

# Fundamentos de Astronomia e Astrofísica

## **Evolução Estelar: Pós-Següência Principal**

**Tibério B. Vale**

Veja mais em: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node14.htm>

# Evolução Final das Estrelas

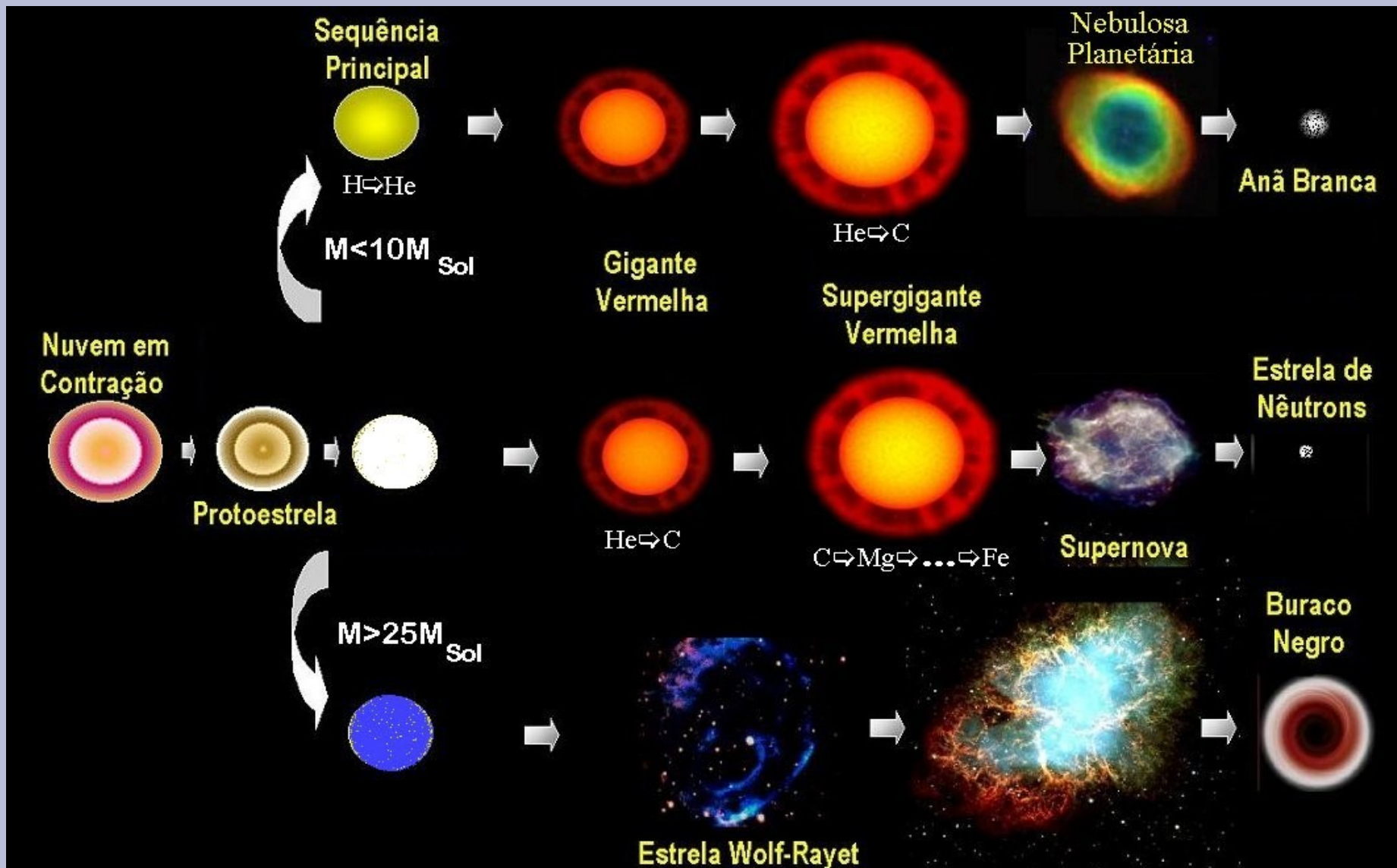
O destino final das estrelas, depois de consumir todo o seu combustível nuclear, depende de duas coisas:

1) Binarismo: Se a estrela é simples ou se faz parte de um sistema múltiplo (~60 % faz parte);

- Neste caso sua evolução depende tanto da massa quanto da separação entre as estrelas, que determinará quando na evolução as estrelas interagirão.

2) Massa inicial da estrela;

# Evolução Final das Estrelas



**Aproximadamente 98% de todas as estrelas tornam-se anãs brancas.**

# Evolução Final das Estrelas

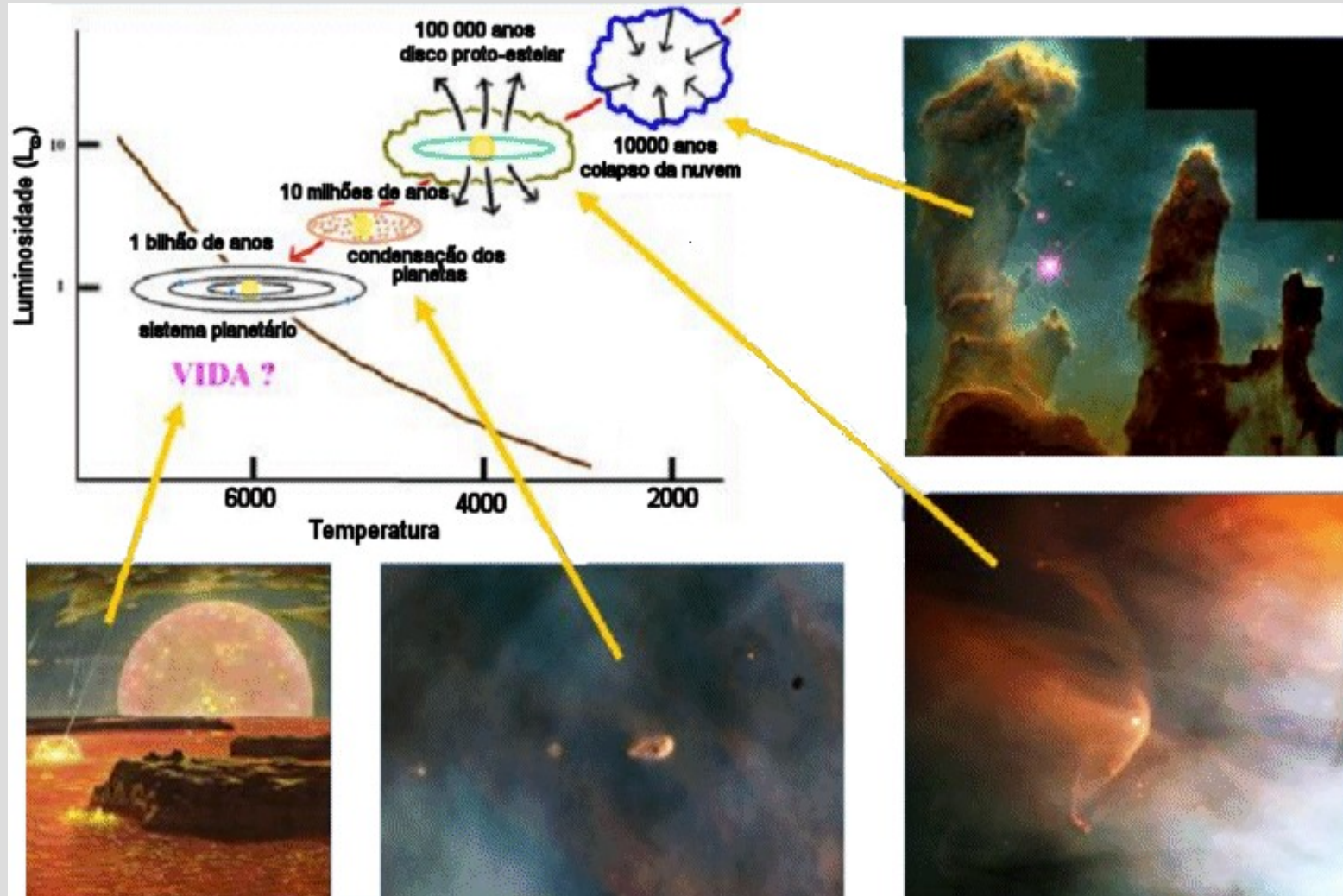
A evolução de 98% das estrelas para Anãs Brancas vem da Função Inicial de Massa

$$\text{IMF} = n(M) \sim M^{-2.35}$$

- nascem 300 estrelas de 1 MSol para cada uma estrela de 10MSol ( $1^{-2.35}/10^{-2.35}$ );
- 300 estrelas de 10 MSol para cada uma estrela de 100MSol.

