

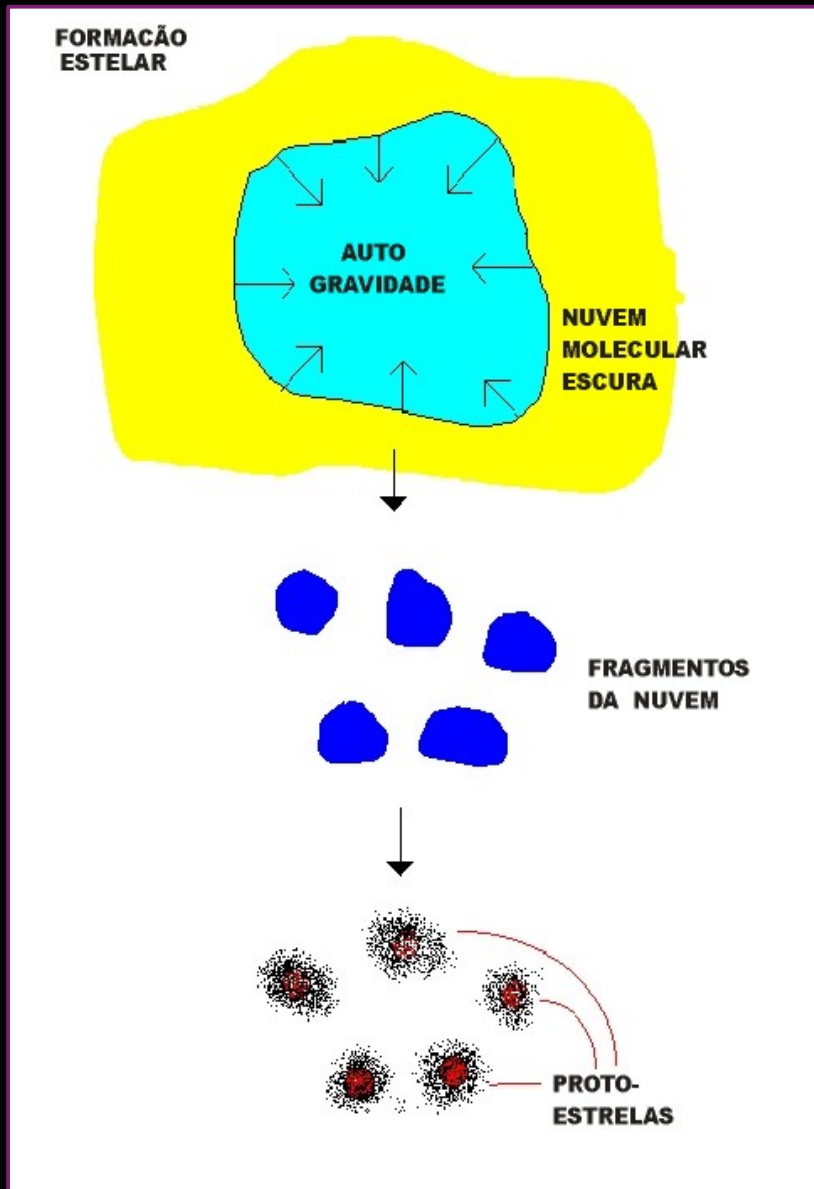
Evolução Estelar: o ciclo de vida das estrelas

Profa. Alejandra Romero

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Departamento de Astronomia



Como nascem as estrelas?



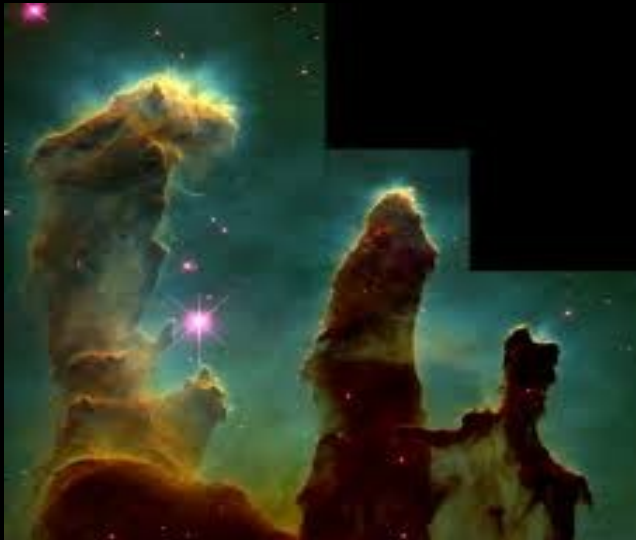
- As estrelas se formam a partir de uma grande nuvem primordial de gás e poeira.
- Fragmentação em nuvens mais pequenas (massas estelares) continuam colapsando aumentando a temperatura da protoestrela central.



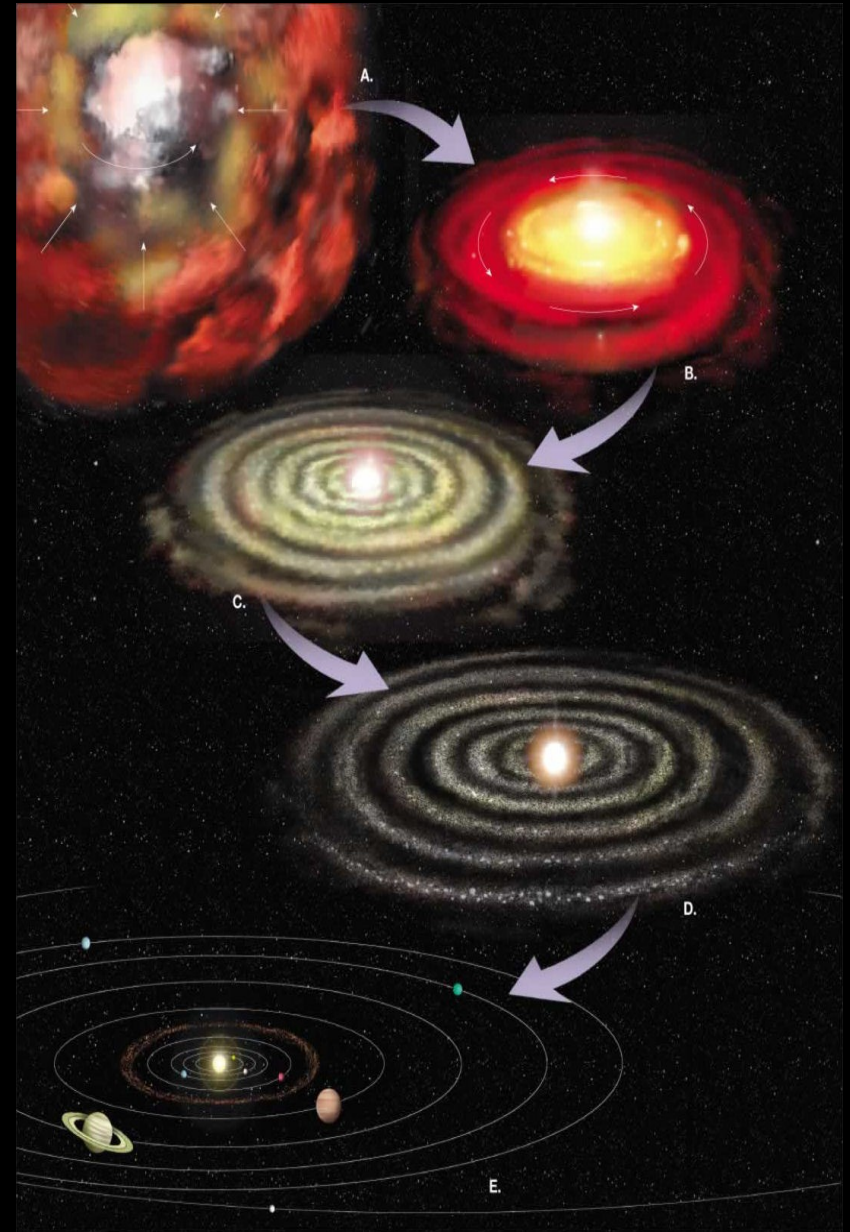
Nebulosa de Orión

Como nascem as estrelas?

- Momento angular: o colapso não é simétrico
- Se forma um disco em volta da protoestrela: formação de um sistema planetário
- A matéria cai em direção à protoestrela até que começam as reações de fusão nuclear do hidrogênio (etapa de T-Tauri).
- Sequência Principal

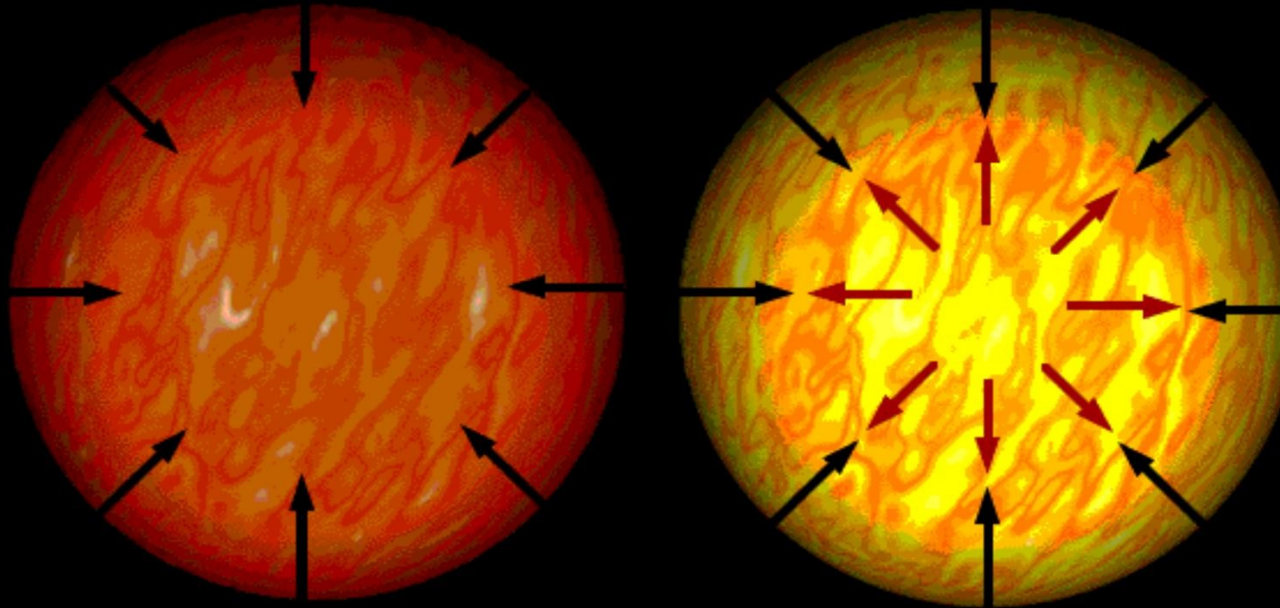


Neulosa da Águia chamada também de pilares da criação



Estrutura das estrelas

Equilíbrio hidrostático: Pressão interna balança o colapso gravitacional.



