolução estelar calculam mais lentamente que o próprio processo.

Esta reação em cadeia **termina**, quando o **núcleo se esquentou o suficiente** para **expandir**.

# Evolução Estelar

## 3ª fase: Queima de Hélio

Em estrelas de massa mais alta, o núcleo consegue expandir desde o início, e a fusão de He começa menos abruptamente, não há *flash* de hélio.

Um pouco de **oxigênio** é formado também, e em estrelas de **massa intermediária** e **alta**, a cima de  $\sim 4 M_{\odot}$ , de **neônio** e **magnésio**.

# Evolução Estelar

## 3ª fase: Queima de Hélio

Na camada acima do núcleo **continua a queima de hidrogênio.**

Enquanto o **caroço expande**, o **envelope se contrai e esquenta.**

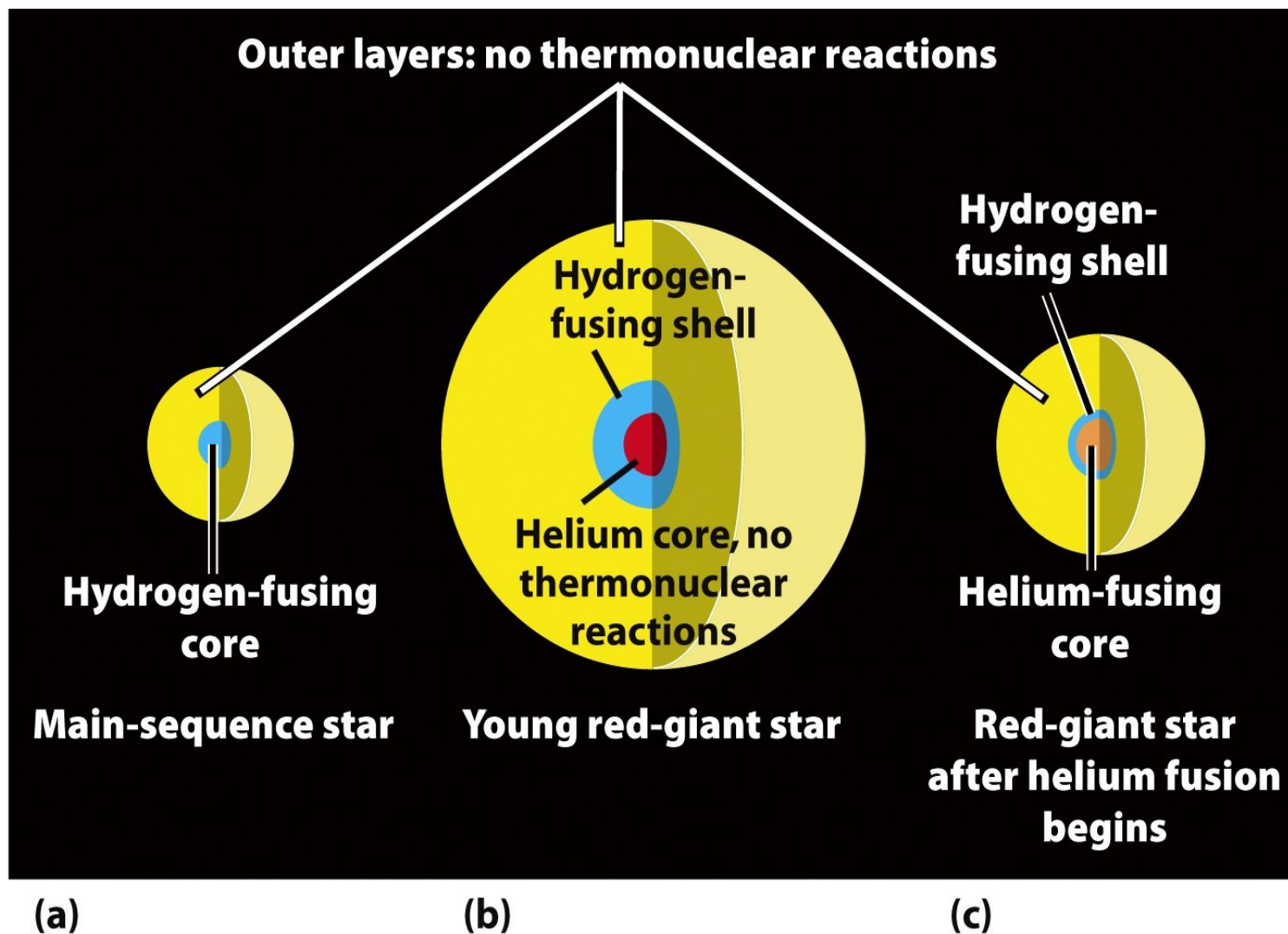


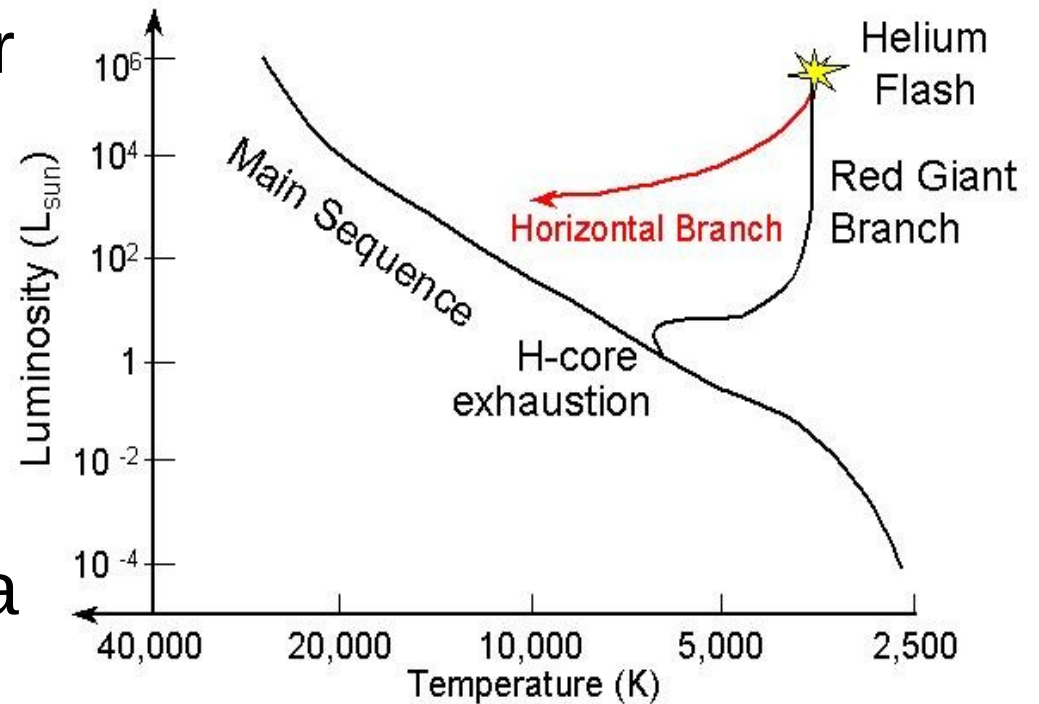
Figure 19-6  
Universe, Eighth Edition

# Evolução Estelar

## 3ª fase: Queima de Hélio

A **produção de energia** por **dois processos** (queima de He no centro e de H em uma camada envoltória) **aumenta a temperatura** da estrela.

No diagrama HR, a estrela se desloca do topo do ramo de Gigantes Vermelhas para um ramo chamado **Ramo Horizontal**, por um caminho não bem conhecido: Nunca uma estrela foi flagrada ao vivo fazendo este caminho.

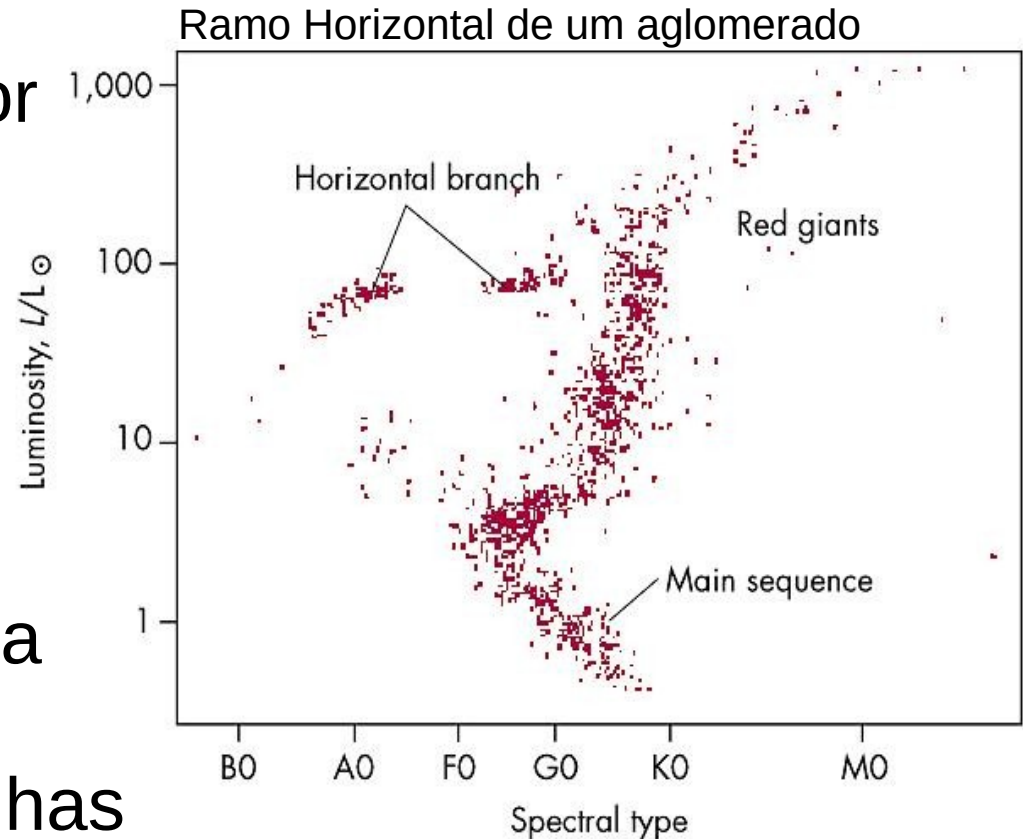


# Evolução Estelar

## 3ª fase: Queima de Hélio

A **produção de energia** por **dois processos** (queima de He no centro e de H em uma camada envoltória) **aumenta a temperatura** da estrela.