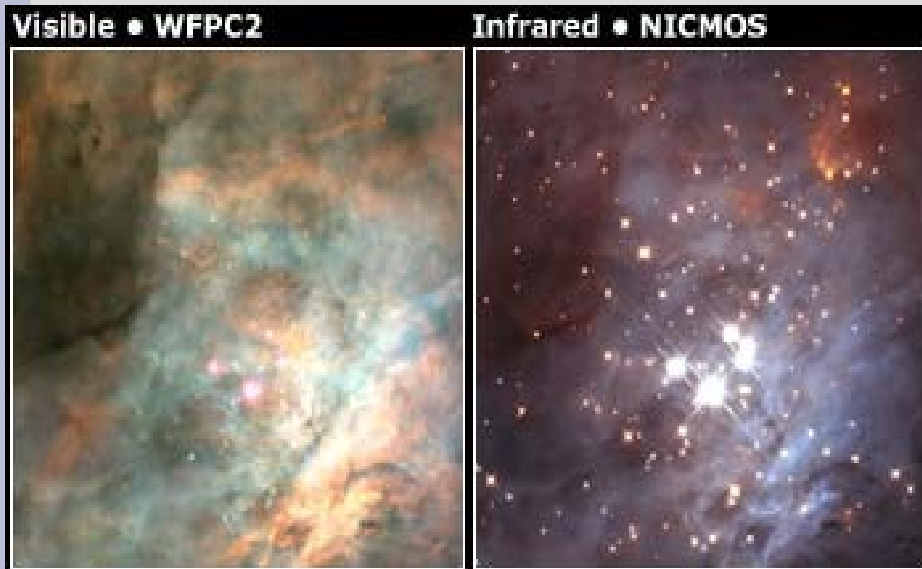
# Contração de nuvem proto-estelar

Durante a formação, uma nuvem de gás se contrai, formando uma proto-estrela.



# Evolução estelar para diferentes massas

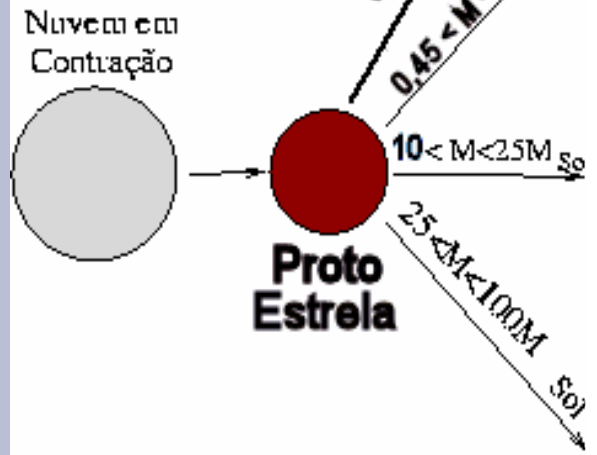
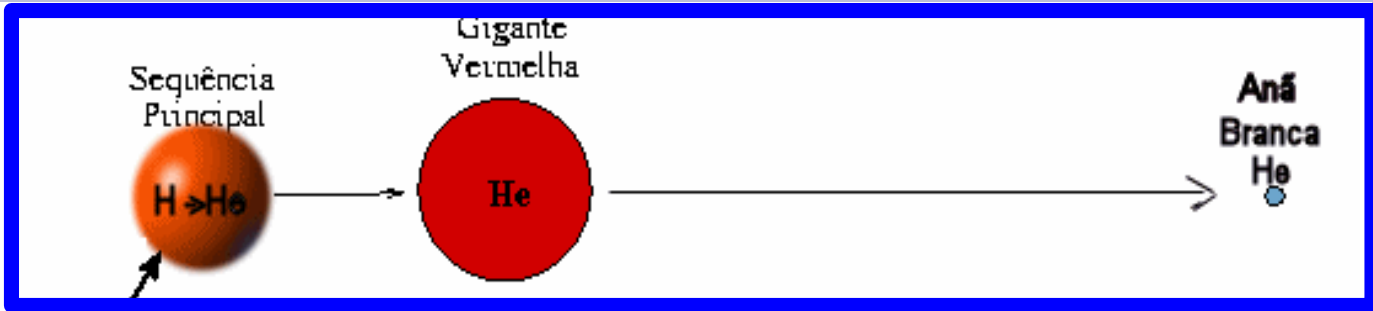
- Quando a temperatura no núcleo fica suficientemente alta (8 milhões K) para iniciar reações nucleares estáveis, a proto-estrela torna-se uma estrela da SP, transformando hidrogênio em hélio no núcleo.
- Se a massa for  $< 0,08 M_{\text{Sol}} = 73 M_{\text{Júpiter}}$ , ela será uma anã marrom. Não será uma estrela pois nunca terá reações nucleares transformando hidrogênio em hélio ( $T_{\text{núcleo}} < 8$  milhões K).



50 Anãs Marrons foram descobertas na nebulosa de Órion

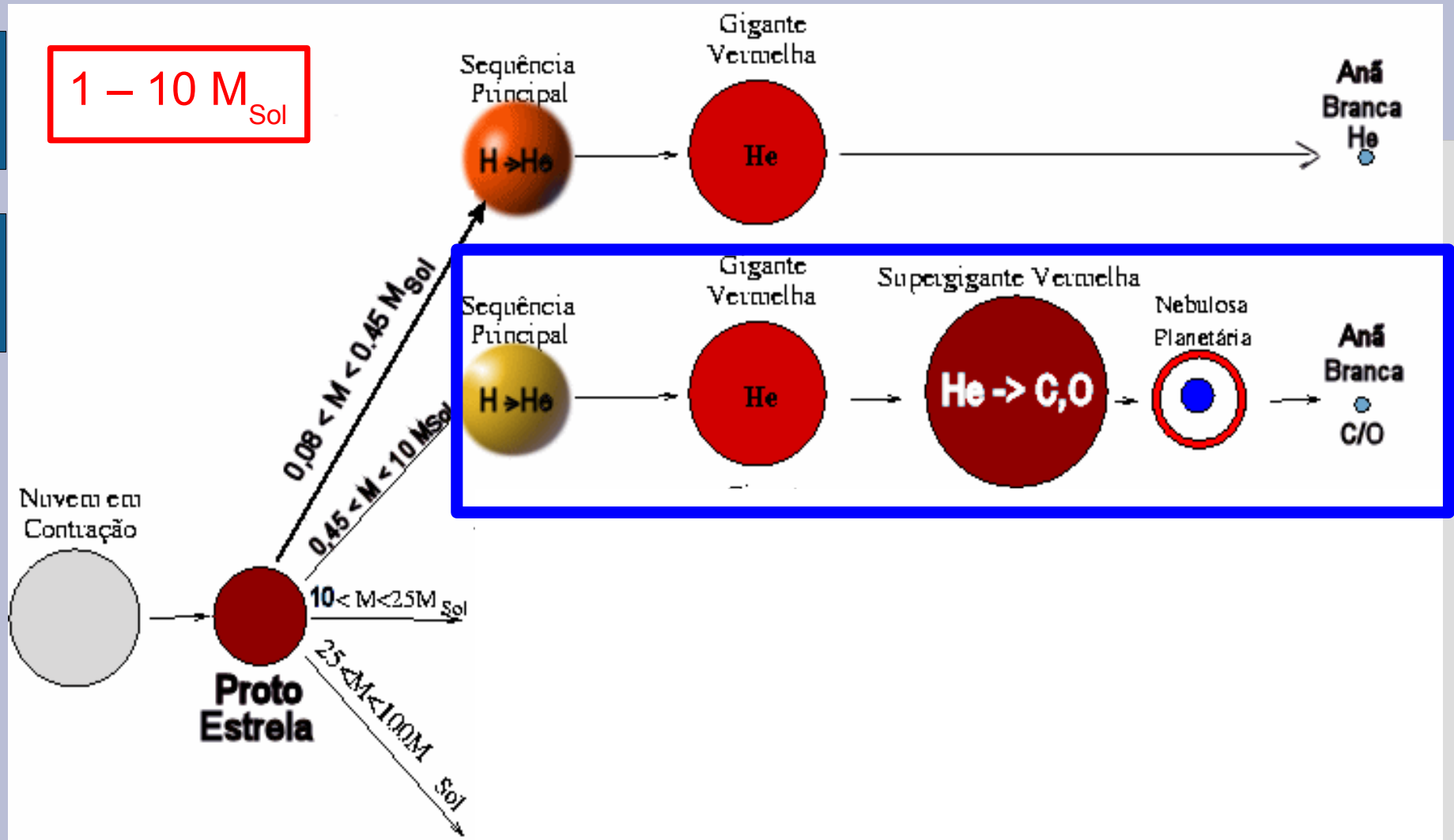
# Evolução estelar para diferentes massas