Gravidade: o material é atraído em direção ao centro da estrela.

Existe uma pressão mecânica interna que contrabalaça a força de gravidade.

Qual a fonte de energia das estrelas que produz a pressão interna?

Escalas de tempo

Qual a fonte de energia das estrelas que produz a pressão interna?

- Escala dinâmica: O tempo que tardaria a estrela em colapsar pela gravidade se a pressão desaparece subitamente.

Escalas de tempo

Qual a fonte de energia das estrelas que produz a pressão interna?

- Escala dinâmica: O tempo que tardaria a estrela em colapsar pela gravidade se a pressão desaparece subitamente.

$$\tau_{\text{din}} \approx \sqrt{\frac{R^3}{GM}} \sim 0.5 \text{ horas}$$

Escalas de tempo

- Escala térmica: Tempo que leva a estrela em liberar sua energia térmica, ou seja, esfriar.

$$\tau_{\text{term}} \approx \frac{0.5M^2/R}{L} \sim 2 \times 10^7 \text{ anos}$$

Durante o século XIX, os geólogos e os biólogos encontraram evidências de que a Terra deve ter uma idade da ordem de centenas de milhões de anos (10^8 anos).

Escalas de tempo

A resposta veio com Albert Einstein e a Teoria da Relatividade:

$$E=mc^2$$

A matéria pode ser convertida em energia: fusão nuclear

O centro do Sol, tem uma temperatura de ~15 milhões de K suficiente para fusionar 4 átomos de hidrogênio em um átomo de hélio.

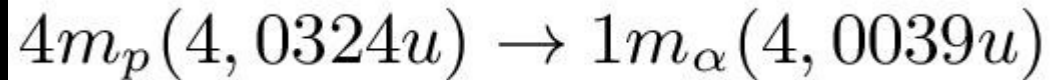
$$m(4 \text{ H}) - m(1 \text{ He}) = 0.007 m(4 \text{ H})$$

então $0.007 m(4\text{H})$ foi convertida em energia.

O Sol converte 600 000 milhões de kg de H em He por segundo.

Sequência Principal

Energia liberada pela queima de hidrogênio



$$u = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta m = 0.0285u \sim 0.7\%$$

... o tempo de vida na sequência principal para o Sol...

$$E_{SP} = 0.007 \times 0.1 \times M \times c^2$$

$$E_\odot = 1.26 \times 10^{44} \text{ J}$$

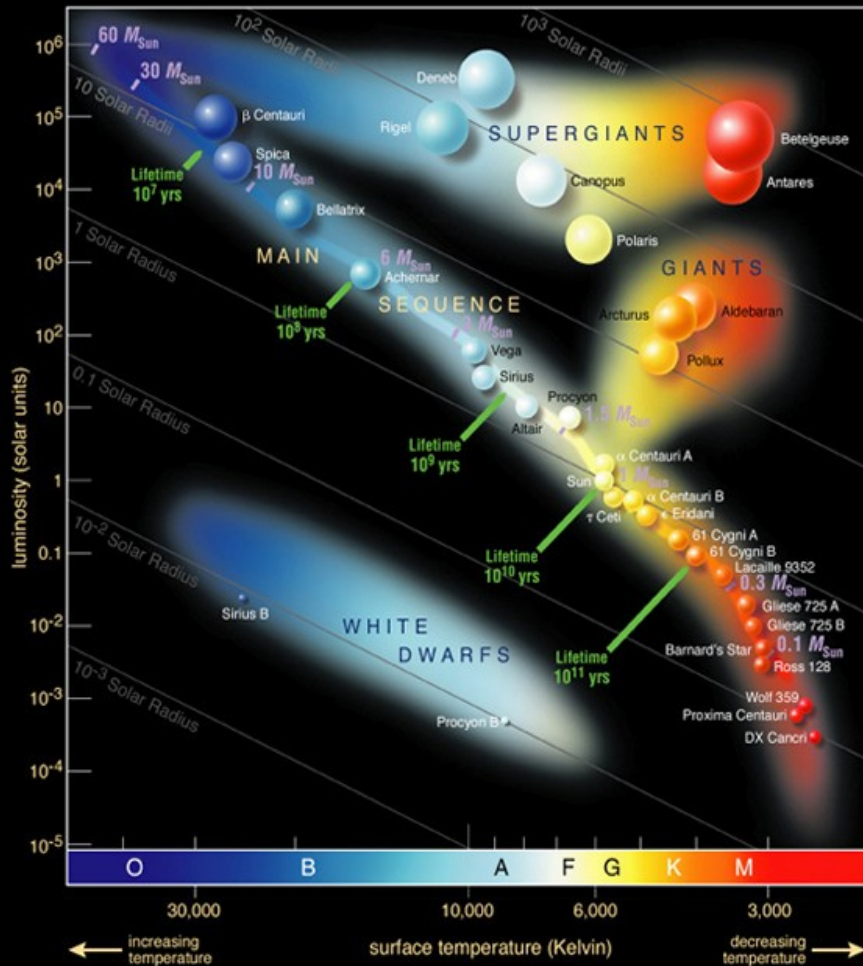
$$L_\odot = 3,9 \times 10^{26} \text{ J/s}$$

$$t_{SP} = \frac{E_\odot}{L_\odot} = 10^{10} \text{ anos}$$

Sequência Principal

- Etapa mais longa na vida das estrelas:

$$\tau_{SP} \propto \frac{X_H M c^2}{L} \sim 10^{10} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2} \text{ anos}$$



10¹⁰ anos para 1M_{Sol}

6 x 10⁶ anos para 20 M_{Sol}

- Relação massa-luminosidade na Sequência Principal

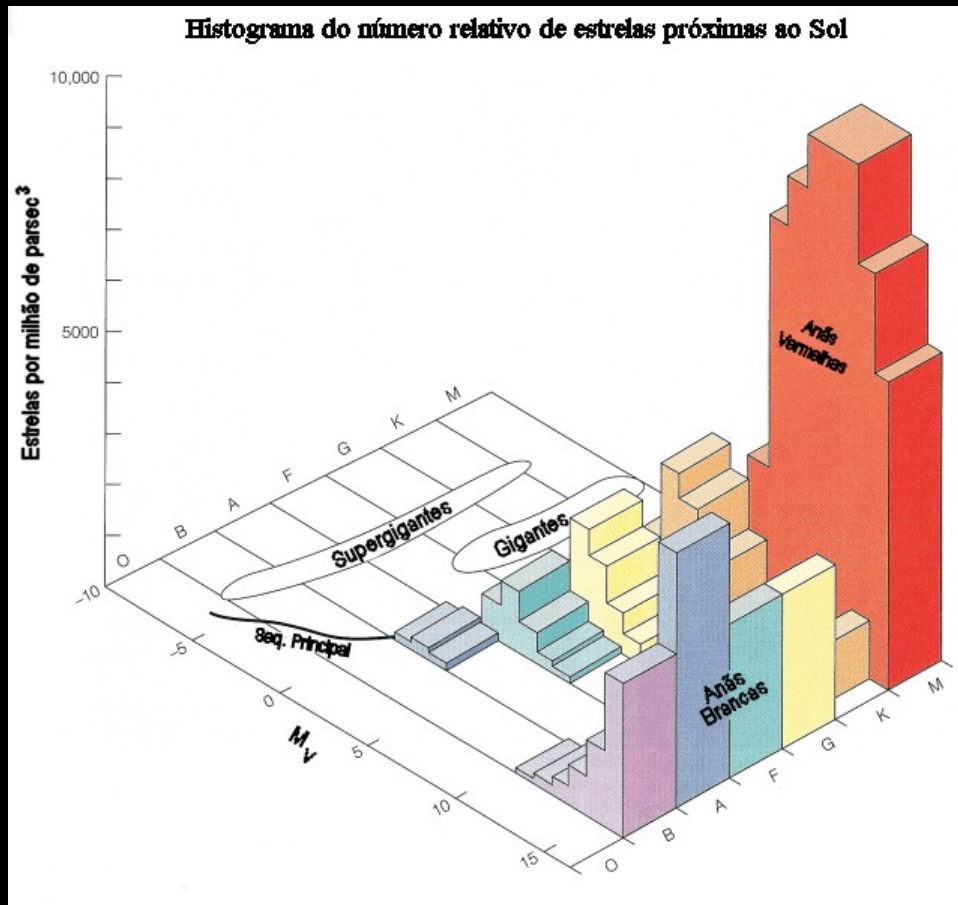
$$L \simeq M^3 \mu^4$$

Todas as estrelas passam pela etapa de sequência principal, fusionando hidrogênio em hélio no núcleo.