No diagrama HR, a estrela se desloca do topo do ramo de Gigantes Vermelhas para um ramo chamado **Ramo Horizontal**, por um caminho não bem conhecido: Nunca uma estrela foi flagrada ao vivo fazendo este caminho.



# Evolução Estelar

## 3ª fase: Queima de Hélio

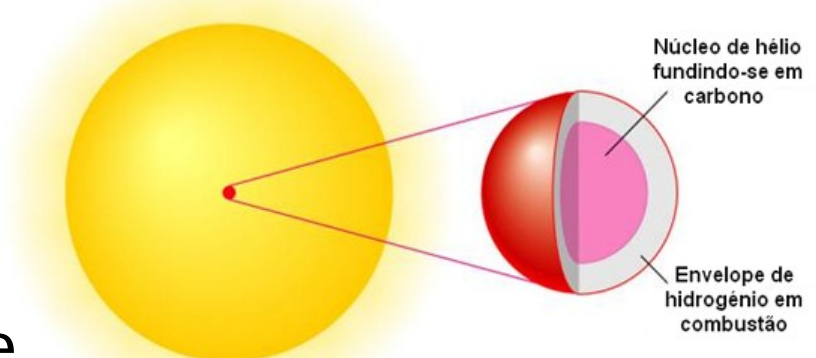
O **Ramo Horizontal** é uma nova fase de **equilíbrio**, similar à Sequência Principal, com

- **queima** de **He** no **caroço**,
- **queima** de **H** na **camada** acima, e
- um **envelope** sem fusão nuclear em cima desta (onde ocorre o transporte de energia para fora).

Quando a abundância de C no núcleo começa a ser alta podem acontecer, em paralelo ao processo triplo- $\alpha$ , as capturas ( $\Rightarrow$  aulas Nucleossíntese):

- $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \gamma$  (em estrelas até  $\sim 4 M_{\odot}$ )
- $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + \gamma$  e além, pode chegar até  $^{24}\text{Mg}$  ( $> \sim 4 M_{\odot}$ )

Estrutura de uma estrela do Ramo Horizontal



# Evolução Estelar

## 3ª fase: Queima de Hélio

### Resumo

A luminosidade do Sol em função do tempo da formação até o Ramo Horizontal.

!!! Atenção na mudança de escala de tempo

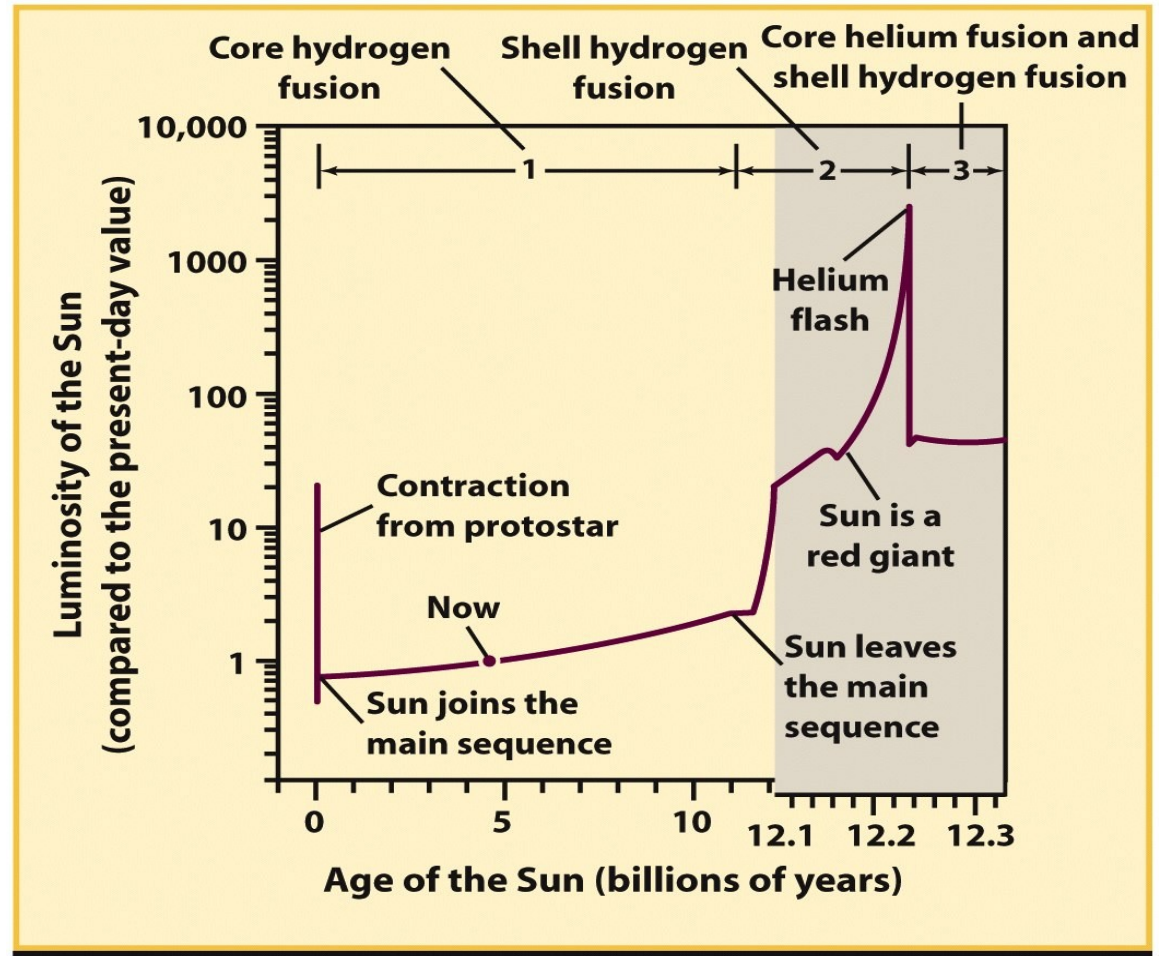


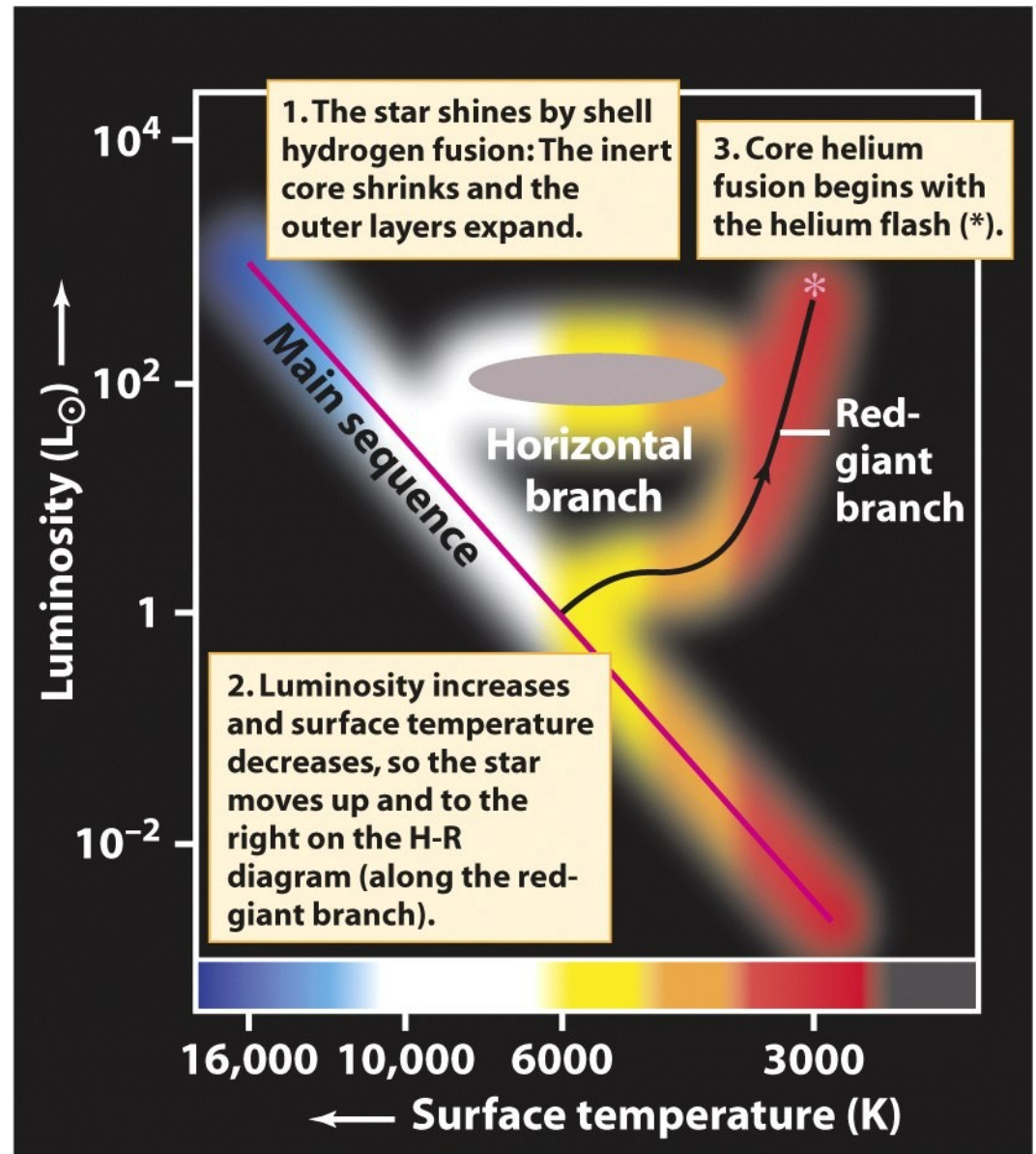
Figure 19-8  
*Universe, Eighth Edition*  
© 2008 W. H. Freeman and Company