0,08 - 0,8  $M_{\text{Sol}}$



- Se a massa da estrela for entre  $0,08 M_{\text{Sol}}$  e  $0,45 M_{\text{Sol}}$  ela se tornará uma anã branca com núcleo de hélio.

# Evolução estelar para diferentes massas

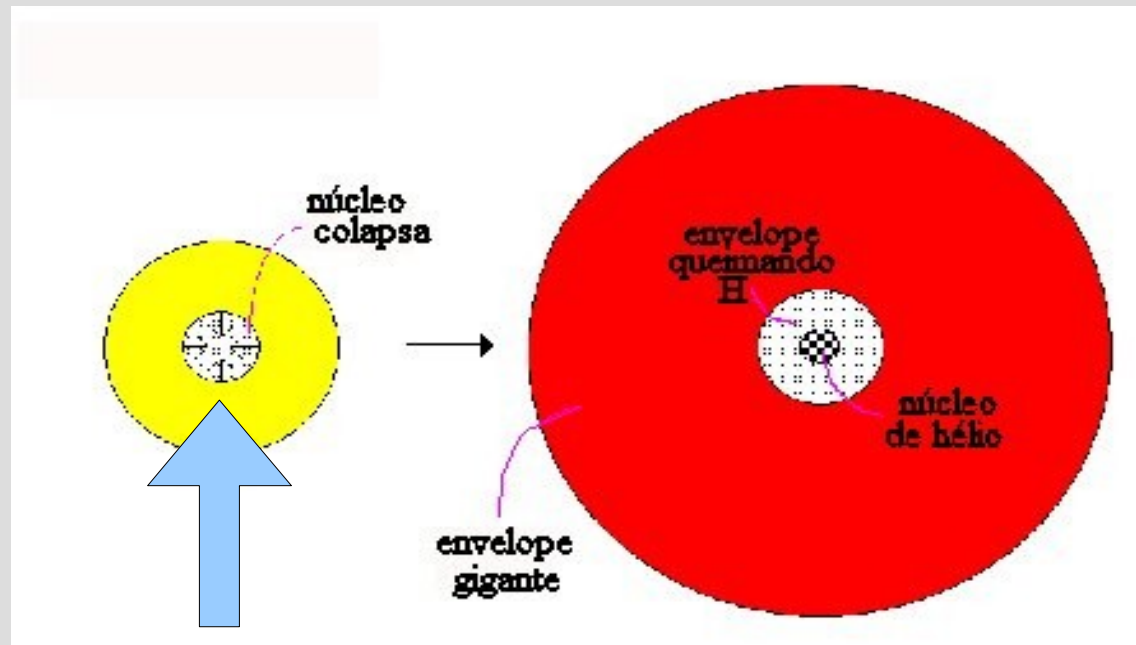




# Evolução estelar para diferentes massas

1 – 10  $M_{\text{Sol}}$

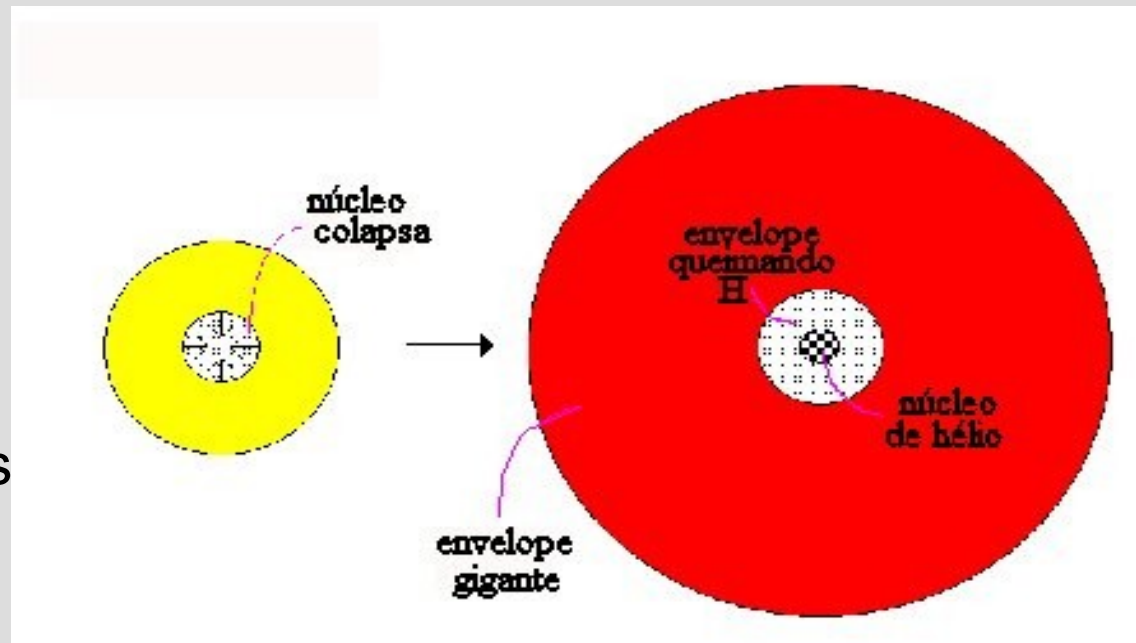
- A vida do Sol na seqüência principal está estimada em 10 a 11 bilhões de anos.
- Quando as estrelas consomem o hidrogênio no núcleo, que corresponde a aproximadamente 10% da sua massa total (50 000 km no Sol), elas saem da seqüência principal.



# Evolução estelar para diferentes massas

$1 - 10 M_{\text{Sol}}$

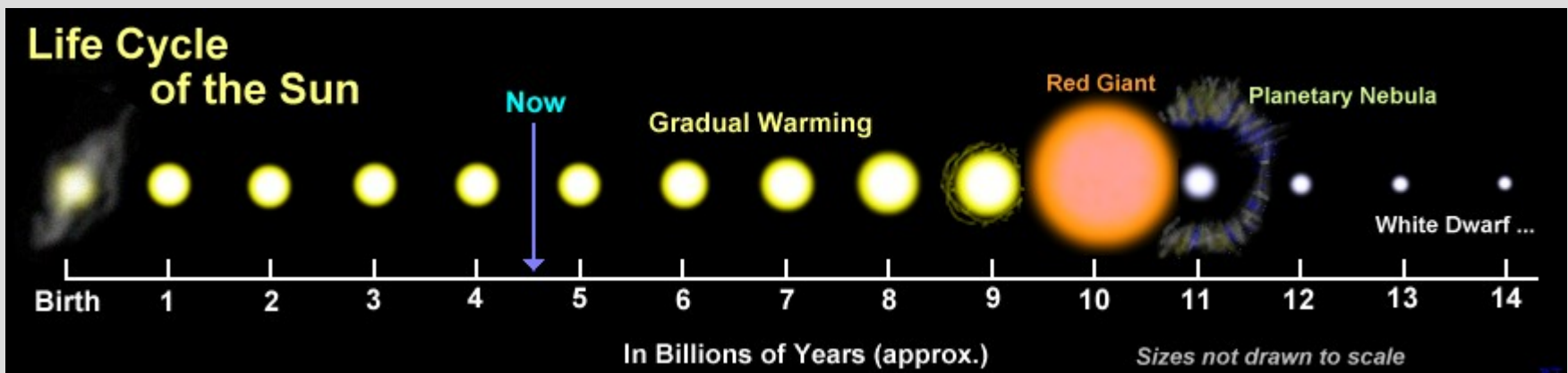
- Como nenhuma energia nuclear é gerada no núcleo nesta fase, ele se contrai rapidamente, e a luminosidade da estrela aumenta um pouco.
- A geração de energia nuclear passa a se dar em uma camada externa a este núcleo, com aproximadamente 2 000 km de espessura, onde a temperatura e a densidade são suficientes para manter as reações nucleares.