O que acontece depois?

Depende da massa inicial da estrela

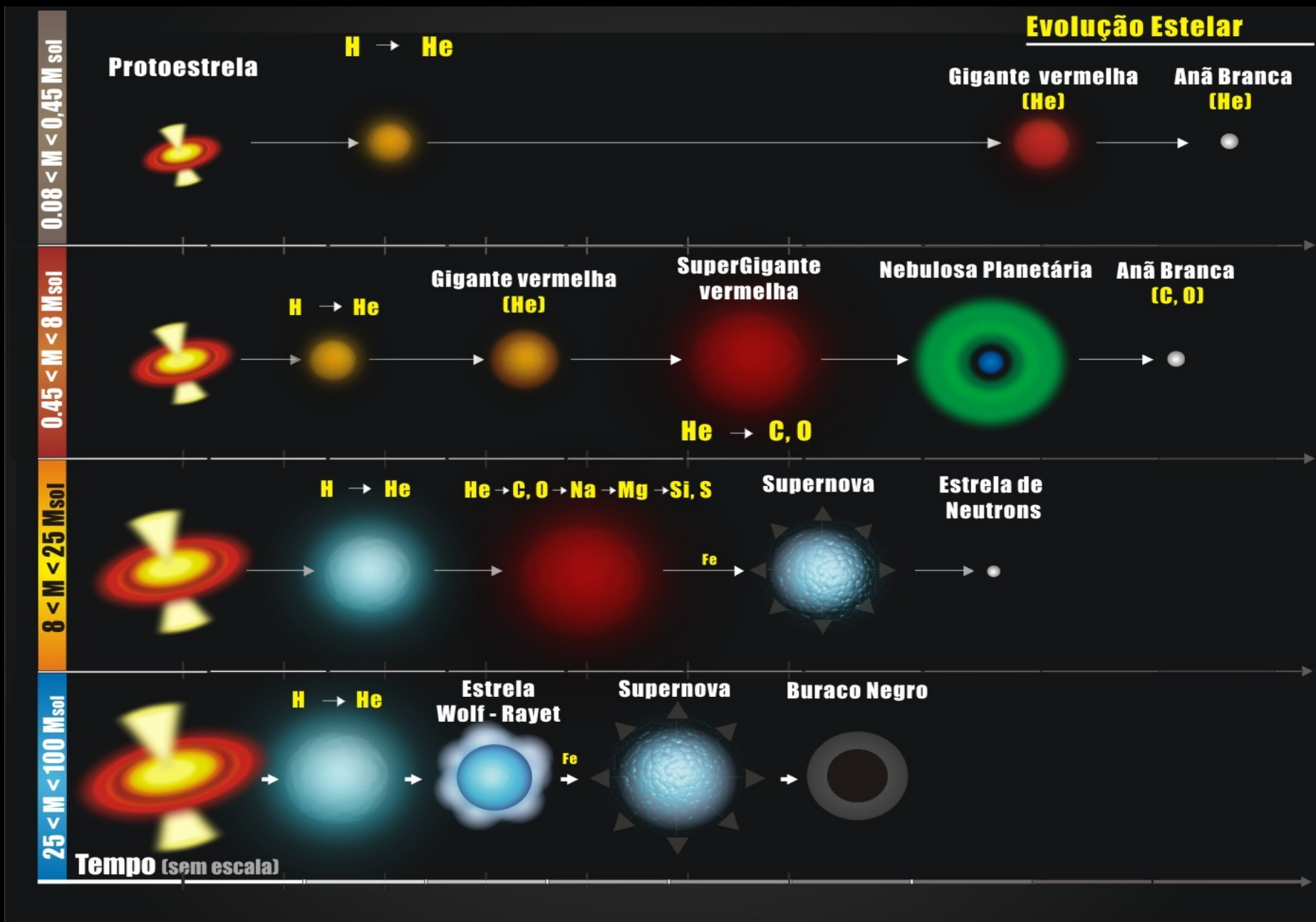
Estrelas próximas ao Sol



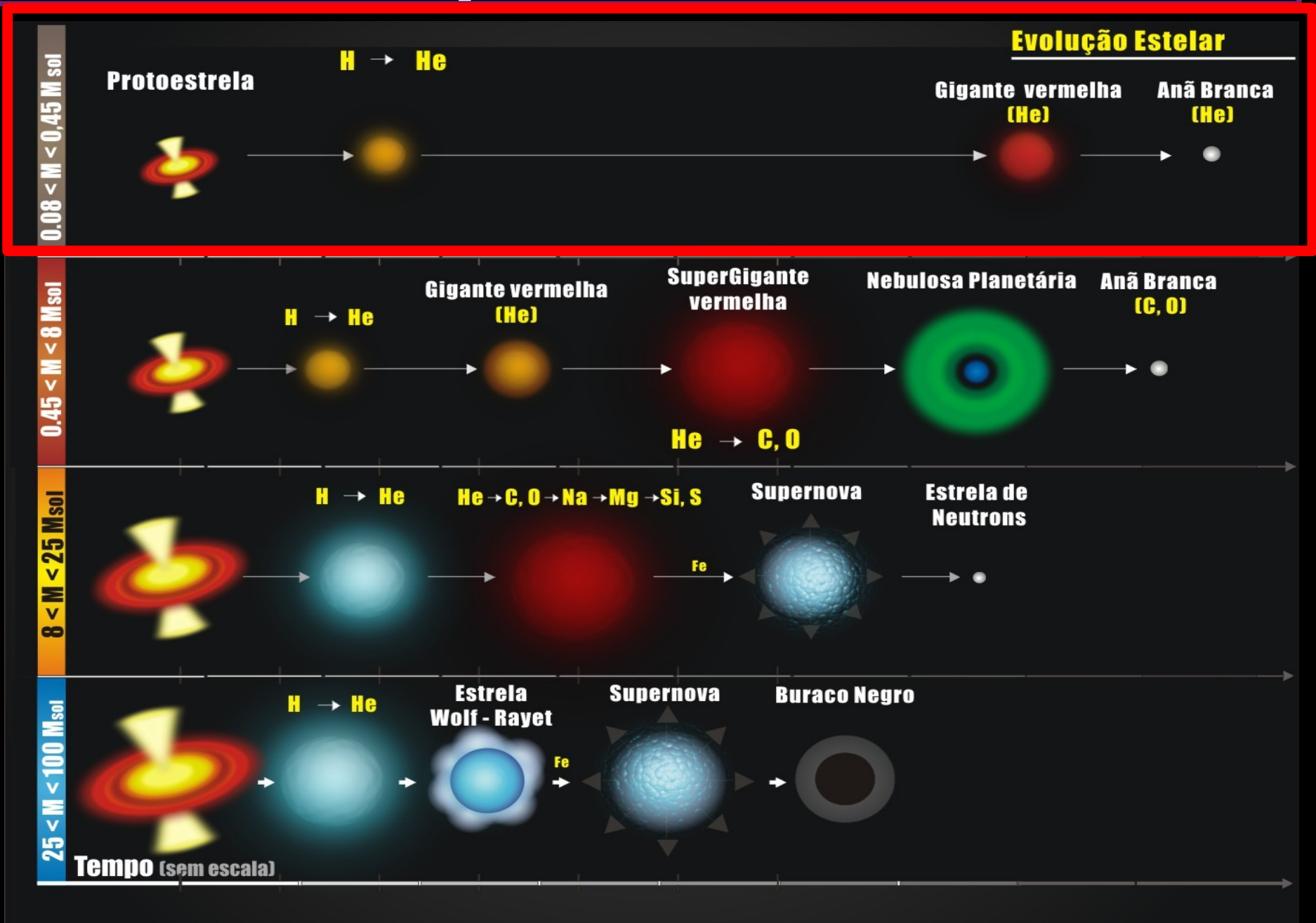
Função de massa inicial: Para cada 300 estrelas de 1 massa solar existe somente uma com 10 massas solares.

- Massa mínima: $0.08M_{\text{sol}}=75M_{\text{Jup}}$ não atinge as temperaturas necessárias para o início da combustão de hidrogênio (planeta gasoso).
- Massa máxima $\sim 100M_{\text{sol}}$: Limite de Eddington

Estrelas isolada: Evolução pós-sequência principal depende da massa inicial.



Estrelas isolada: Evolução pós-sequência principal depende da massa inicial.