# Evolução Estelar

## 3ª fase: Queima de Hélio

### Resumo

Evolução de uma estrela tipo Sol até o *Helium Flash*,



**Before the helium flash: A red-giant star**

Figure 20-1a

*Universe, Eighth Edition*

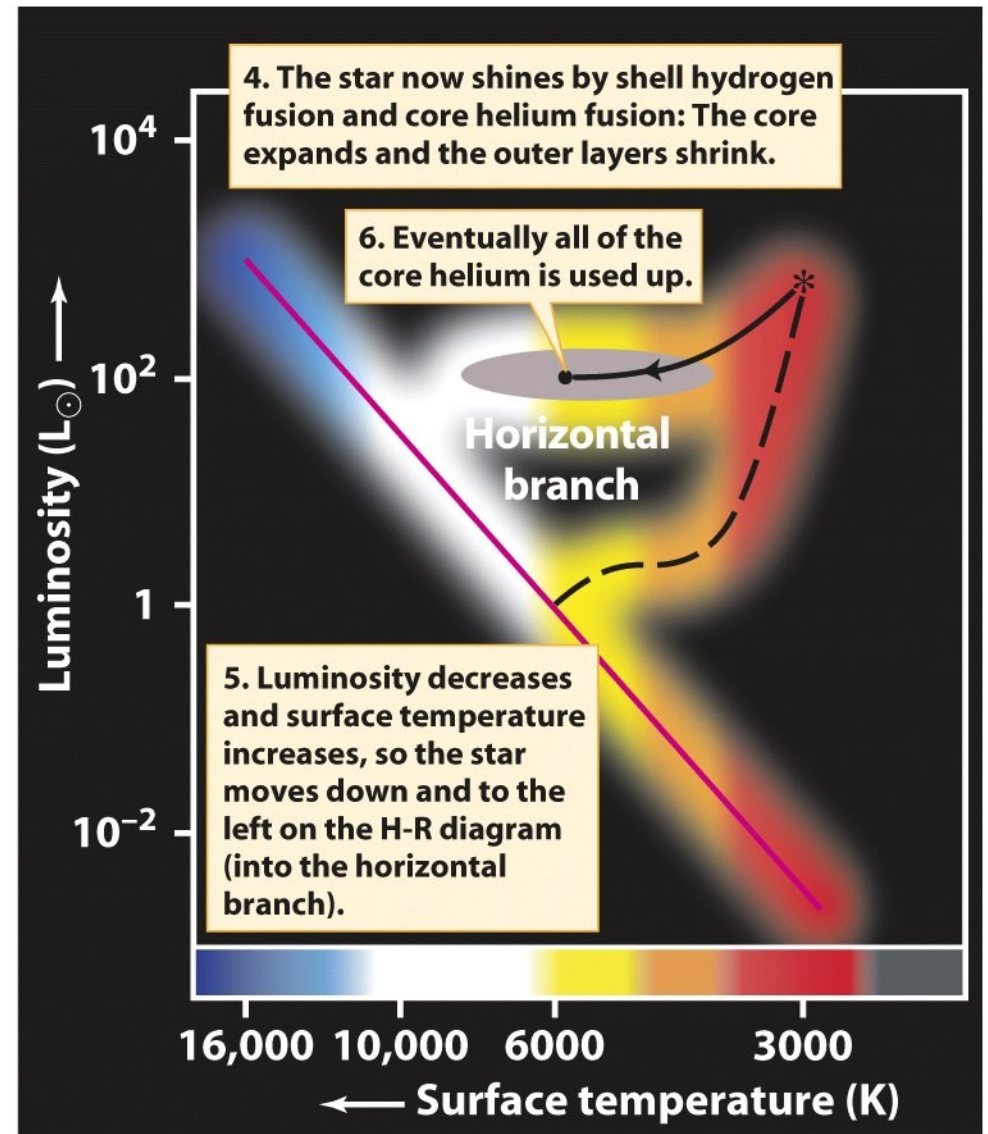
© 2008 W. H. Freeman and Company

# Evolução Estelar

## 3ª fase: Queima de Hélio

### Resumo

Evolução de uma estrela tipo Sol do *Helium Flash* até o **Ramo Horizontal**.



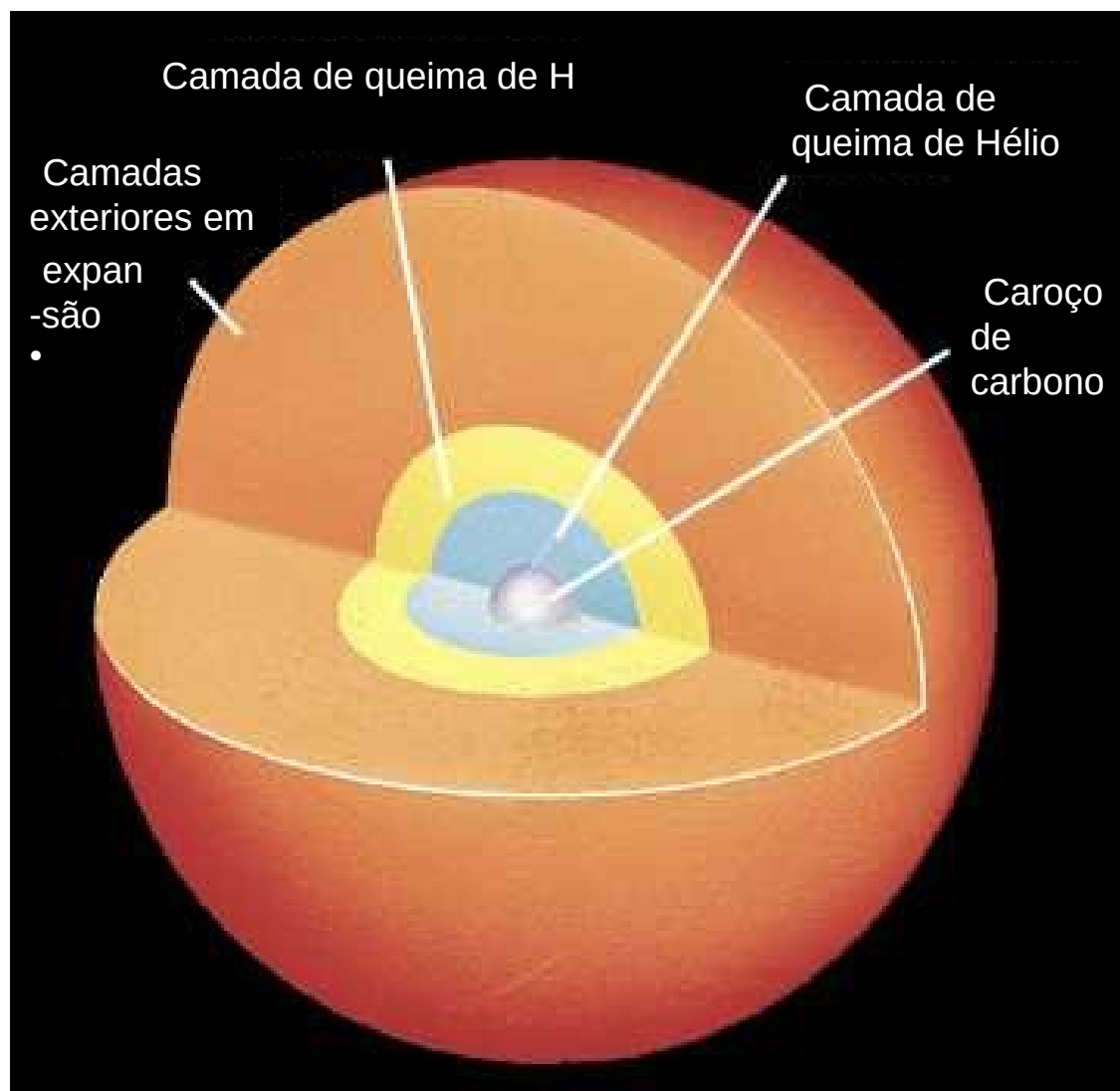
After the helium flash: A horizontal-branch star

# Evolução Estelar

## 4ª fase: Gigante do Ramo Assintótico

Quando o **hélio** no caroço também se **esgota**:

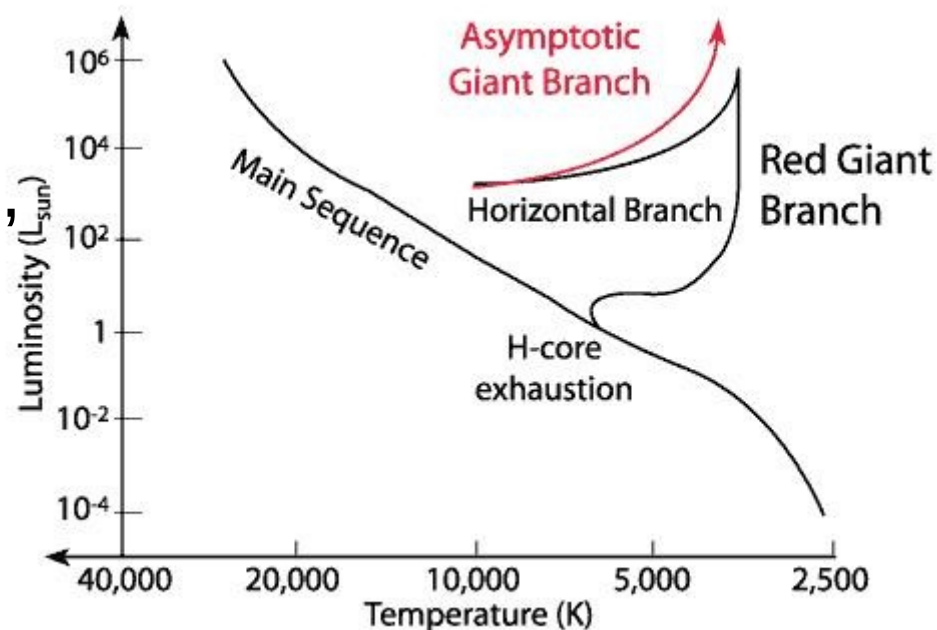
- **contração do caroço** (outra vez)
- **queima de He** em camada acima
- **queima de H** em camada acima desta
- **envelope expande e resfria**, similar ao que acontece numa Gigante Vermelha.



# Evolução Estelar

## 4ª fase: Gigante do Ramo Assintótico

A estrela vira uma **Gigante do Ramo Assintótico** (AGB, de *Asymptotic Giant Branch*), chamado assim, por que no diagrama HR, o ramo se aproxima assintoticamente ao Ramo das Gigantes Vermelhas.



No Ramo Assintótico, o Sol será maior e mais luminoso ainda, do que como Gigante Vermelha.