# Evolução estelar para diferentes massas

1 – 10  $M_{\text{Sol}}$

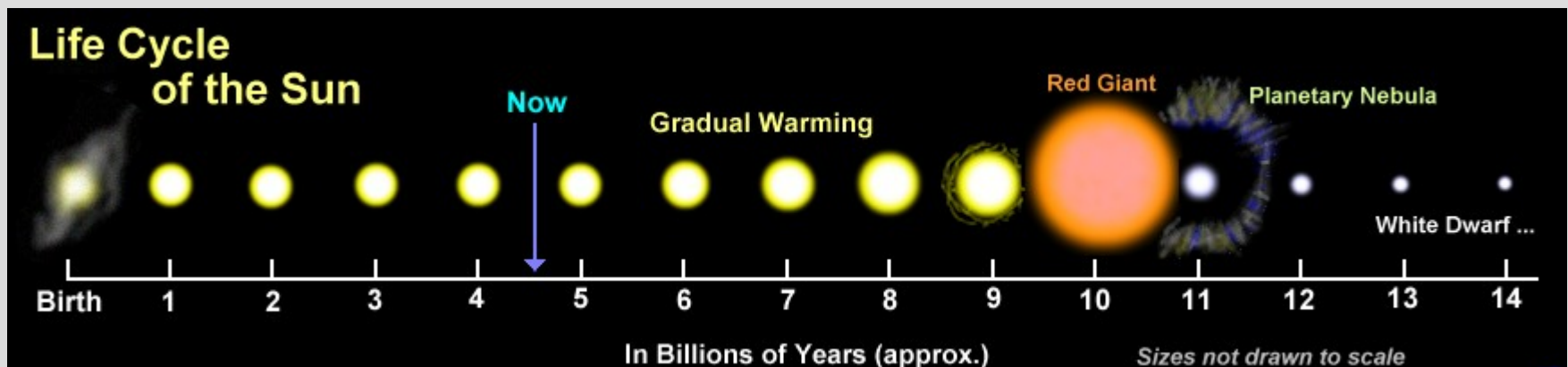
- As camadas externas se reajustam ao aumento de luminosidade expandindo-se, e como a área superficial aumenta, sua temperatura diminui.
- A luminosidade aumenta e a estrela torna-se mais vermelha, aproximando-se do ramo das gigantes no diagrama HR.
- Quando o Sol atingir esta fase, daqui há 6,5 bilhões de anos, a radiação solar atingindo a Terra será tão intensa que a temperatura na superfície da Terra atingirá 700 C, os oceanos ferverão, deixando a Terra seca.



# Evolução estelar para diferentes massas

$1 - 10 M_{\text{Sol}}$

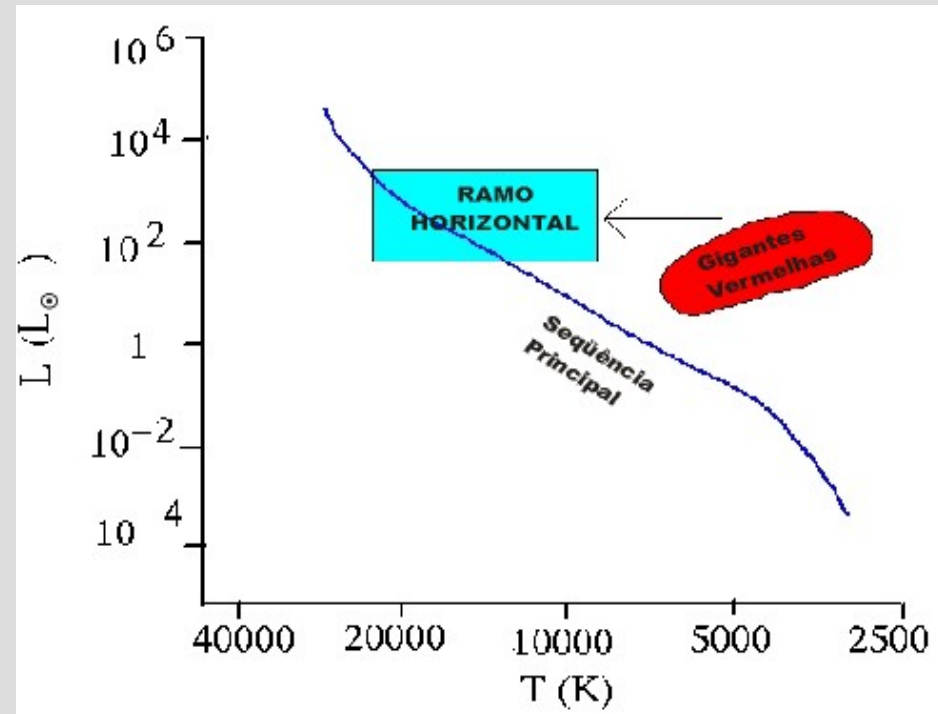
- A atmosfera se esvairá, pois os átomos e moléculas estarão se movendo a velocidades tão altas que escaparão da Terra.
- No centro do Sol, a temperatura atingirá 100 milhões de Kelvin, e a reação triplo- $\alpha$ , (Salpeter), iniciará, combinando três núcleos de hélio (partículas  $\alpha$ ) em um núcleo de carbono.



# Evolução estelar para diferentes massas

1 – 10  $M_{\text{Sol}}$

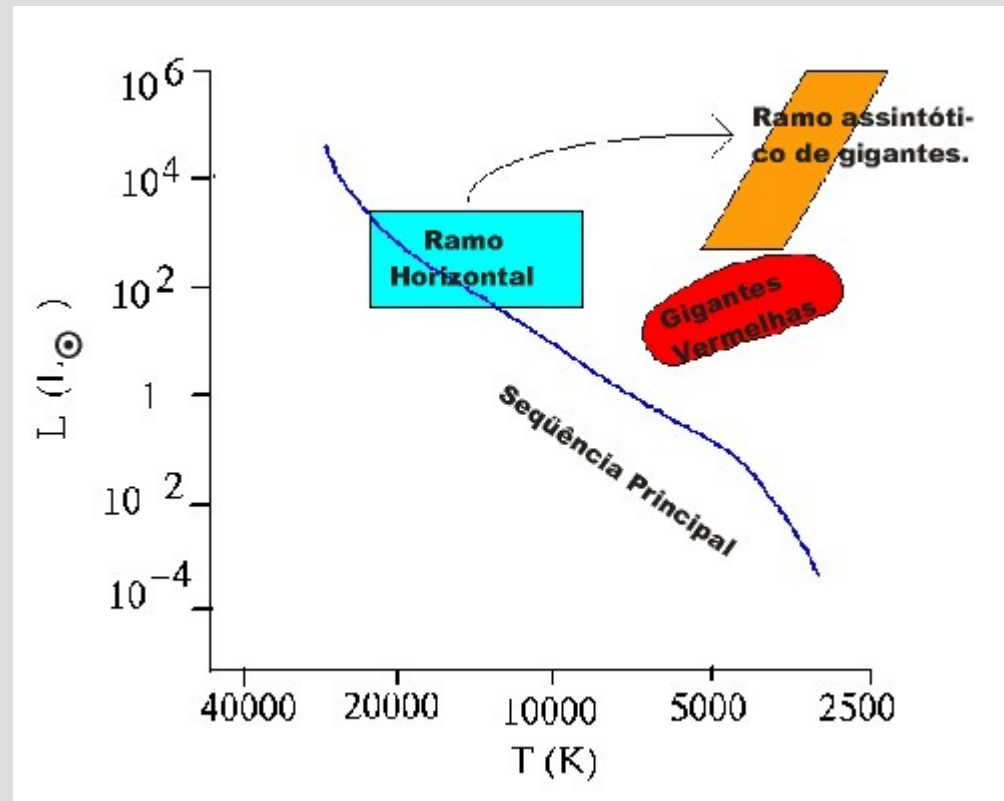
- O Sol será então uma gigante vermelha, transformando hélio em carbono no núcleo, e hidrogênio em hélio em uma fina camada mais externa.
- A massa do Sol não é suficiente para que a temperatura do núcleo alcance um  $10^9$  K, necessária para queimar o carbono
- Quando estas estrelas transformam o hélio nuclear em carbono, elas saem do ramo das gigantes e passam para o ramo horizontal.