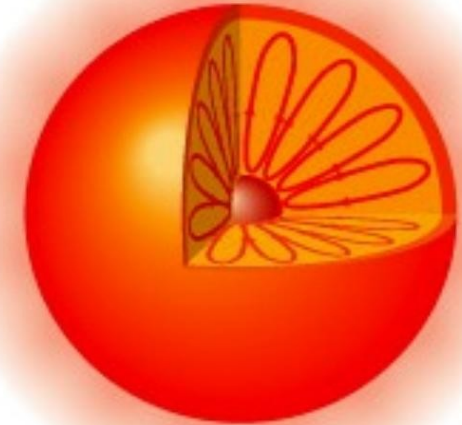


$$M = 0.08 - 0.45 M_{sol}$$

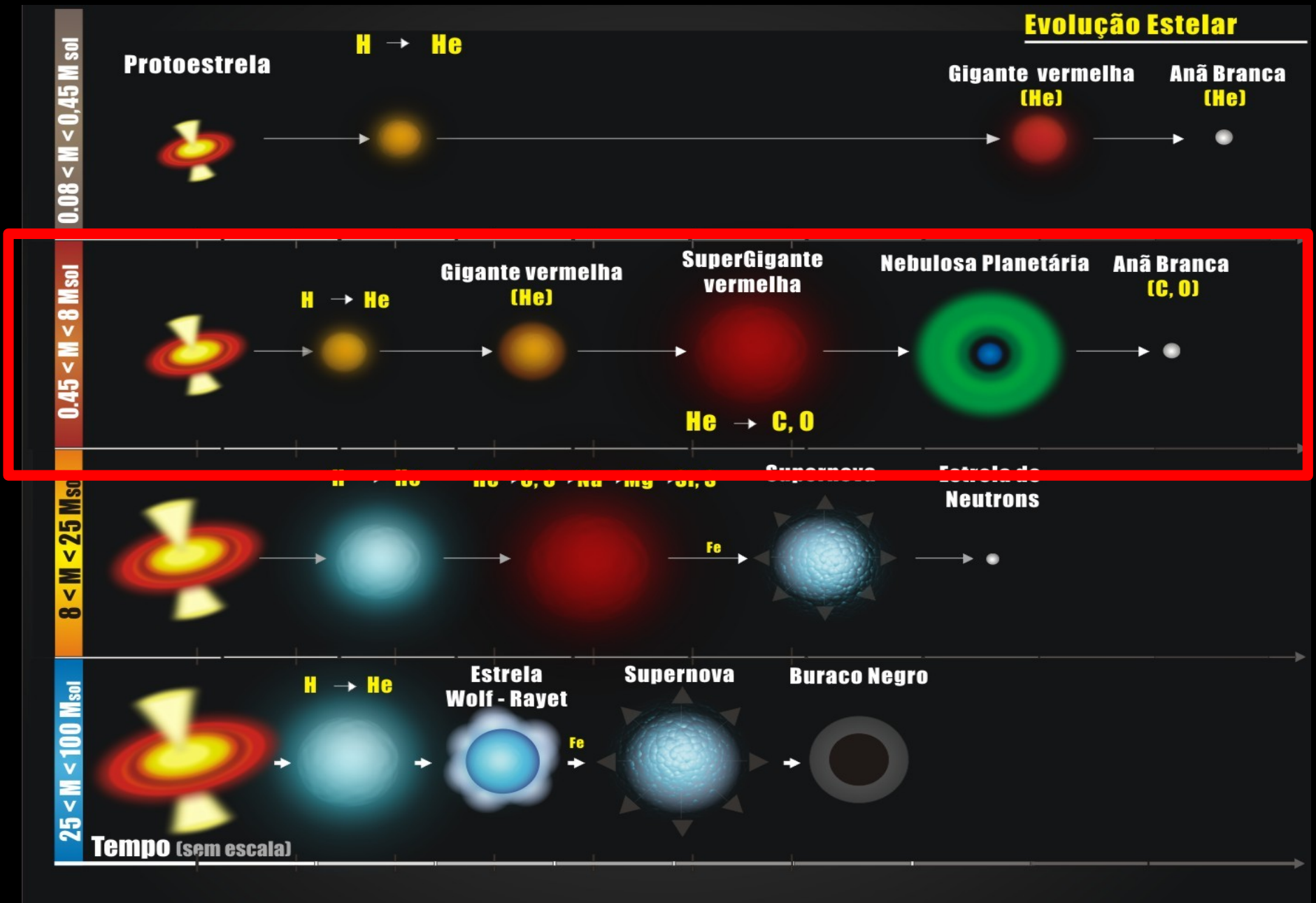
Anãs vermelhas: 25 bilhões de anos na SP

- A estrela é completamente convectiva, mistura o H com o He.
- Transformam quase todo o hidrogênio em hélio.
- Não atingem a temperatura da fusão de hélio ($T \sim 100$ milhões de K)
- Anãs brancas com núcleo de hélio

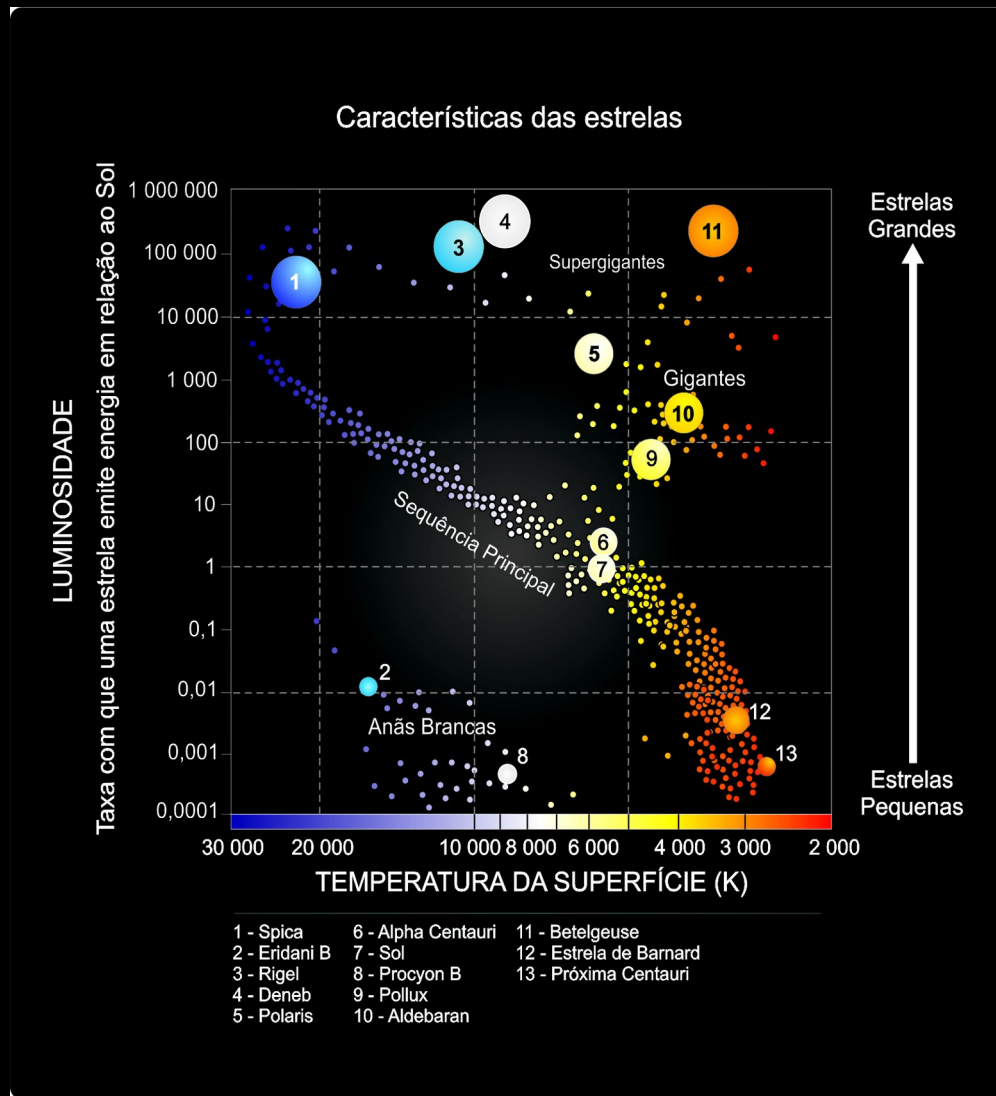
Anã Vermelha



Estrelas isolada: Evolução pós-sequência principal depende da massa inicial.

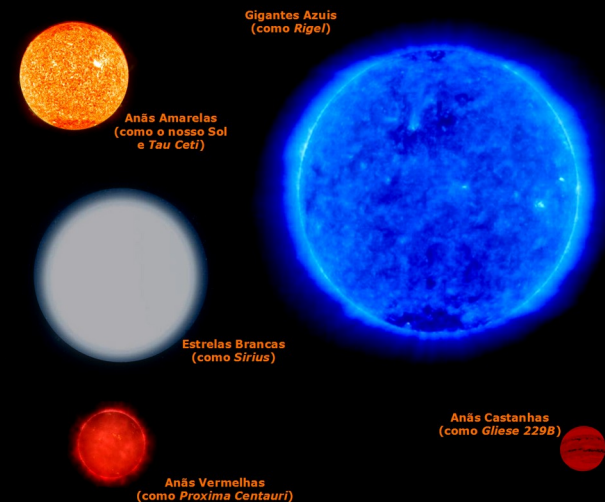


Estrelas de baixa massa



Estrelas como o Sol levam **10 bilhões de anos** em queimar todo o hidrogênio (idade do Sol 4,5 bilhões de anos).

Estrelas com 10 massas solares levam **0,1 bilhões de anos** em queimar todo o hidrogênio.