# Evolução Estelar

4ª fase: Gigante do Ramo Assintótico

Nascer do Sol sobre Marte em 5 bio anos



# Evolução Estelar

## 4ª fase: Gigante do Ramo Assintótico

Estrutura na escala certa.

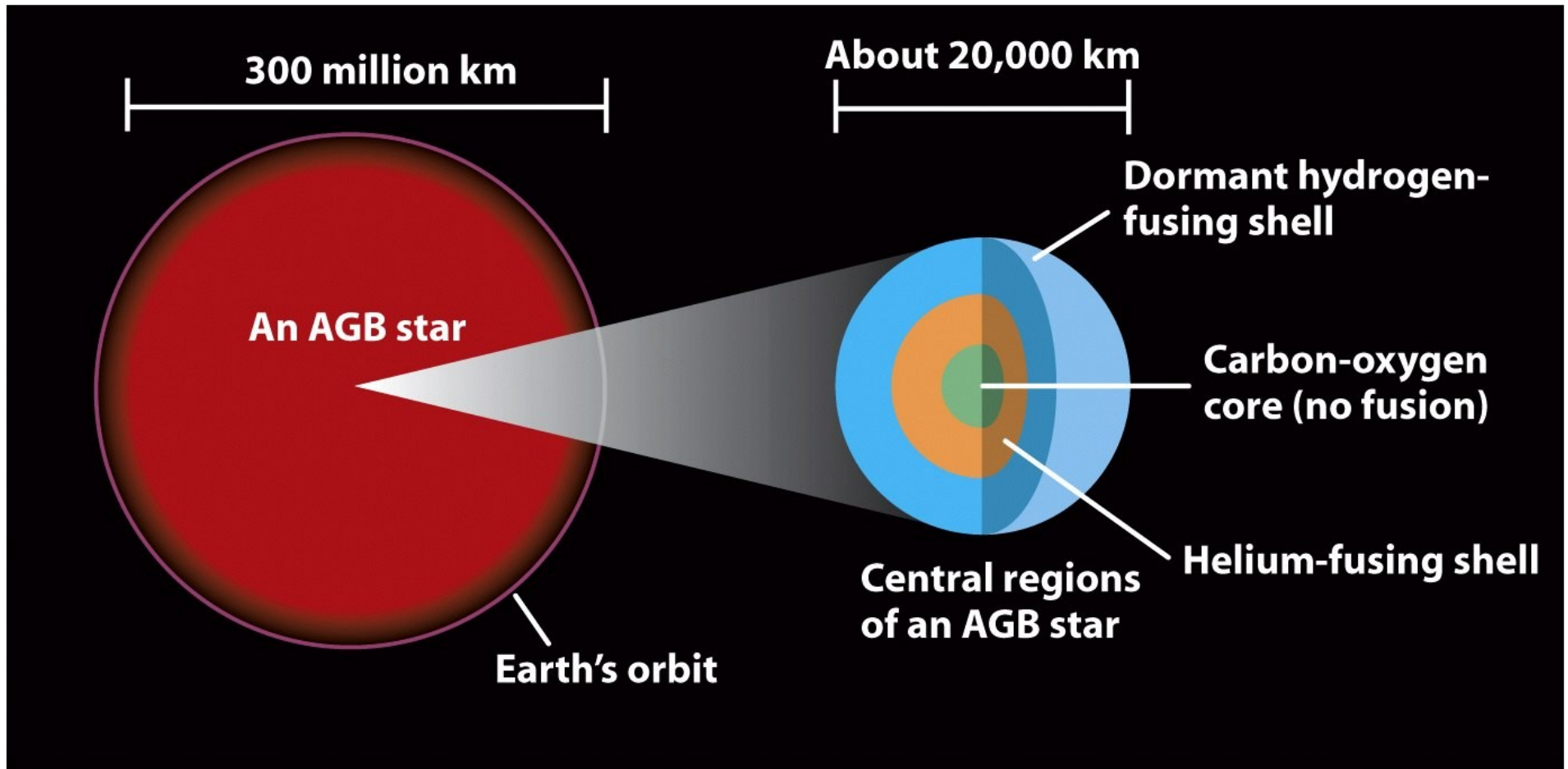


Figure 20-2

*Universe, Eighth Edition*

© 2008 W.H. Freeman and Company

# Evolução Estelar

## 4ª fase: Gigante do Ramo Assintótico

No final da fase de AGB, a estrela sofre uma sequência de **pulsos térmicos**. (*flashes de hélio*)  
=> TPAGB (*thermally pulsing AGB*)

- Ventos fortes, **ejeção do C, N, e O**.

=> **Origem** (de parte) **do carbono, nitrogênio, e oxigênio** no Universo

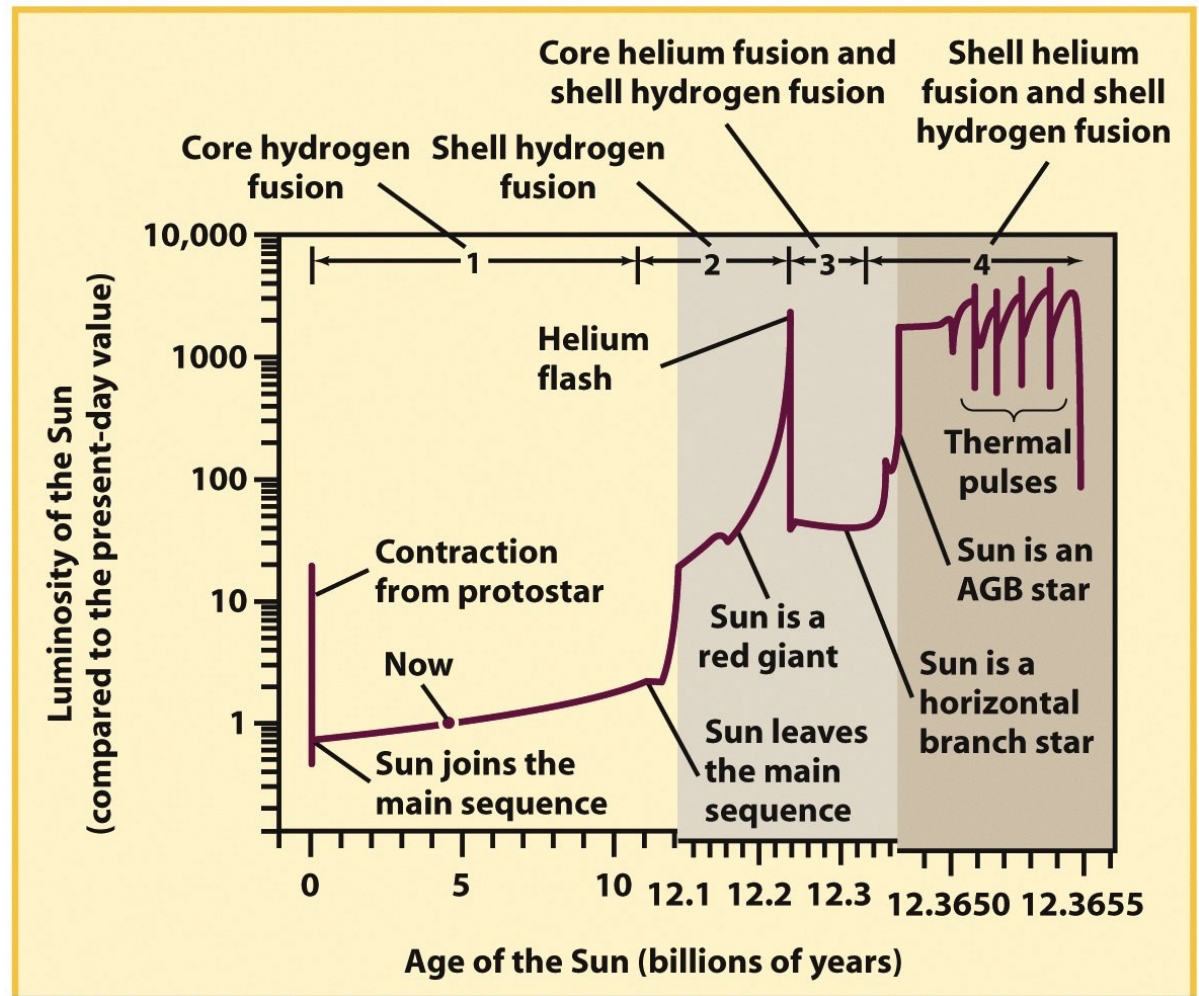


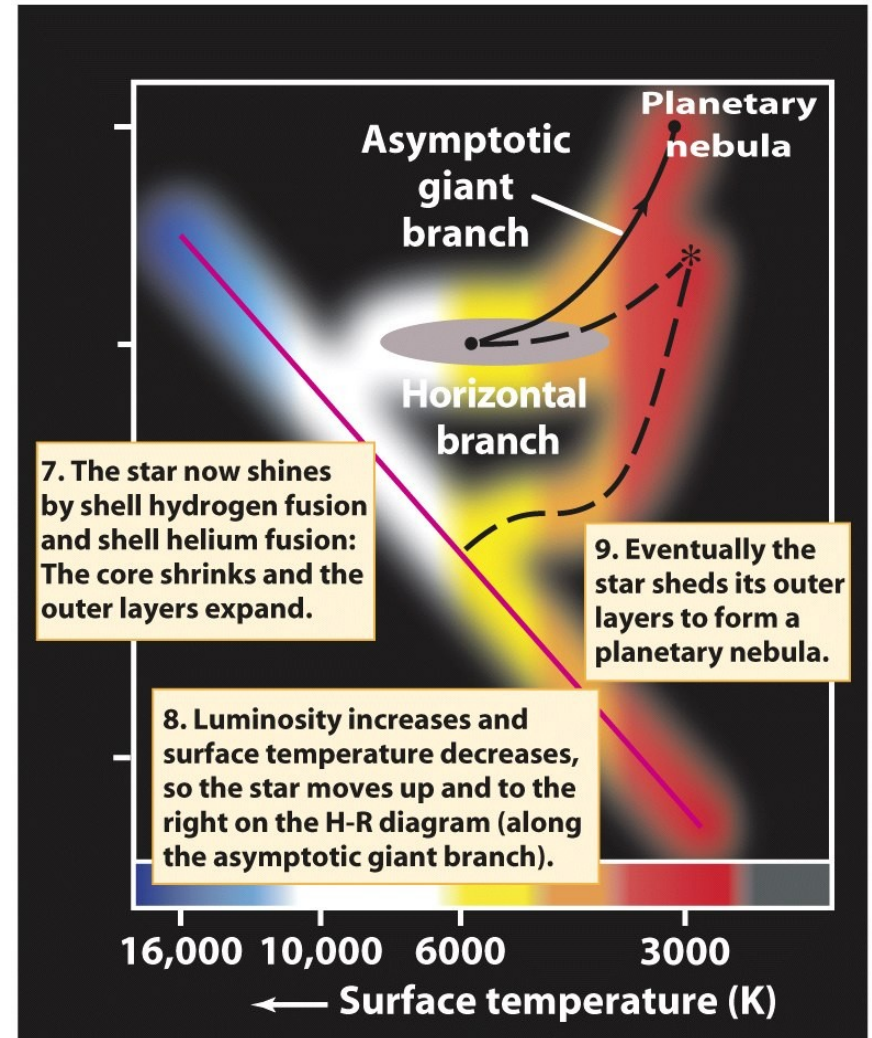
Figure 20-5  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W. H. Freeman and Company

# Evolução Estelar

## 4ª fase: Gigante do Ramo Assintótico

### Resumo

Evolução de uma estrela tipo Sol do **Ramo Horizontal** até o topo do **Ramo Assintótico**.