# Evolução estelar para diferentes massas

1 – 10  $M_{\text{Sol}}$

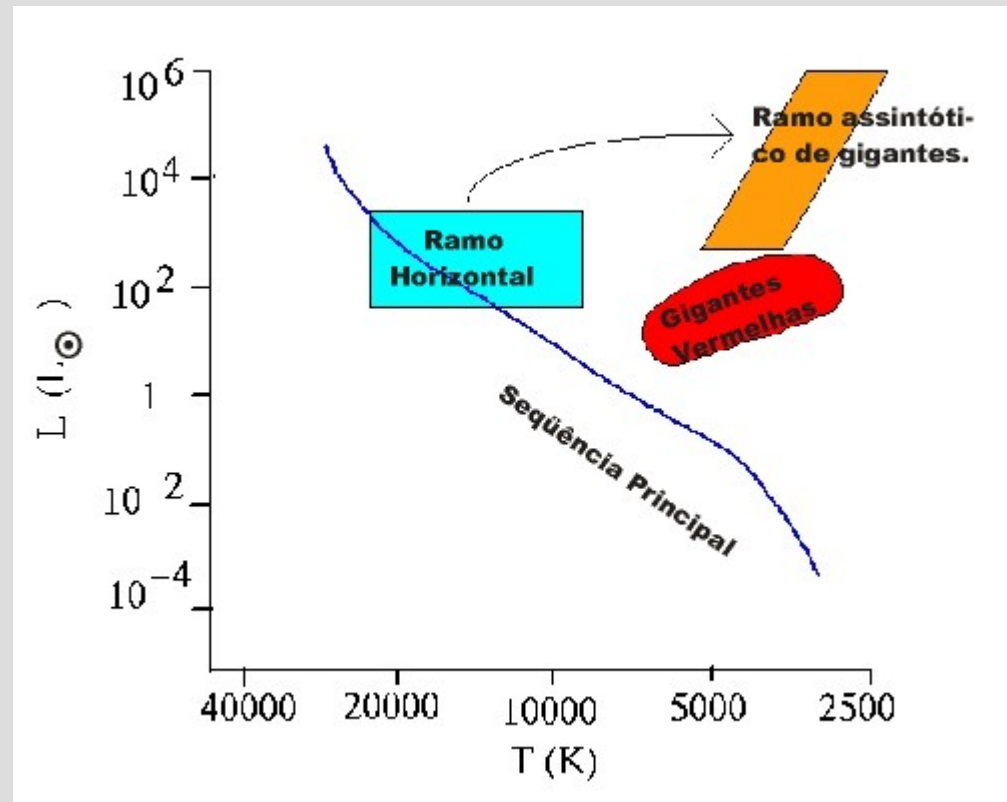
Quando o hélio nuclear for todo transformado em carbono, e parte em oxigênio, as estrelas entram no ramo das supergigantes, chamado também de Ramo Assintótico das Gigantes (AGB).



# Evolução estelar para diferentes massas

$1 - 10 M_{\text{Sol}}$

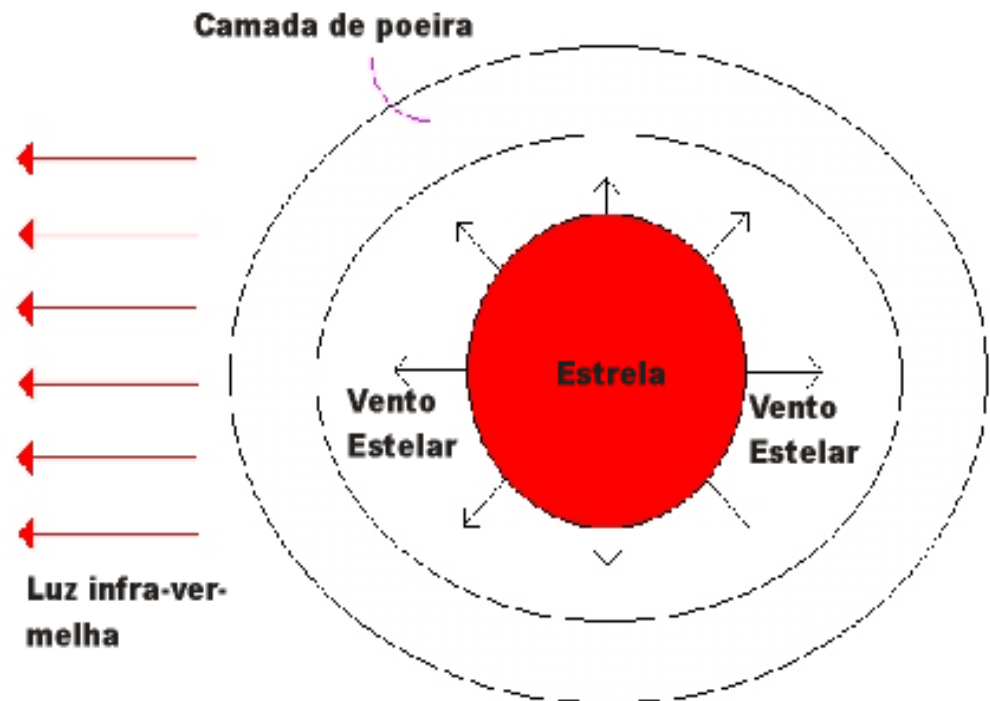
- Inicialmente, a maior parte da energia é produzida na camada rica em hidrogênio (externa), sendo a camada de hélio relativamente pequena.
- À medida em que a camada de hidrogênio deposita mais hélio, aumenta a produção de energia via fusão de hélio, levando a um evento explosivo chamado de pulso térmico.



# Evolução estelar para diferentes massas

1 – 10  $M_{\text{Sol}}$

- Nesta fase aumenta de tamanho e luminosidade.
- A estrela começa a produzir um vento de partículas carregadas que dela se perdem. Há portanto perda de massa pela estrela, que se desfaz de grande parte de suas regiões mais externas



**Estrelas do ramo assintótico estão envoltas em uma camada de poeira produzida pela seu próprio vento estelar. Esta camada bloqueia a luz visível, mas emite luz no infra-vermelho.**



# Evolução estelar para diferentes massas

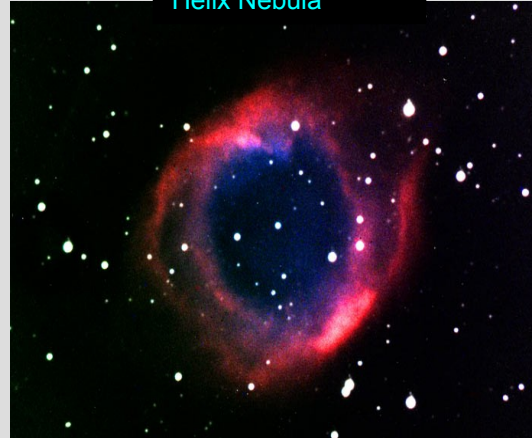
1 – 10  $M_{\text{Sol}}$

- Após passar outras centenas de milhares de anos no ponto superior direito deste diagrama, chamado de ramo gigante assintótico (AGB), a estrela ejetará uma **nebulosa planetária**, e o núcleo remanescente será uma estrela **anã branca**.