Estrelas de baixa massa como o nosso Sol

Depois do combustível esgotar, a estrela vira uma Gigante Vermelha

O Sol na Sequência
Principal
(diâmetro $\approx 0,01$ UA)

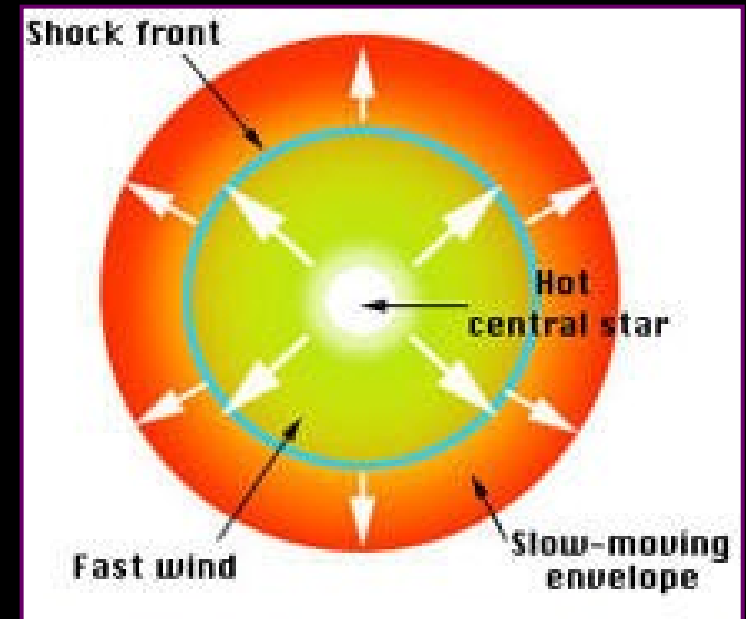
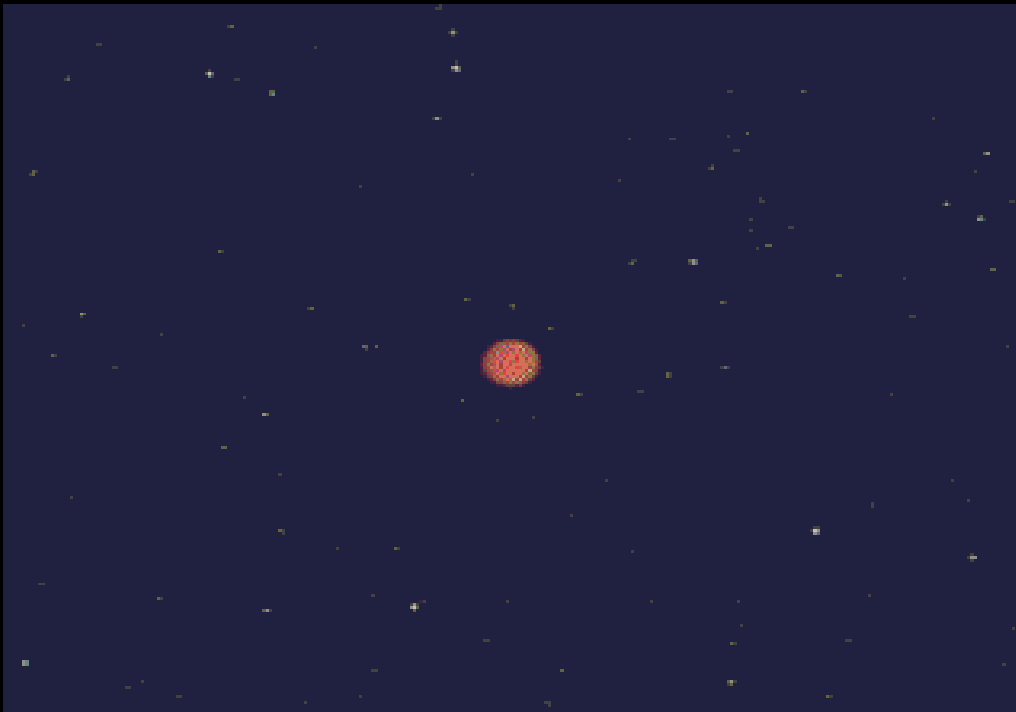


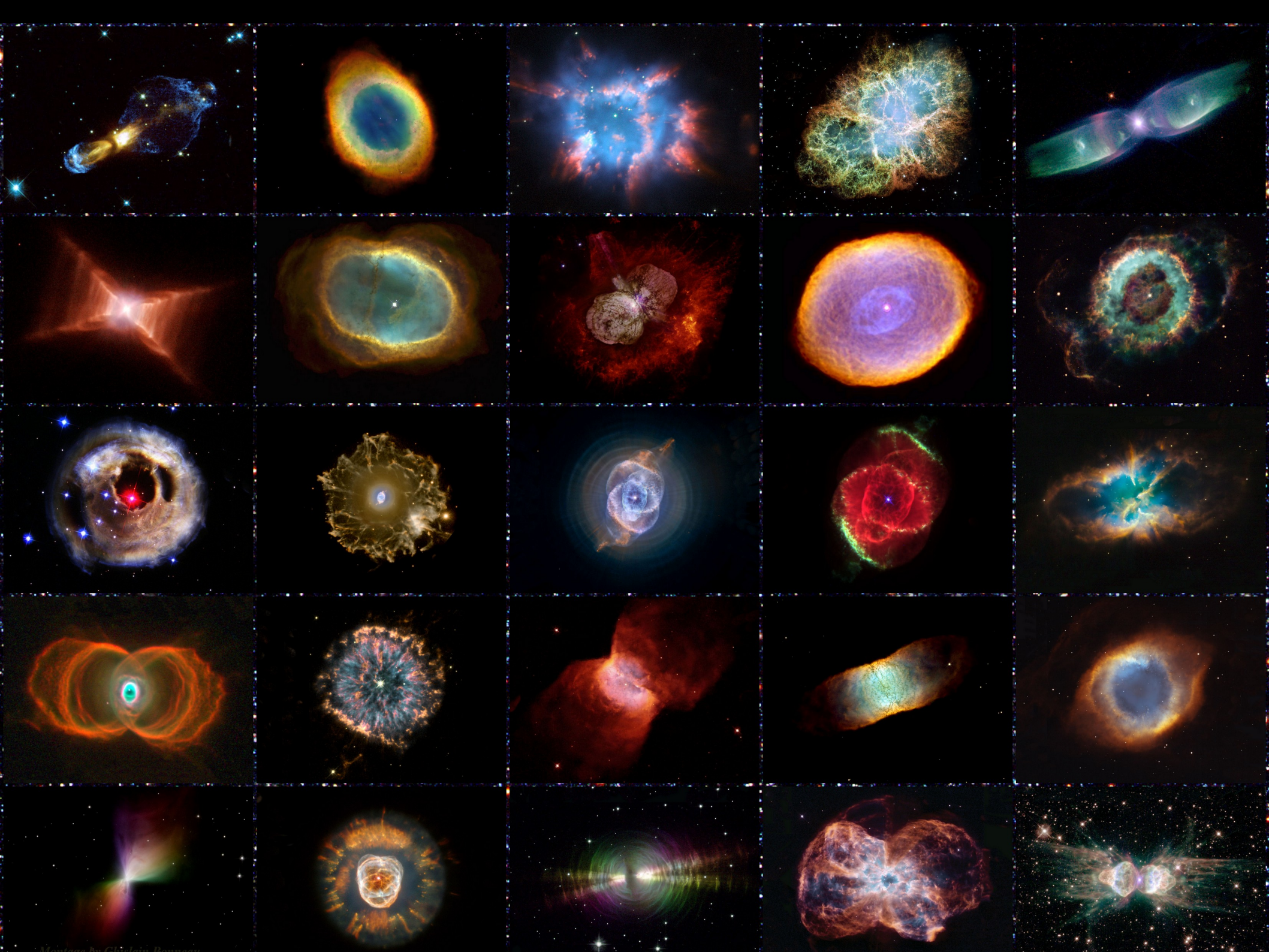
O Sol como Gigante Vermelha
(diâmetro ≈ 1 UA)

Nesta etapa no centro podemos ter outras reações nucleares (hélio se transforma em carbono e oxigênio)

Nebulosa Planetária

- Ejeção das camadas externas, formação da **nebulosa planetária**
- Expansão $\sim 10\text{-}30$ km/s
- Perda de massa $10^{-4} M_{\text{sol}}/\text{ano}$





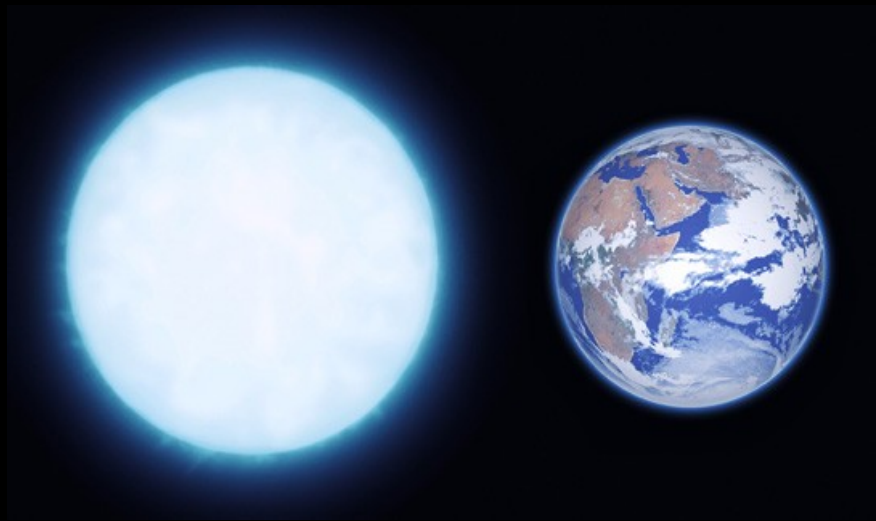
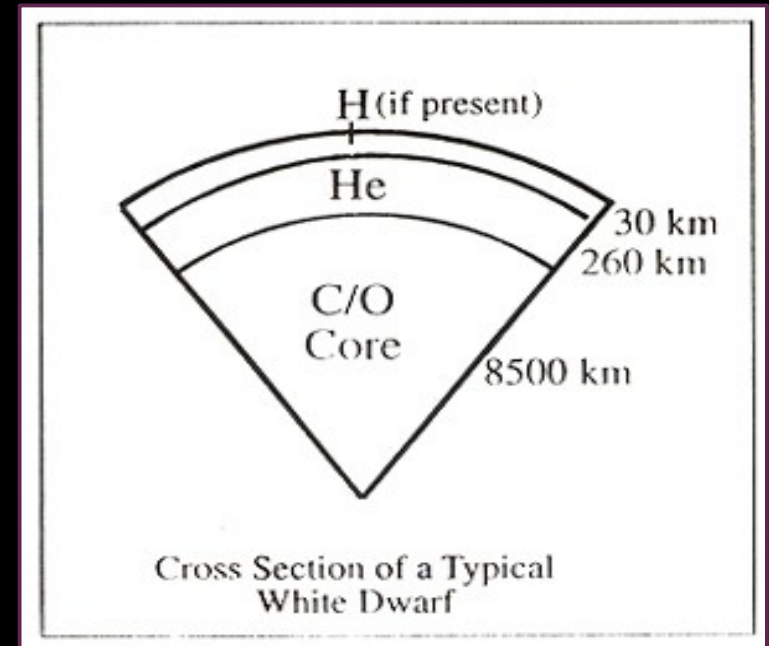
Anãs brancas

Não atinge a temperatura necessária para a queima de carbono.