**After core helium fusion ends: An AGB star**

# Evolução Estelar

## A Morte de uma Estrela de Baixa Massa

Se for uma estrela de **massa baixa** ( $M < 8 M_{\odot}$ ), a história **termina** aqui:

Certa hora, o **caroço para** de se **contrair**, por ser sustentado por um novo tipo de pressão, a **pressão de degenerescência eletrônica** (=> aula Anãs Brancas).

O **Envelope** que estava caindo em cima rebate e é **ejetado**.

O que sobra do núcleo é uma **Anã Branca** (de **C-O**, p. estrelas de  $< 4 M_{\odot}$ , ou de **O-Ne-Mg**, estr. de  $> 4 M_{\odot}$ ), enquanto o envelope ejetado é chamado **Nebulosa Planetária**.

# Evolução Estelar

## A Morte de uma Estrela de Baixa Massa



Mais sobre Nebulosas Planetárias e Anãs Brancas duas aulas pra frente.

# Evolução Estelar

## 5ª fase (Estrela de Massa Alta)

Se for uma estrela de **alta massa**, o caroço atinge **temperaturas altas** o suficiente para acontecerem **mais reações nucleares**.

Enquanto o caroço se esquenta, são produzidos cada vez **mais elementos**.

A queima dos elementos ocorre em **camadas**, como de uma cebola:

Uma camada de queima de hidrogênio em cima da camada de queima de hélio, em cima de ... etc.

# Evolução Estelar

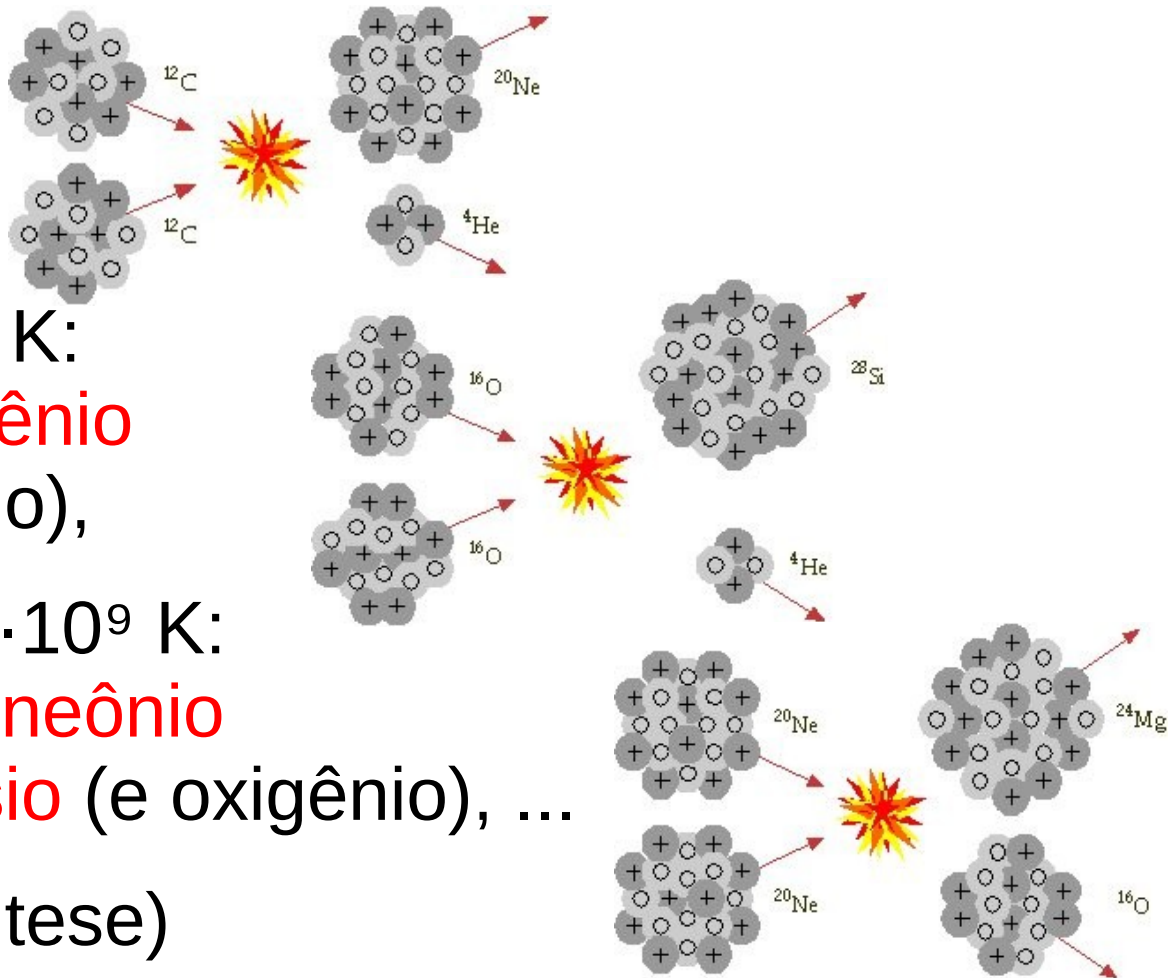
## 5ª fase (Estrela de Massa Alta)

$T_{\text{caroço}} > 6 \cdot 10^8 \text{ K}$ :  
queima de **carbono**  
 $\Rightarrow$  **neônio** (e hélio),

$T_{\text{caroço}} > 1.5 \cdot 10^9 \text{ K}$ :  
queima de **oxigênio**  
 $\Rightarrow$  **silício** (e hélio),

$T_{\text{caroço}} > 1.2 \cdot 10^9 \text{ K}$ :  
queima de **neônio**  
 $\Rightarrow$  **magnésio** (e oxigênio), ...

( $\Rightarrow$  aula Nucleossíntese)

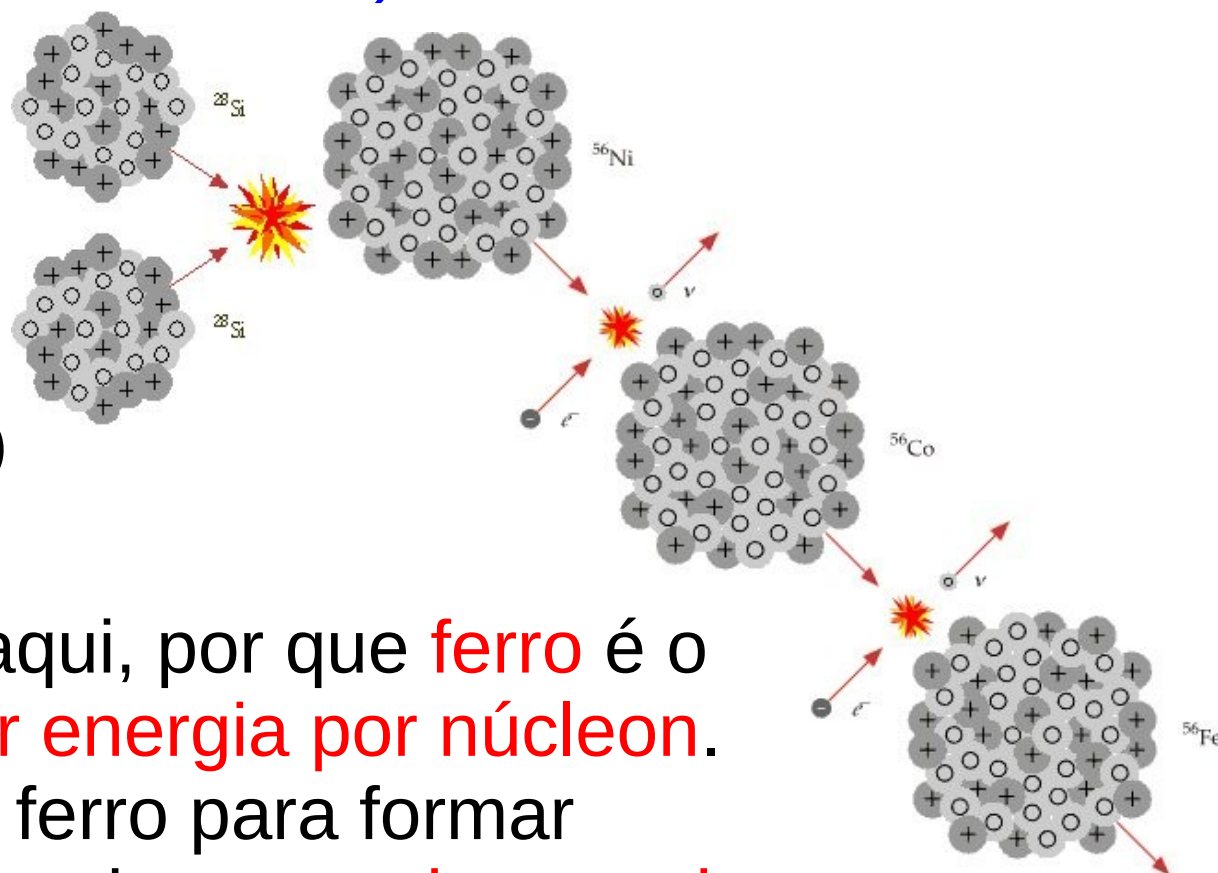


# Evolução Estelar

## 5ª fase (Estrela de Massa Alta)

... e, finalmente

$T_{\text{caroço}} > 2.7 \cdot 10^9 \text{ K}$ :  
queima de **silício**  
(após uma voltinha  
pelo níquel e o cobalt)  
 $\Rightarrow$  **ferro**