Clownface Nebula



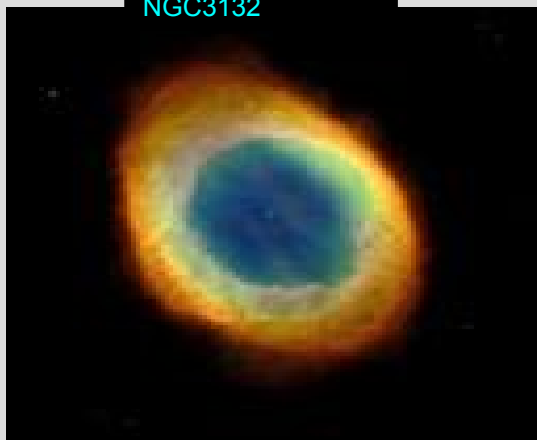
Helix Nebula



IC 418



NGC3132



NGC 6543

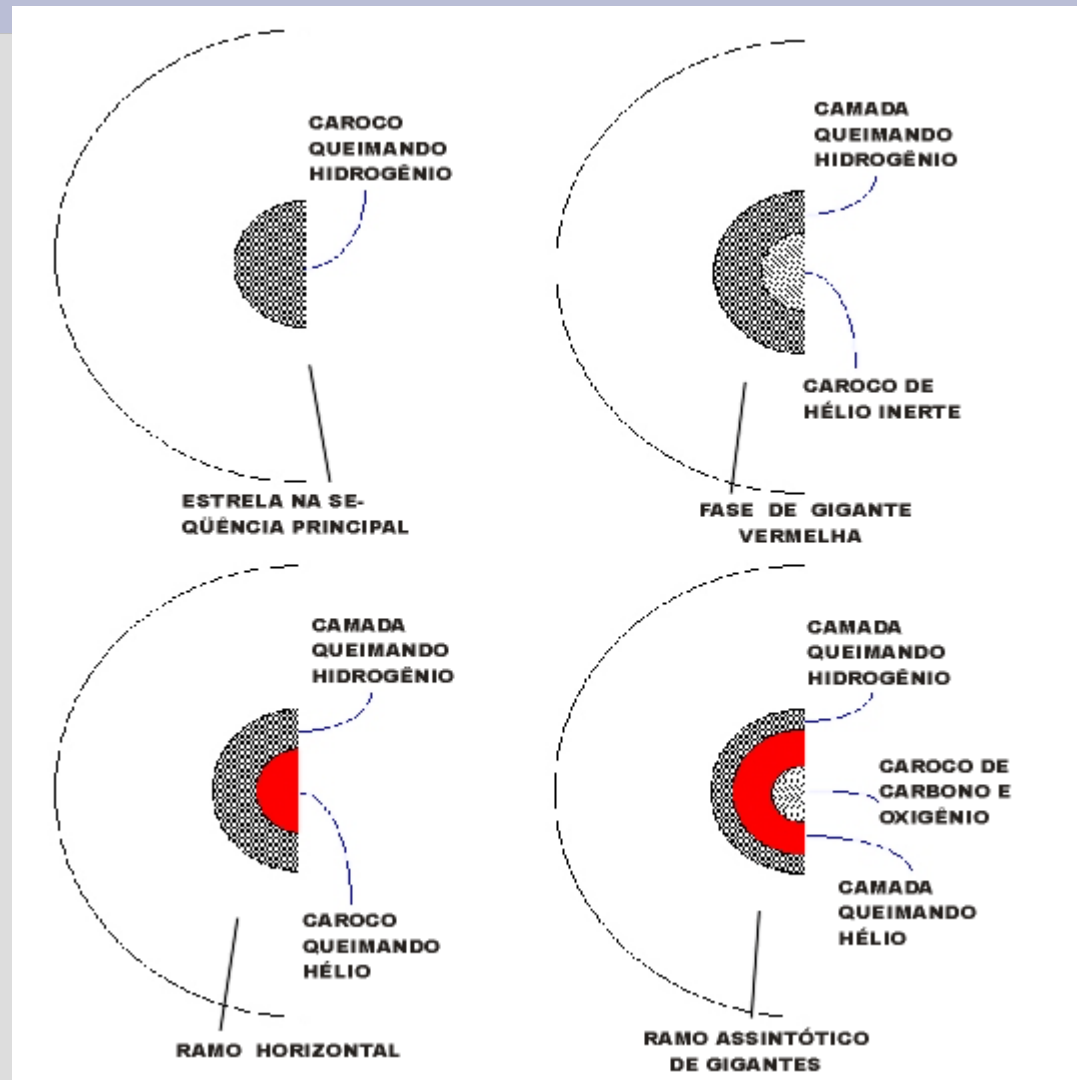


NGC 2440



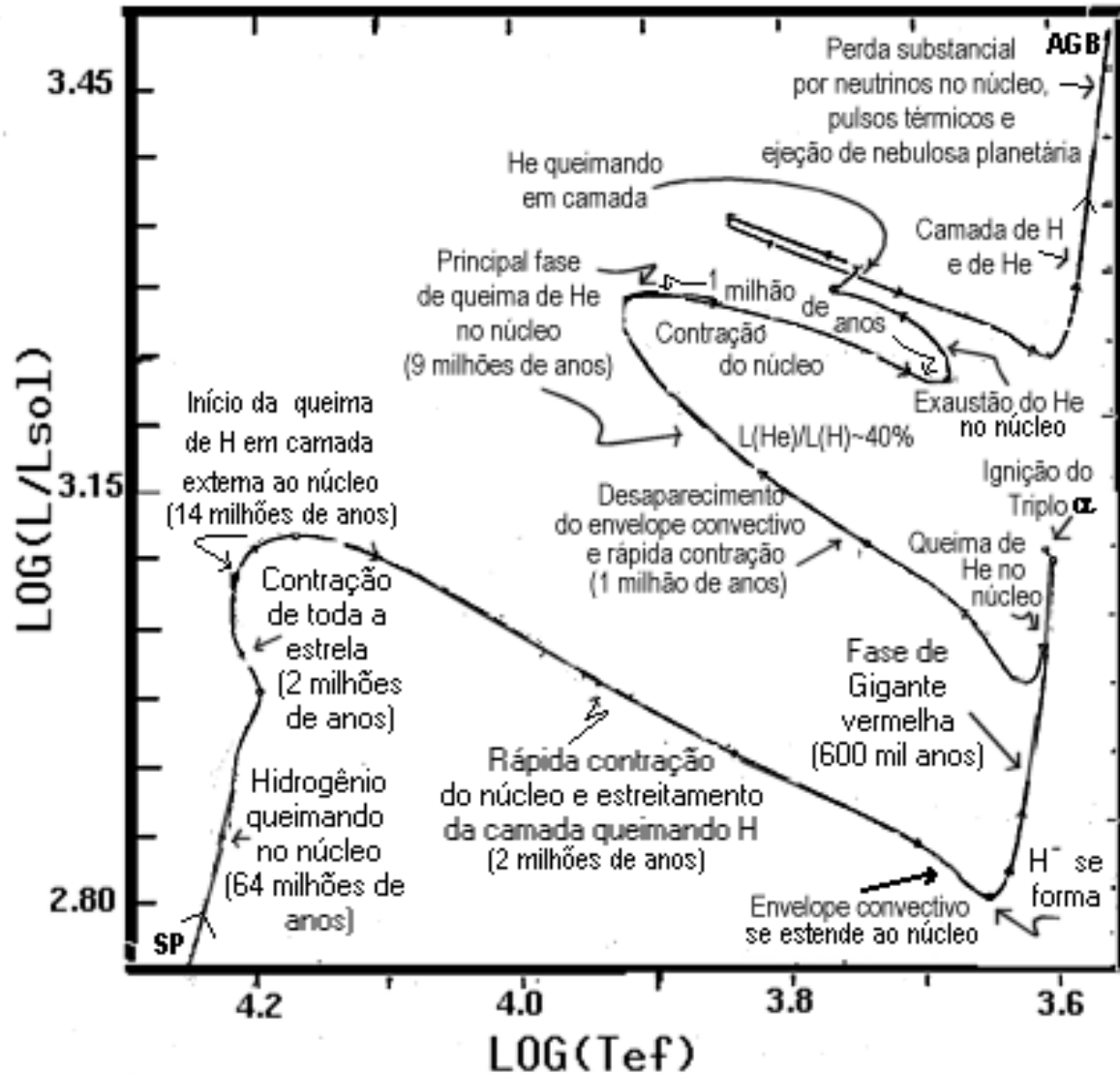
# Evolução estelar para diferentes massas