Estrela anã branca:

Estrela muito compacta

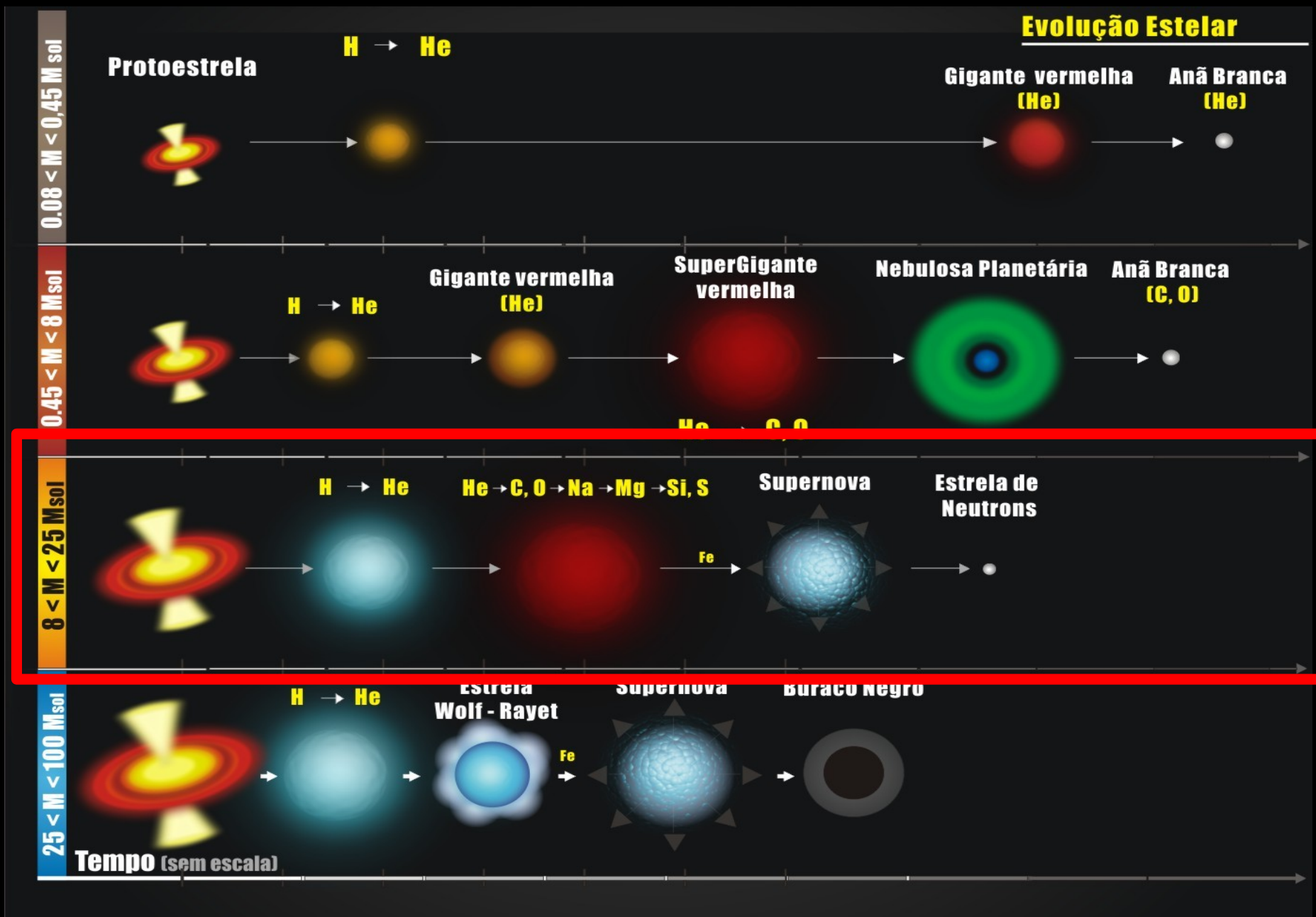
$M \sim 0.6 M_{\text{sol}}$, $R \sim 10.000 \text{ km}$, $\rho \sim 10^6 \text{ g/cm}^3$



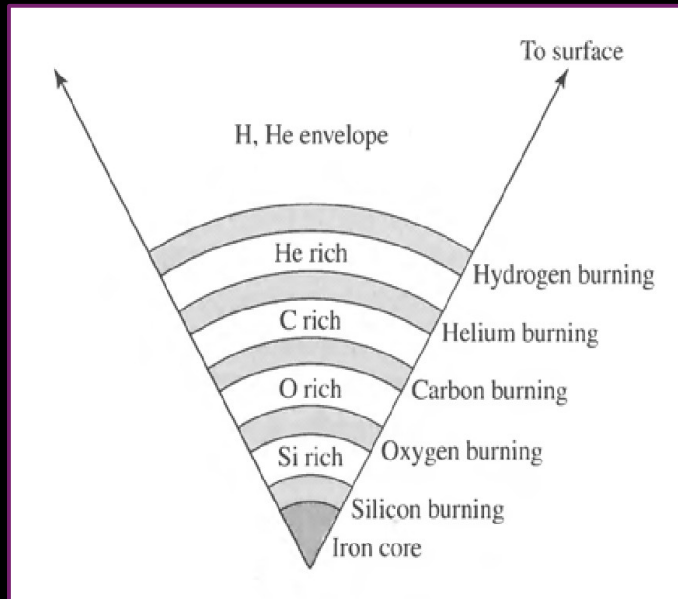
A estrela se esfria liberando a energia térmica armazenada nos íons.

Uma colher pequena pesa 1000 kg

Estrelas isolada: Evolução pós-sequência principal depende da massa inicial.

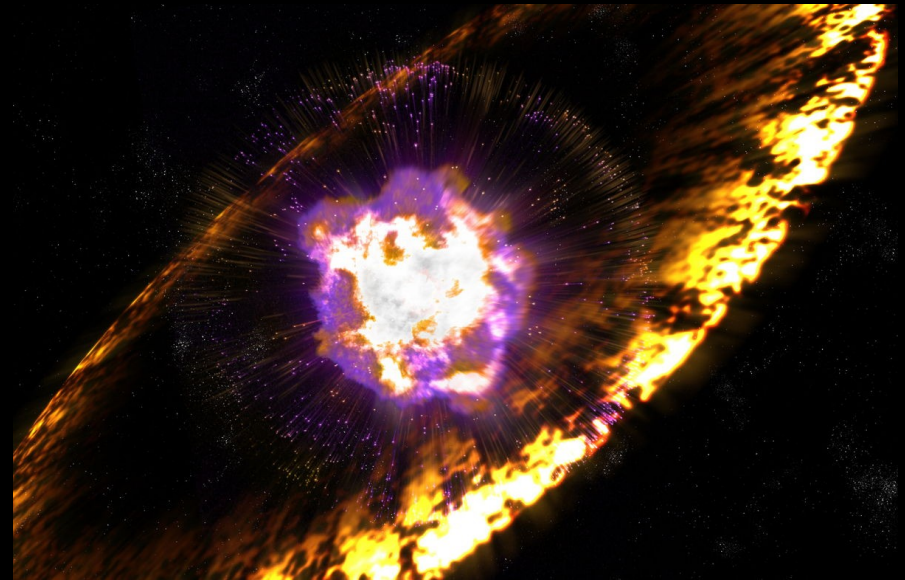


O que acontece com as estrelas massivas?



25 milhões de anos de combustão de hidrogênio

As estrelas massivas conseguem fundir todos os elementos químicos até formar ferro, o elemento mais pesado possível.