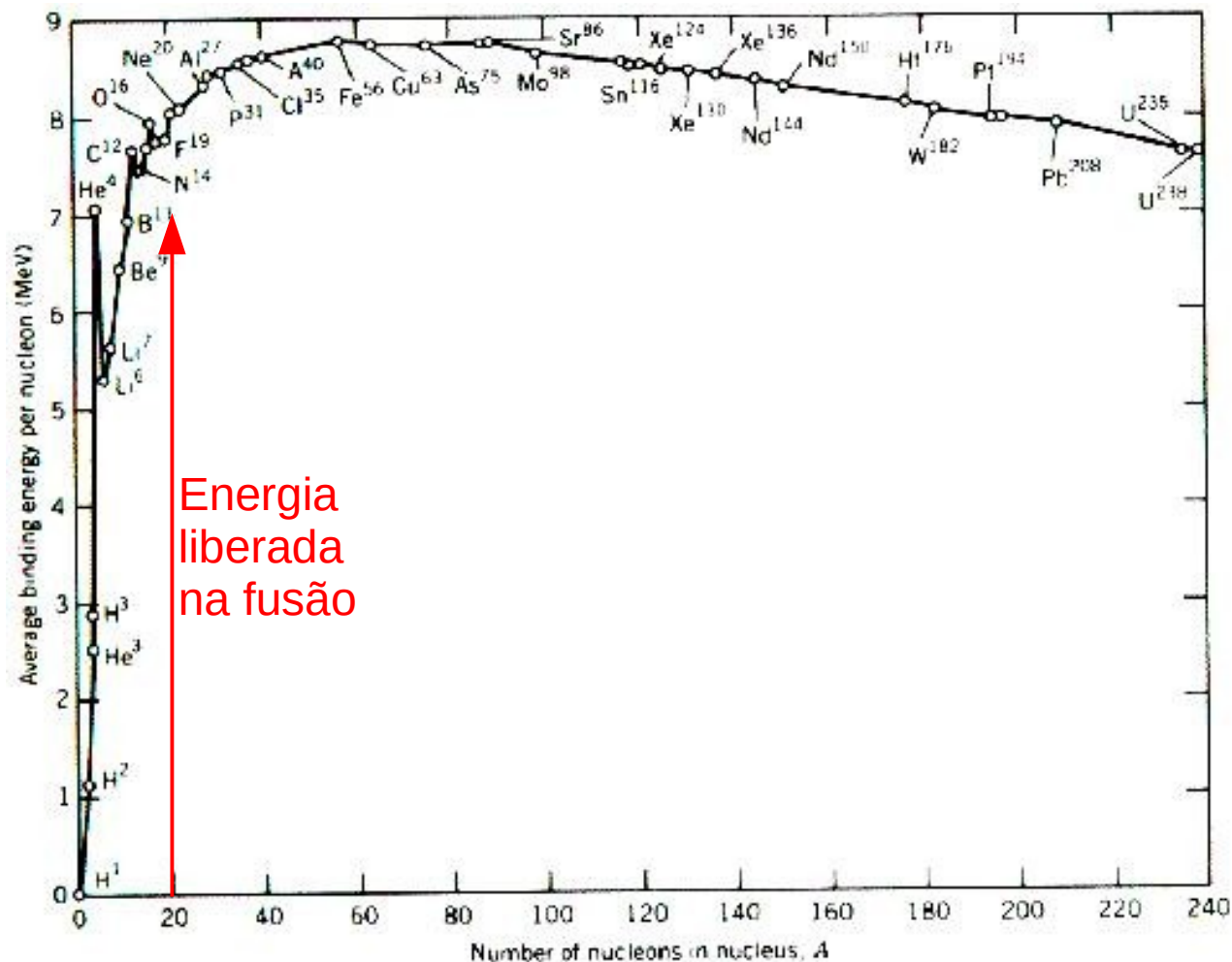


A história **termina** aqui, por que **ferro** é o elemento de **menor energia por núcleon**.  
A fusão nuclear de ferro para formar elementos mais pesados **custaria energia**.  
 $\Rightarrow$  **não acontece espontaneamente**.

# Evolução Estelar

## 5ª fase (Estrela de Massa Alta)

Como em **cada passo** é gerado **menos energia** por **núcleon**, as **fases** são cada vez **mais curtos** (o último da ordem de um dia!).



# Evolução Estelar

## 5ª fase (Estrela de Massa Alta)

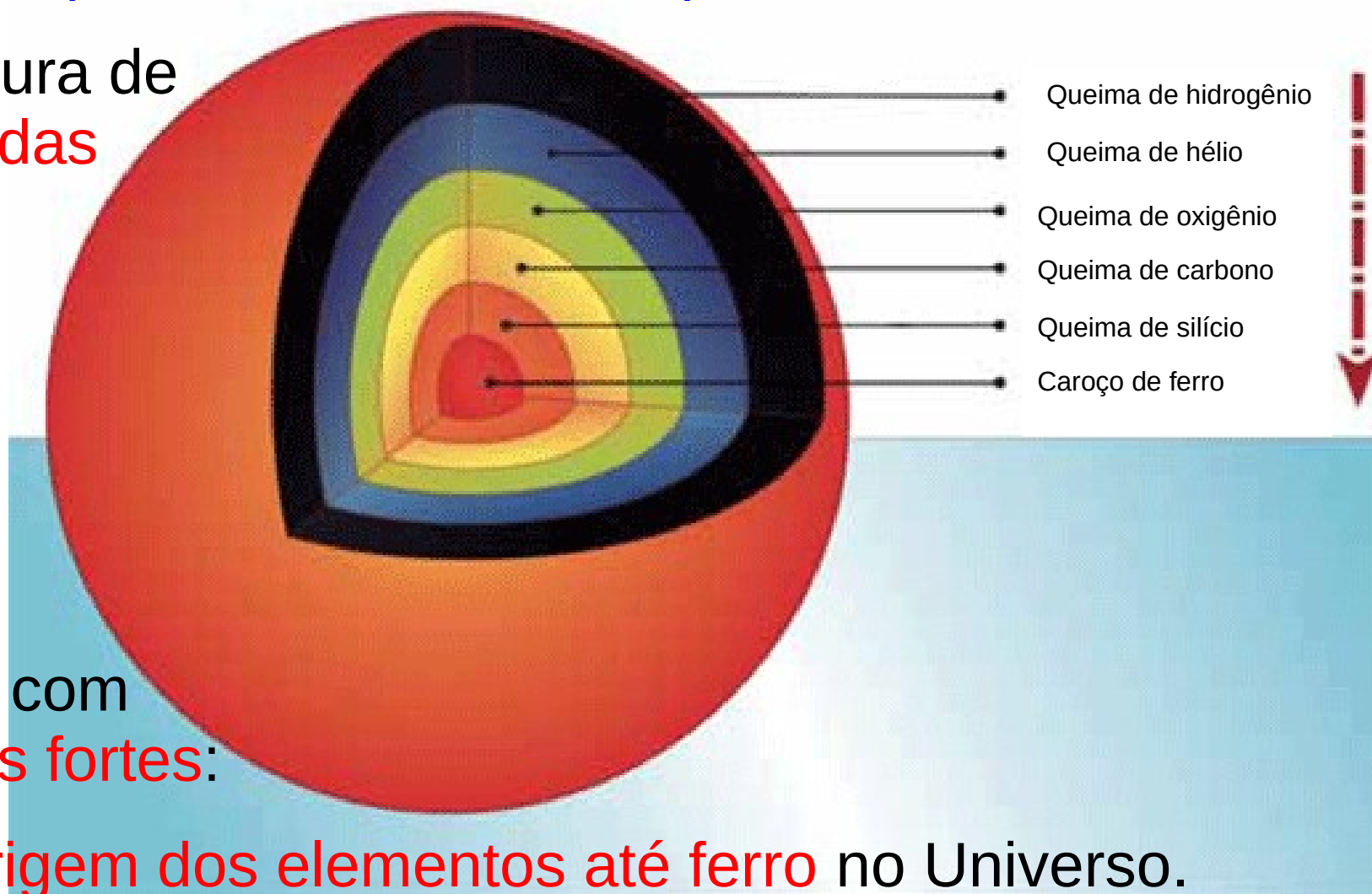
Propriedades das fusões nucleares que ocorrem em estrelas de alta massa

Combustível	Produtos	Temperatura da ignição	Massa mínima para a ignição ( $M_{\odot}$ )	Duração numa estrela de $25 M_{\odot}$
H	He	4 $10^6$ K	0.1 $M_{\odot}$	7 $10^6$ anos
He	C, O	120 $10^6$ K	0.4 $M_{\odot}$	0.5 $10^6$ anos
C	Ne, Na, Mg, O	600 $10^6$ K	4 $M_{\odot}$	600 anos
Ne	O, Mg	1.2 $10^9$ K	8 $M_{\odot}$	1 anos
O	Si, S, P	1.5 $10^9$ K	8 $M_{\odot}$	0.5 anos
Si	Ni to Fe	2.7 $10^9$ K	8 $M_{\odot}$	1 dias

# Evolução Estelar

## 5ª fase (Estrela de Massa Alta)

estrutura de  
**camadas**



fases com  
**ventos fortes:**

=> **Origem dos elementos até ferro** no Universo.