1 – 10  $M_{\text{Sol}}$



# Evolução estelar para diferentes massas

1 – 10  $M_{\text{Sol}}$



# Evolução estelar para diferentes massas

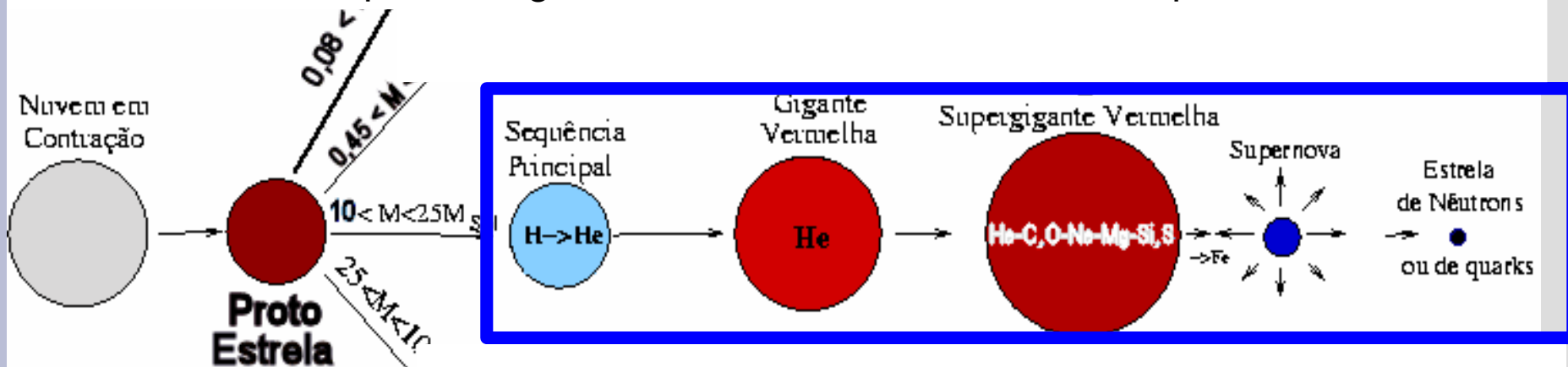
1 – 10  $M_{\text{Sol}}$

Estágio	Duração	Temperatura	Temperatura	Raio
1 $M_{\text{Sol}}$	(anos)	Central ( $10^6$ K)	Efetiva (K)	(700 000km)
Seqüência Principal	10 bilhões	15	5400	1
Subgigante	100 milhões	50	4000	3
Flash de hélio	100 mil	100	4000	100
Ramo Horizontal	50 milhões	200	5000	10
Supergigante	10 mil	250	4000	500
Nebulosa Planetária	10 mil	300	100 000(3000 nebula)	0,01(1000 nebula)
Anã Branca	11 bilhões	100	100 000 a 3000	0,01
Anã Preta	$10^{15}$ a $10^{37}$	5K	5	0,01

# Evolução estelar para diferentes massas

Se a estrela iniciar sua vida com massa entre 10 e 25 MSol, após a fase de supergigante ela ejetará a maior parte de sua massa em uma explosão de supernova, e terminará sua vida como uma estrela de nêutrons, com uma temperatura superficial acima de 1 milhão de graus K, massa de cerca de 1,4 MSol, e raio de cerca de 20 km.

Se esta estrela possuir campo magnético forte, ela emitirá luz direcionada em um cone em volta dos pólos magnéticos, como um farol, e será um pulsar.



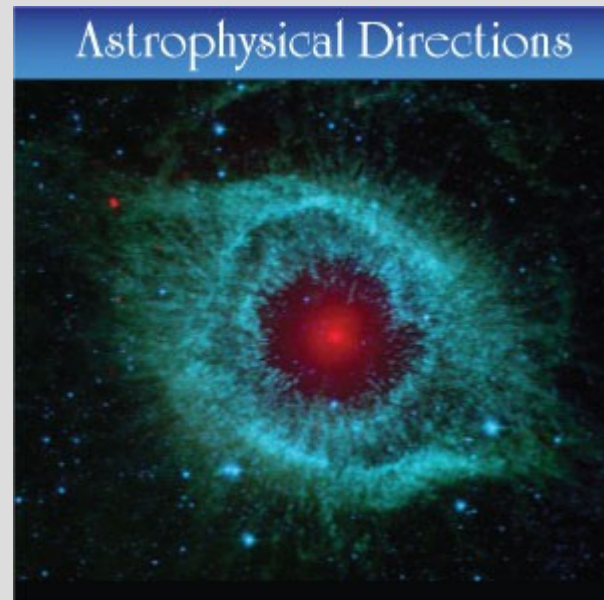
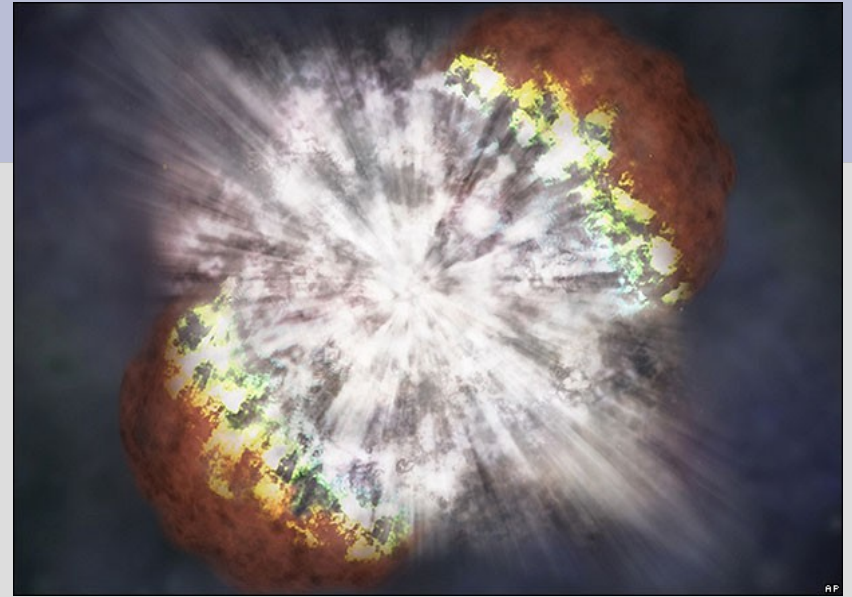
Quanto maior a massa das estrelas mais rápido elas evoluem: uma estrela de 10 massas solares sai da seqüência principal em 100 milhões de anos.

$$10-25 M_{\text{Sol}}$$

$$\tau_{SP} = \frac{1}{(M/M_{\odot})^2} 10^{10} \text{anos}$$

# Evolução estelar para diferentes massas

10-25  $M_{\text{Sol}}$



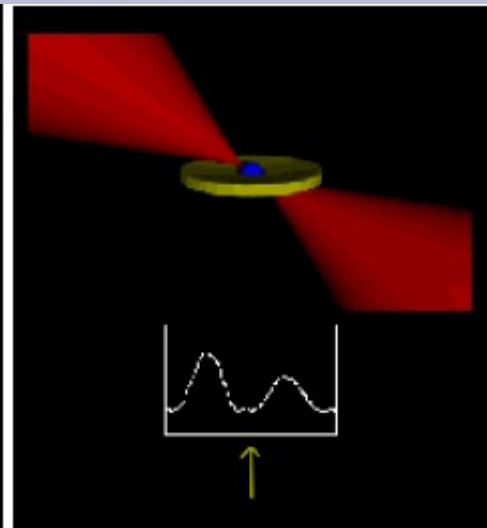
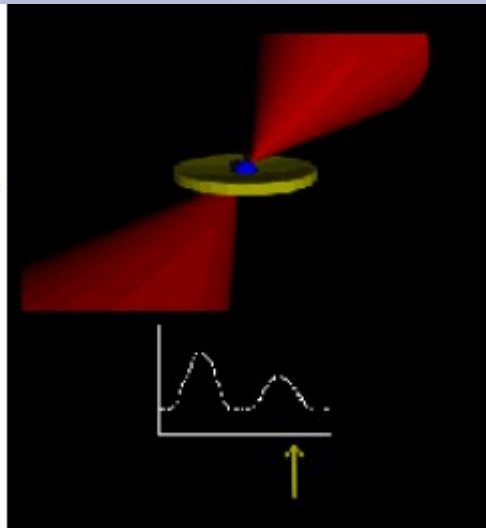
# Evolução estelar para diferentes massas

10-25  $M_{\text{Sol}}$

- A explosão de supernova ocorre porque, após a formação do núcleo de ferro, o núcleo colapsa violentamente em alguns segundos, sob o peso de sua própria atração gravitacional, sem ter outro combustível para liberar energia nuclear.
- As camadas superiores, contendo aproximadamente 90% da massa colapsam então sobre este núcleo, e após o comprimirem até o limite das leis físicas, são empurradas para fora com velocidades de milhares de quilômetros por segundo.
- Tanta energia é liberada em um colapso de supernova que ela brilha com a luminosidade de uma galáxia de 200 bilhões de estrelas.