Carbono em magnésio, neônio e sódio (~1000 anos)

Oxigênio em neônio ~ anos

Oxigênio em silício e enxofre ~ anos

Silício e outros em ferro ~ dias

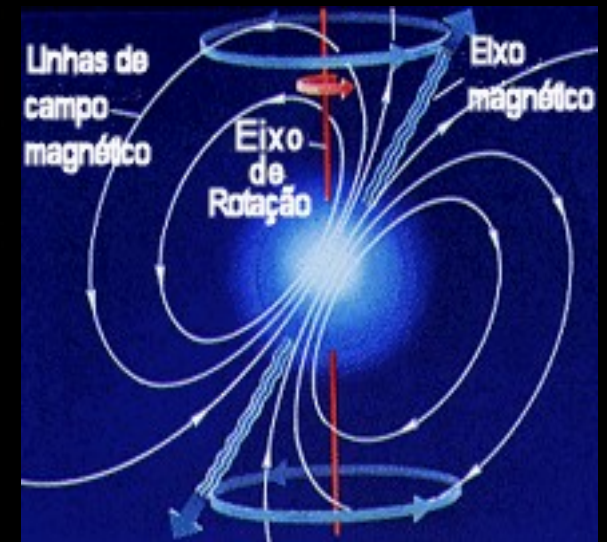
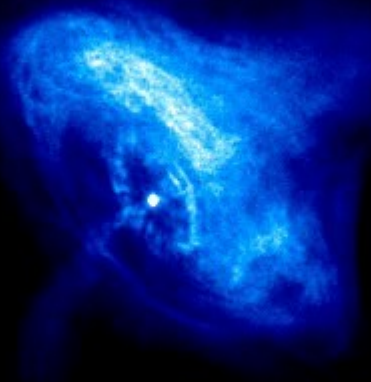
Estrela de Nêutrons

Sem reações nucleares a gravidade comprime o núcleo da estrela até ter 1,4 vezes a massa do Sol numa esfera de 10 km de diâmetro.

Uma colher de matéria pesa 10 bilhões de kg.

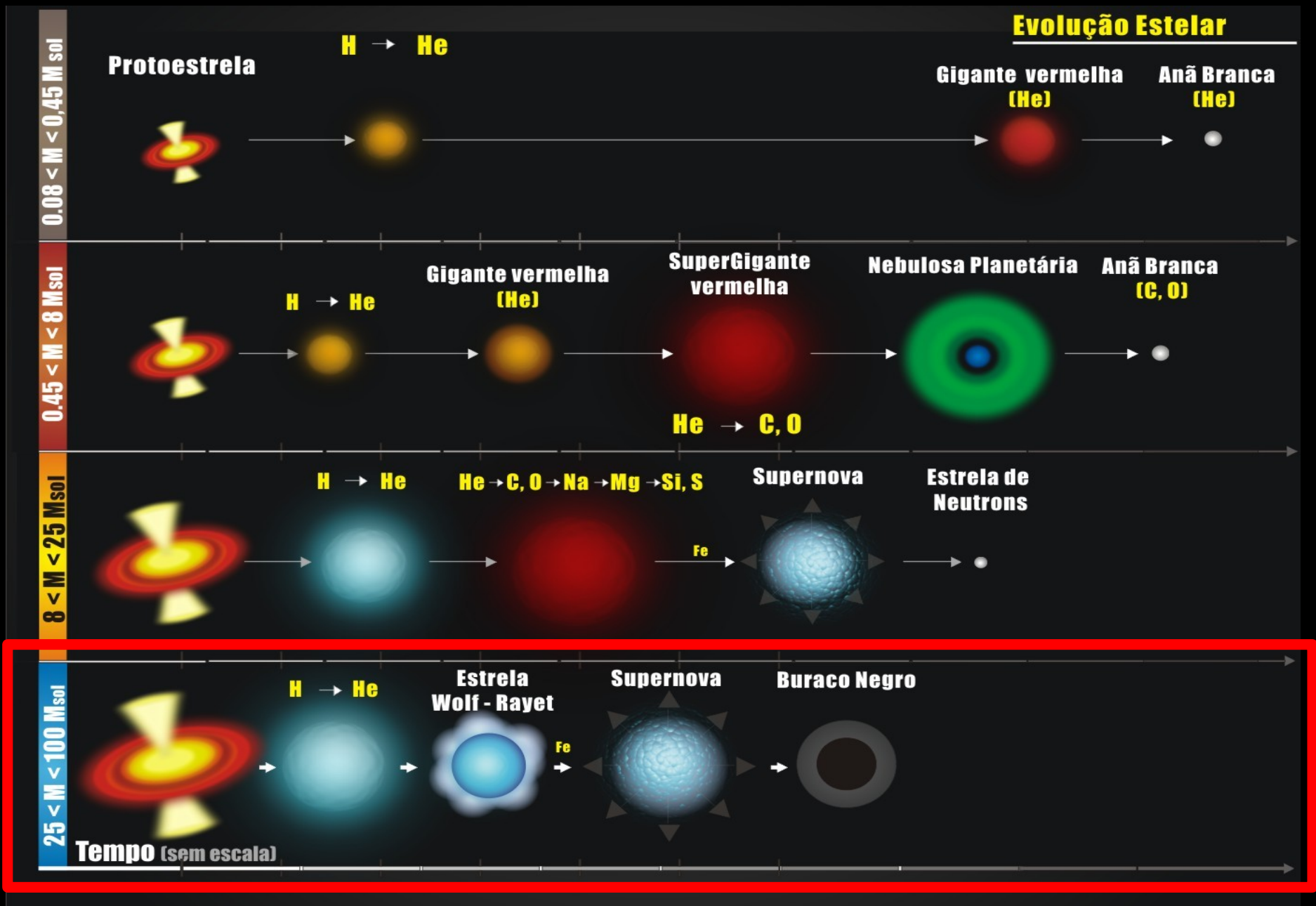


Nebulosa do Caranguejo



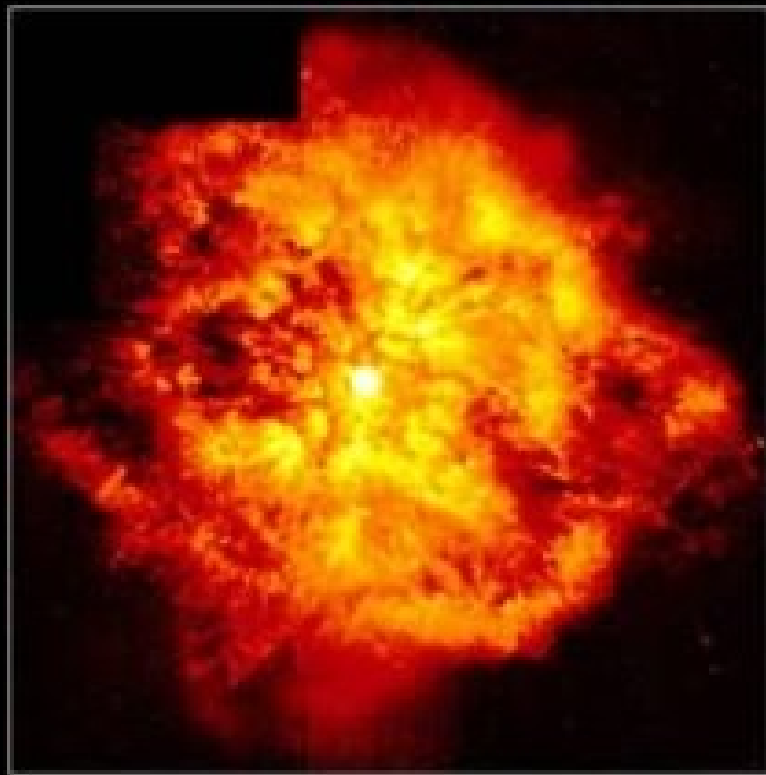
Pulsar Vela em raios-gamma com período de 89 ms.

Estrelas isolada: Evolução pós-sequência principal depende da massa inicial.



Que acontece com as estrelas ainda mais massivas?

- Estrelas Wolf-Rayet: Muito luminosas, ventos fortes 800 – 3000 km/h, perda de masa $10^{-5}M_{\text{sol}}/\text{ano}$ (2×10^{25} kg/ano).
- Passam por todas a etapas de combustão nuclear, até formar um núcleo de ferro em 2 milhões de anos.