# Evolução Estelar

## 5ª fase (Estrela de Massa Alta)

Estrutura  
na  
escala  
certa

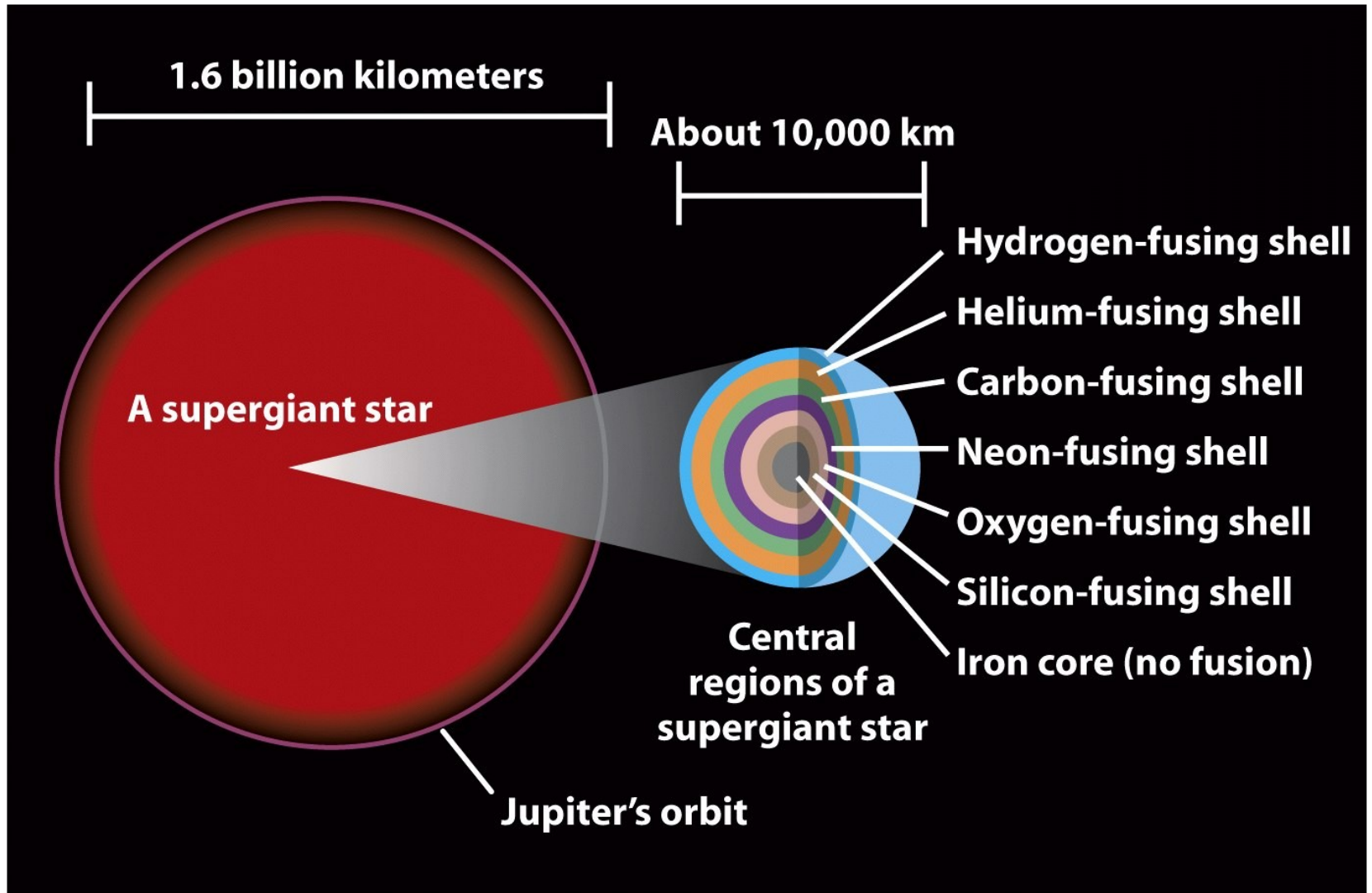


Figure 20-13

*Universe, Eighth Edition*

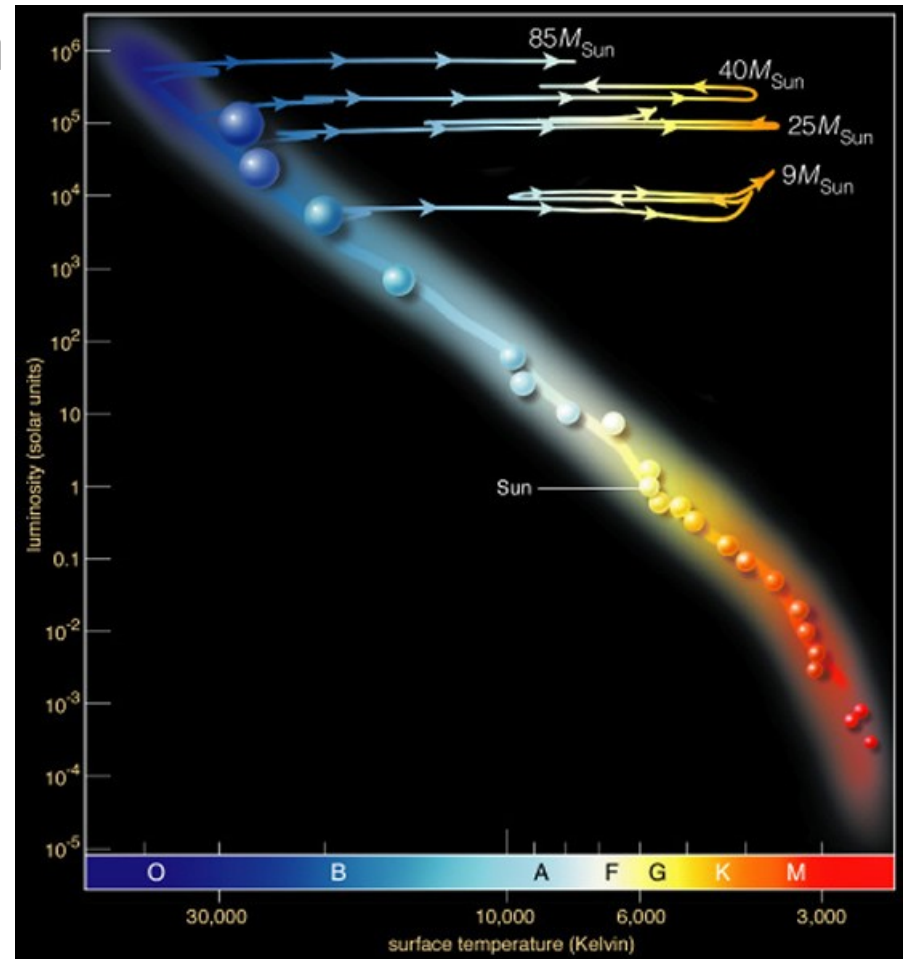
© 2008 W.H. Freeman and Company

# Evolução Estelar

## 5ª fase (Estrela de Massa Alta)

Nesta fase, as estrelas fazem caminhos oscilatórios horizontais (mantendo a luminosidade ~constante) na região superior do diagrama HR, a região das **Supergigantes**.

Nas últimas destas fases de fusão nuclear, a evolução do núcleo é tão rápida, que o envelope não consegue acompanhar, e a estrela fica parada no diagrama HR.



# Evolução Estelar

5ª fase (Estrela de Massa Alta)

Posição das Supergigantes  
no diagrama  
Hertzsprung-Russell.

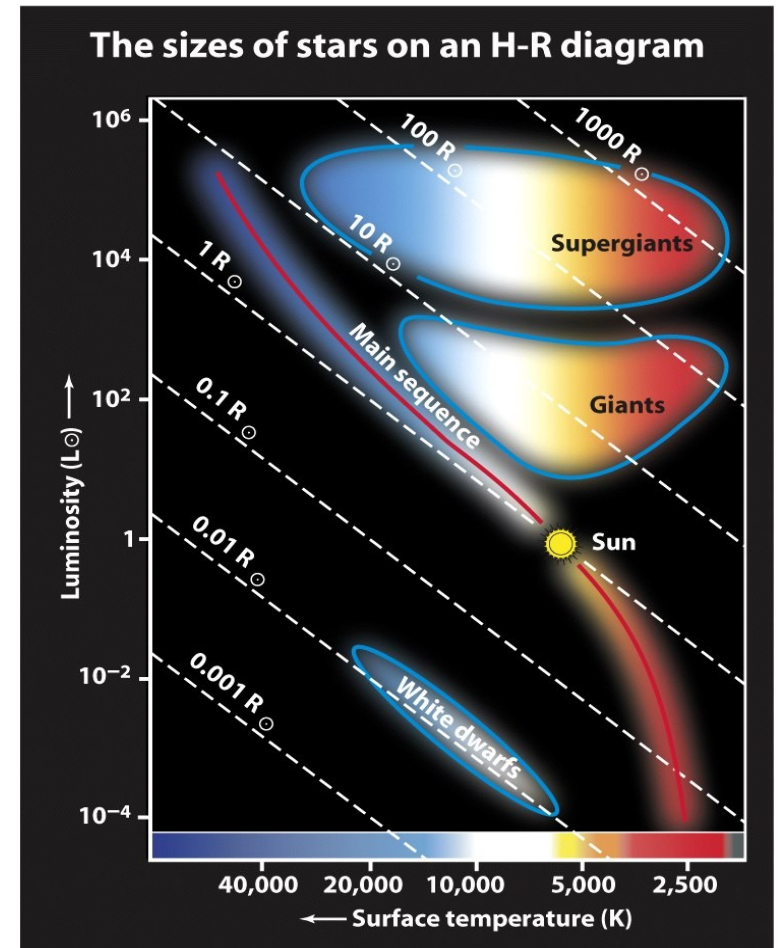


Figure 17-15b  
*Universe, Eighth Edition*  
© 2008 W. H. Freeman and Company

# Evolução Estelar

## A Morte de uma Estrela de Massa Alta

A **pressão** de degenerescência eletrônica no **caroço** de ferro **suporta** uma **massa máxima**.

Quando o **caroço ultrapassa** este limite, o que acontece quando a densidade central é de  $\sim 5 \cdot 10^{12} \text{ kg/m}^3$ , e a temperatura central, de  $\sim 7 \cdot 10^9 \text{ K}$ , o caroço **implode**, e o resto da **estrela explode** numa explosão gigantesca chamada **Supernova** (=> aula Supernovas).