# Evolução estelar para diferentes massas

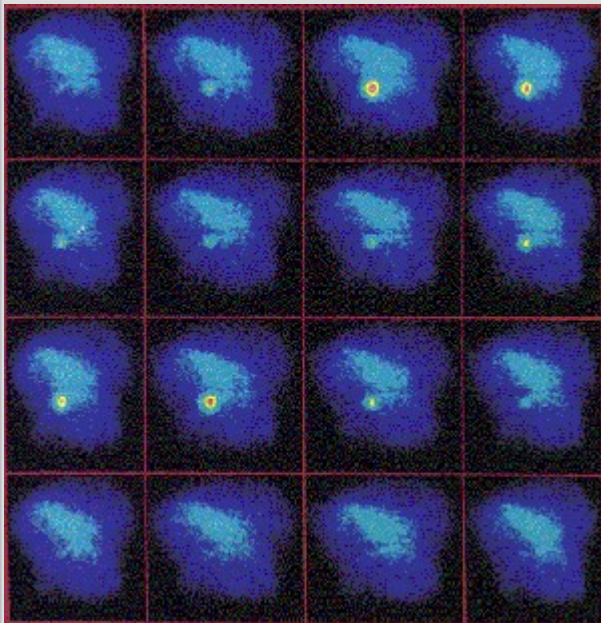
10-25  $M_{\text{Sol}}$



Simulação da aproximação a um pulsar, mostrando o feixe de luz orientado com os pólos magnéticos.

A detecção de pulsares é estatística

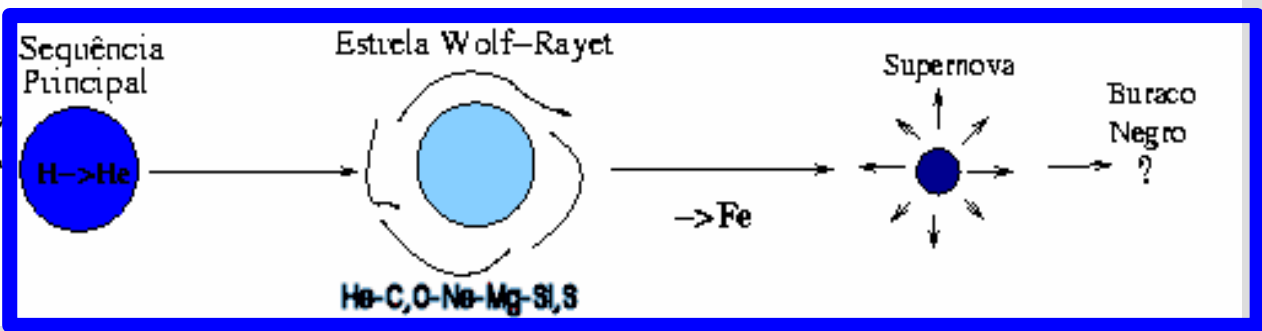
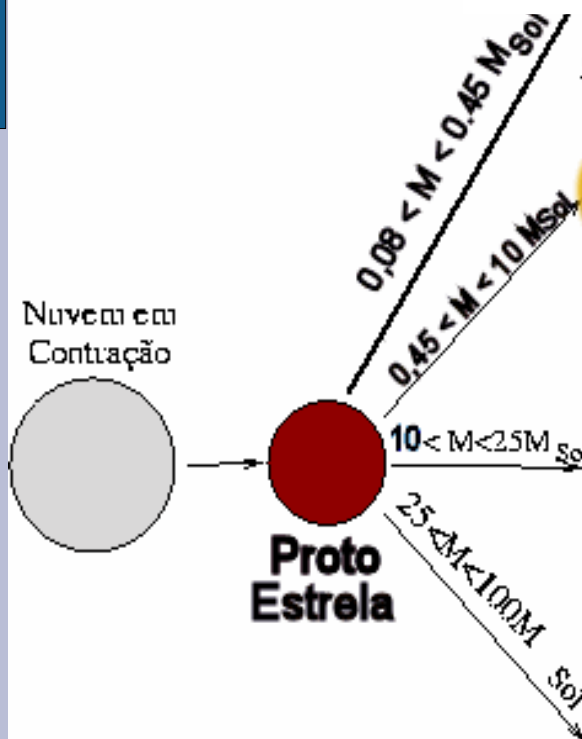
Seqüência de fotos do pulsar da Nebulosa do Caranguejo, com período de 33 ms.





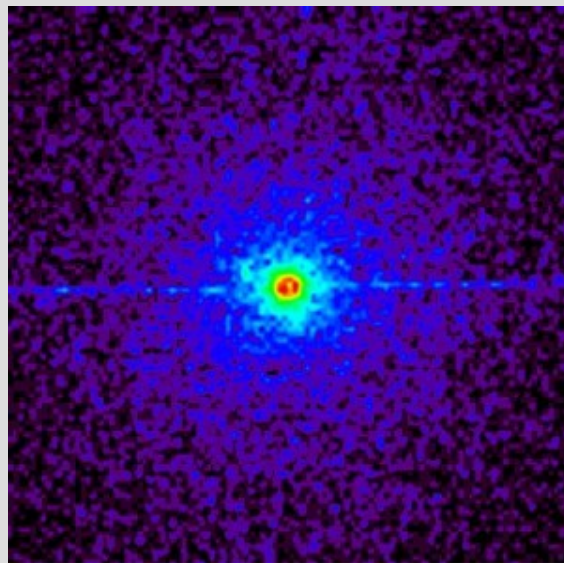
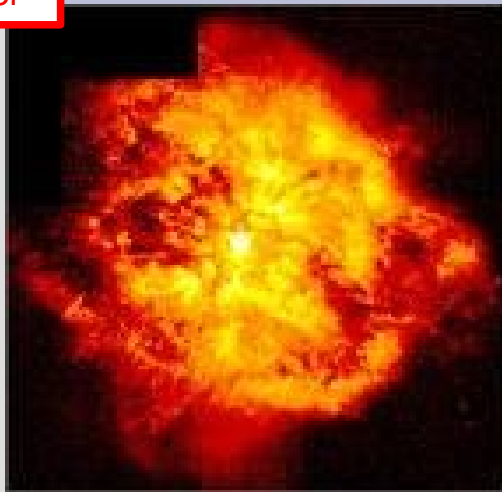
# Evolução estelar para diferentes massas

25-100  $M_{\text{Sol}}$



# Evolução estelar para diferentes massas

25-100  $M_{\text{Sol}}$



# Evolução estelar para diferentes massas

- Se a estrela iniciar sua vida com massa entre 25 e 100  $M_{\text{Sol}}$ , após a fase de supernova restará um buraco negro, com massa da ordem de 6  $M_{\text{Sol}}$ , e raio do horizonte de 18 km.
- O raio do horizonte, ou raio de Schwarzschild é a distância ao buraco negro dentro da qual nem a luz escapa:

$$R_{\text{sch}} = 2GM / c^2$$

- Não há, ainda, evidências claras da detecção de buracos negros estelares.
- Para algumas estrelas massivas, os modelos de deflagração da explosão de supernova prevêm dispersão total da matéria.