92 Jun

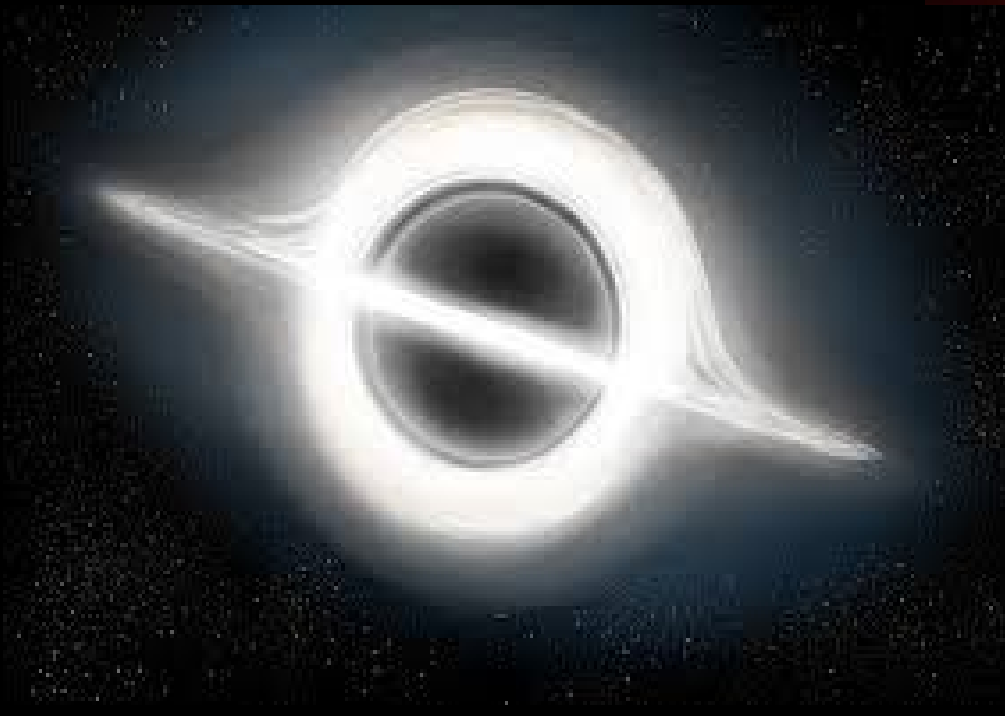
5725 K

3 arcsec



$M > 25 M_{sol}$

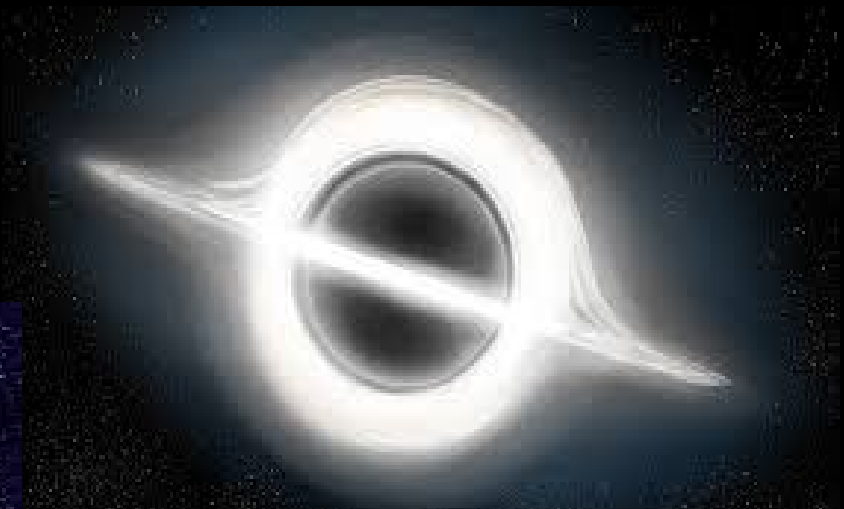
- Colapso do núcleo atinge densidades maiores que as densidades dos núcleos atômicos.
- A estrela explode como uma Supernova formando um Buraco negro $M \sim 6M_{sol}$, $R_{Sol} \sim 20$ km.



Que acontece com as estrelas ainda mais massivas?

A estrela explode como uma Supernova formando um Buraco negro
 $M \sim 6M_{\text{sol}}$, $R \sim 20 \text{ km}$.

A força gravitacional é tão grande que nem a luz consegue fugir



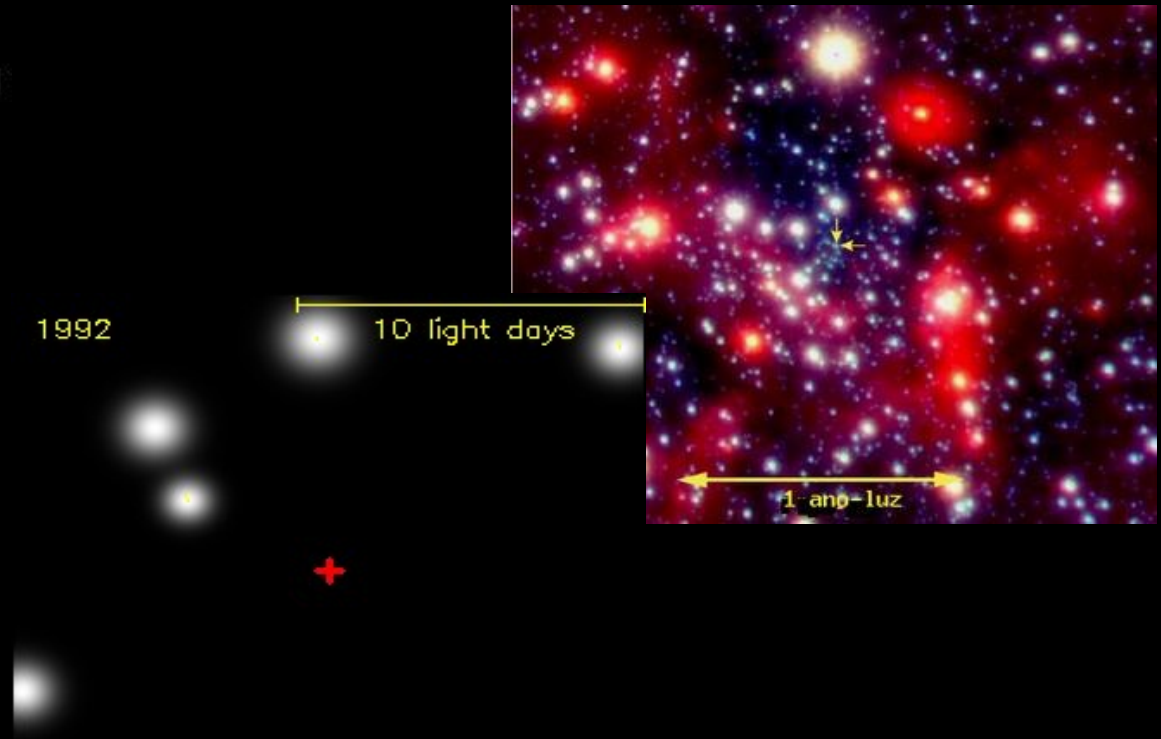
Como detectamos buracos negros?

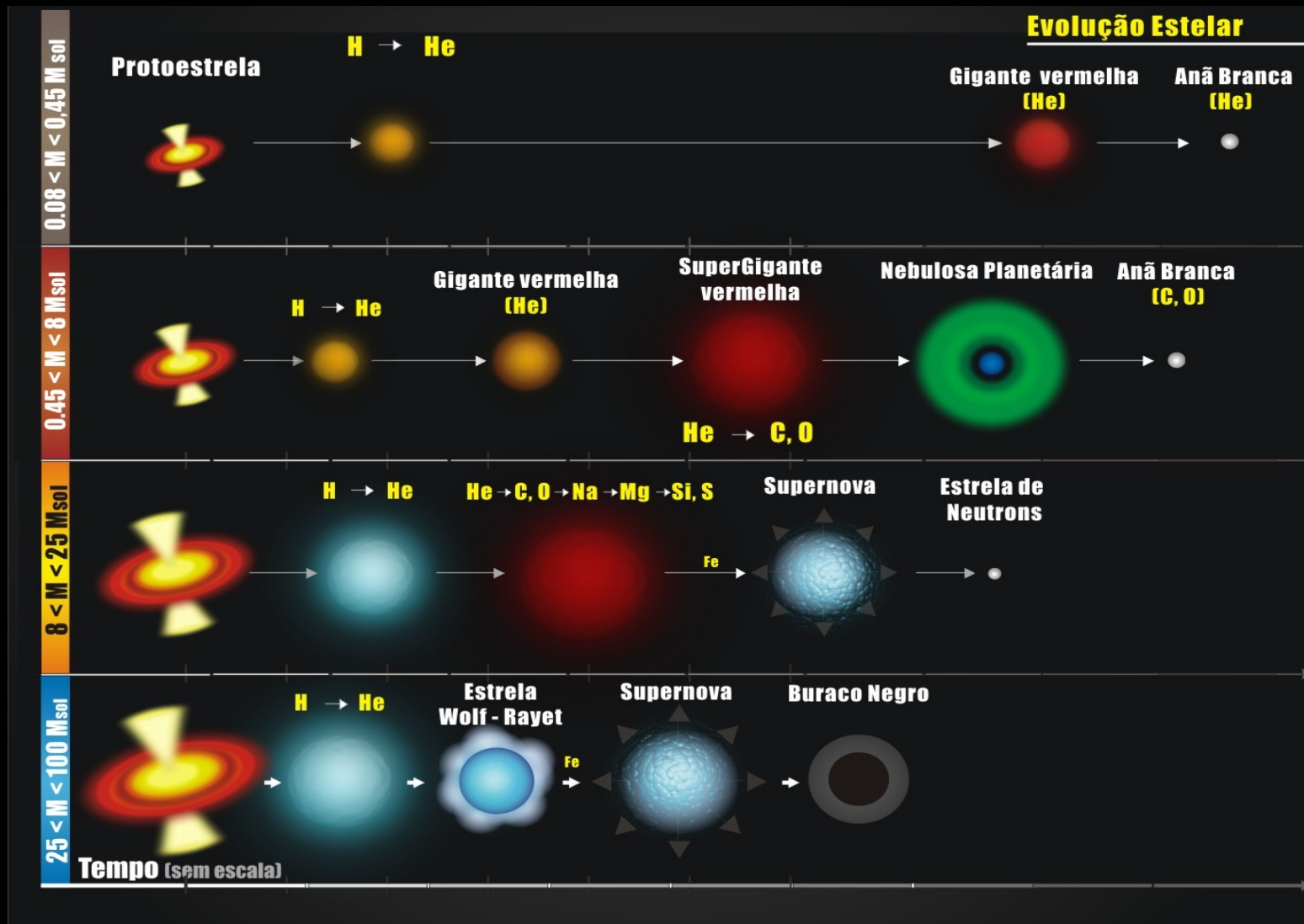
Se o buraco negro tem uma estrela companheira, ele acreta massa formando um disco quente.



Simulação de Cygnus X-1

Pelas órbitas das estrelas:
O movimento do gás e das estrelas no núcleo de nossa Galáxia, a Via Láctea, indica que ali existe um objeto compacto, provavelmente um buraco negro com massa de 3,6 milhões de massas solares.





- Até 10 massas solares -- anã branca -- massa final menor que 1,4 massas solares
- De 10-25 massas solares -- estrela de nêutrons -- massa final 1,4 massas solares
- Acima de 25 massas solare -- buraco negro -- massa final 5-13 massas solares