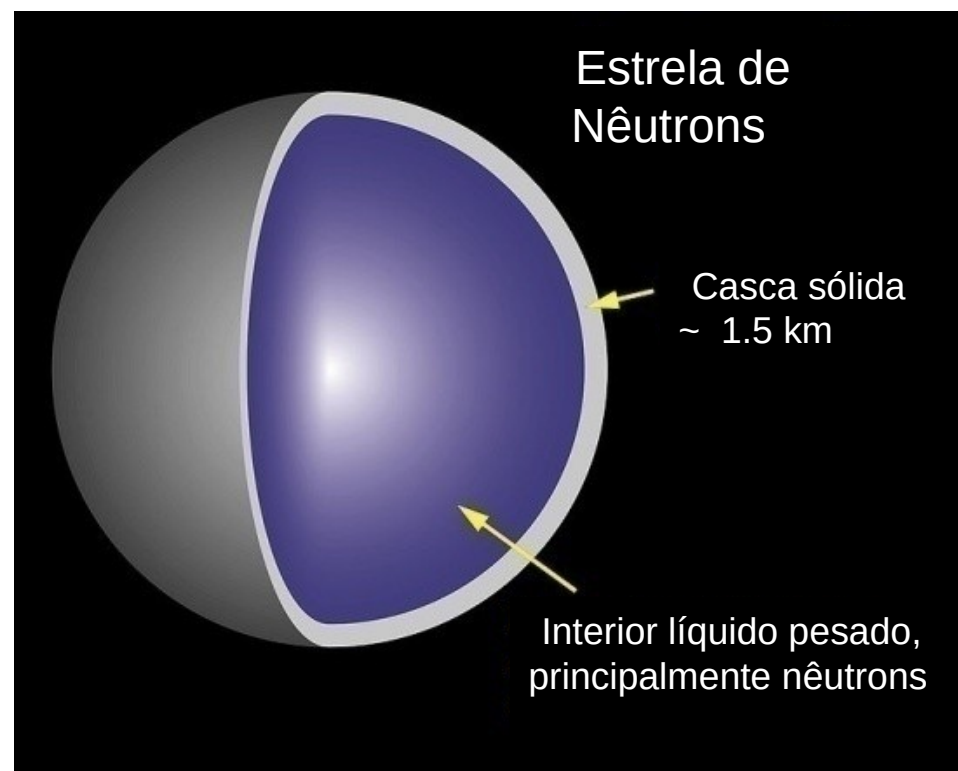
Remanescente de uma Supernova

# Evolução Estelar

## A Morte de uma Estrela de Massa Intermediária ou Alta

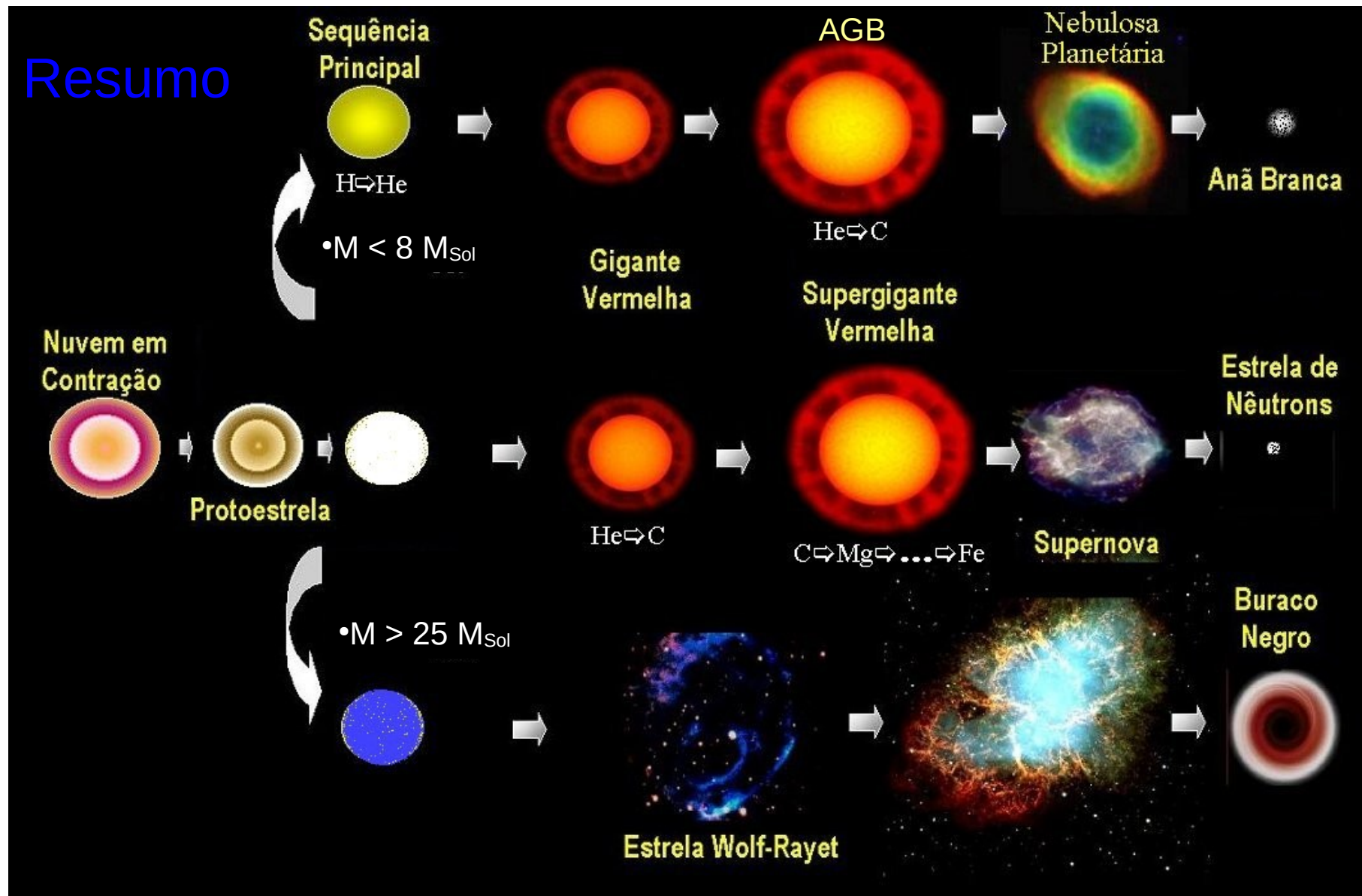
O caroço implodido vira:

No caso de estrelas de **massa** até uns  $25 M_{\odot}$ , uma **Estrela de Nêutrons**, um “núcleo de átomo gigante” (=> aula Estrelas de Nêutrons)



No caso de estrelas de **massa maior**: um **Buraco Negro**? (=> Aula Buracos Negros) ou nada?

# Evolução Estelar



# Evolução Estelar

## Outro Resumo

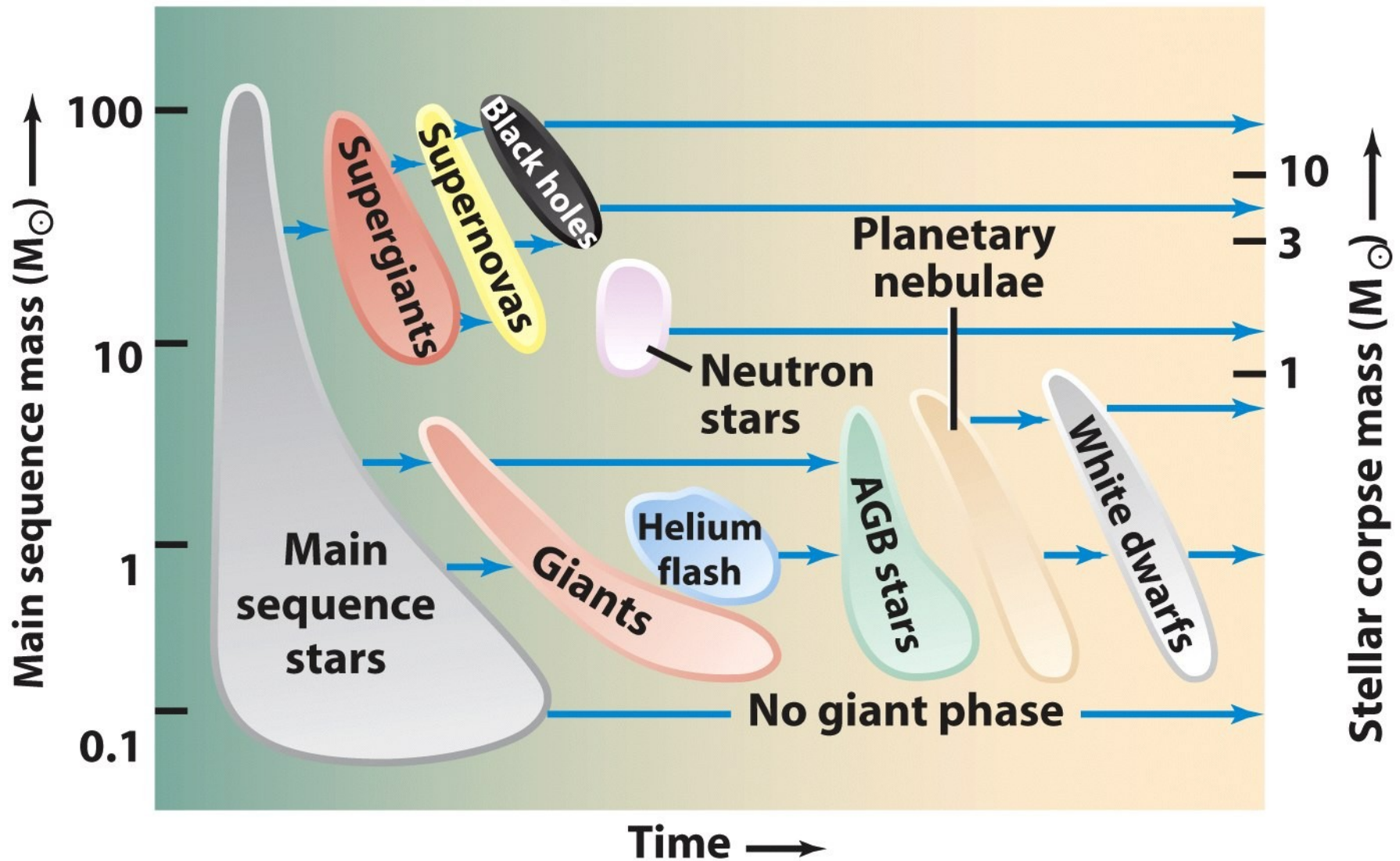


Figure 20-26a  
*Universe, Eighth Edition*



Universidade Federal do ABC

# Introdução à Física Estelar

## FIM PRA HOJE

