

Massa: fator determinante para o Fim

Vimos que estrelas na SP: $L_* \propto M_*^{3,3}$

$$L_* / L_{\odot} = (M_* / M_{\odot})^{3,3}$$

Tempo de vida da estrela (t_*): depende da E que tem armazenada (massa $\cdot c^2$) e da taxa com que despende energia (L):

$$t_* \propto M_* / L_*$$

$$\frac{t_*}{t_{\odot}} = \frac{M_* / M_{\odot}}{(M_* / M_{\odot})^{3,3}} = (M_* / M_{\odot})^{-2,3}$$

Evolução após a Seqüência Principal

Na **SP**: lenta transformação do H em He $\rightarrow F_G = F_p$

Para estrela $M = 1 M_\odot$: ~ 10 bilhões de anos depois que chegou na SP: **termina quase todo H do núcleo**



Sem produção de radiação:

$P_c \downarrow$ mas F_G não diminui \rightarrow o **core (caroço)** estelar de He começa a **contrair**.

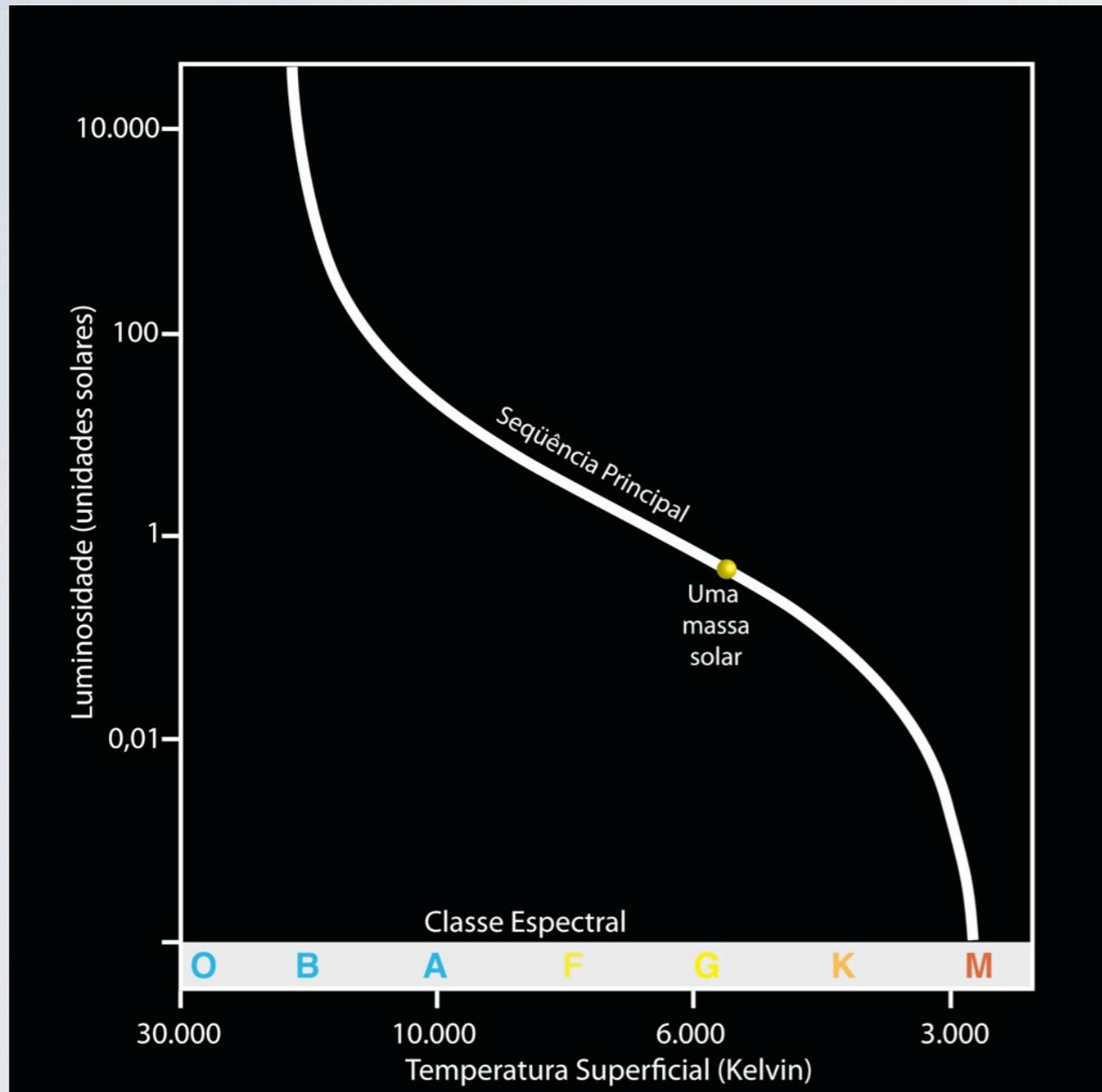


A estrutura da estrela muda \rightarrow **deixa a SP e começa a morrer**

Vimos que para haver a fusão do H: $T_c \sim 10^7$ K

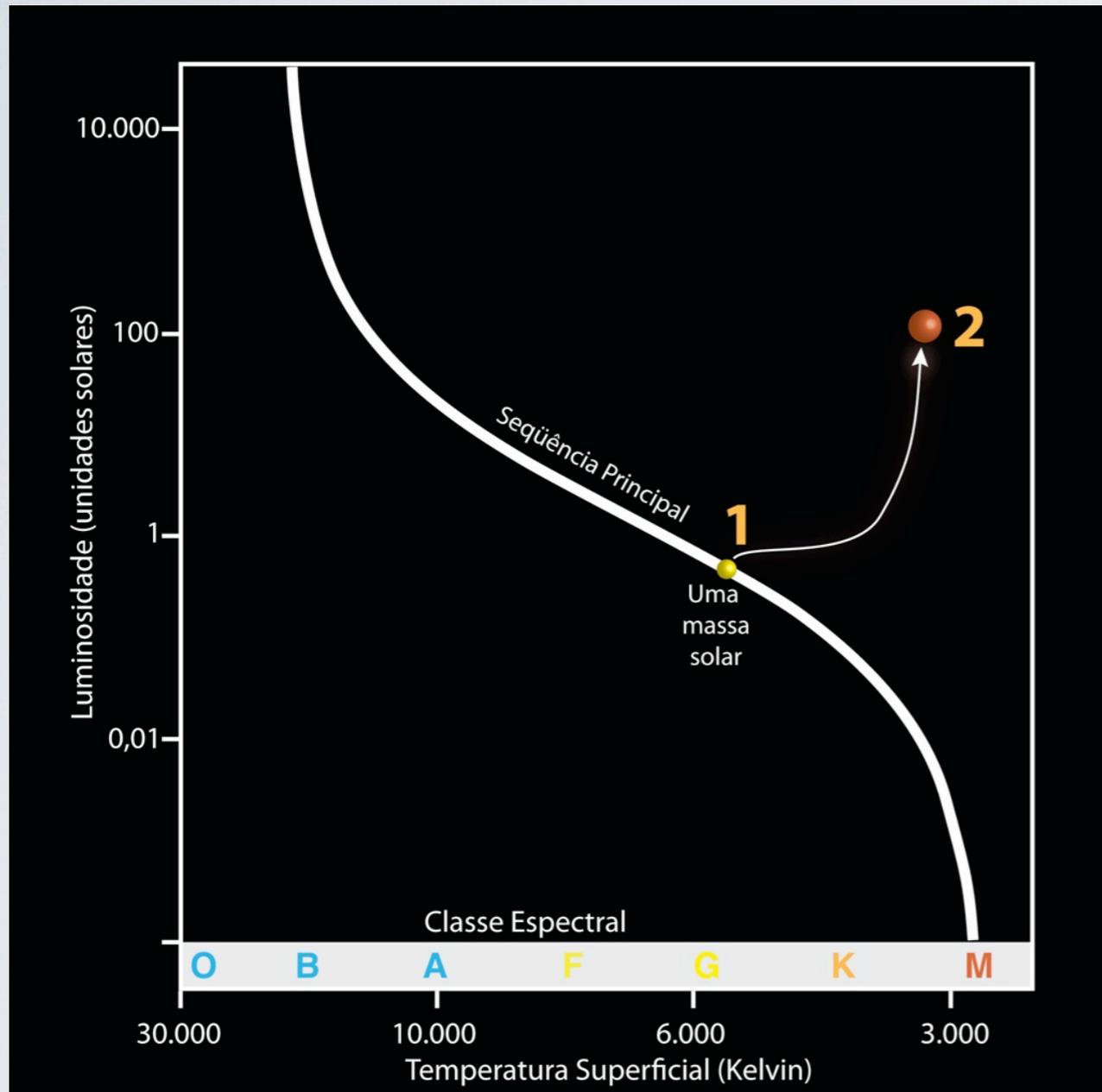
**Para fusão do He: força de repulsão nuclear é $>$ \rightarrow
 $T_c \sim 10^8$ K deve ser atingida para começar a fusão do He!**

Evolução de uma estrela de massa intermediária (0,8 a 4 M_{\odot})



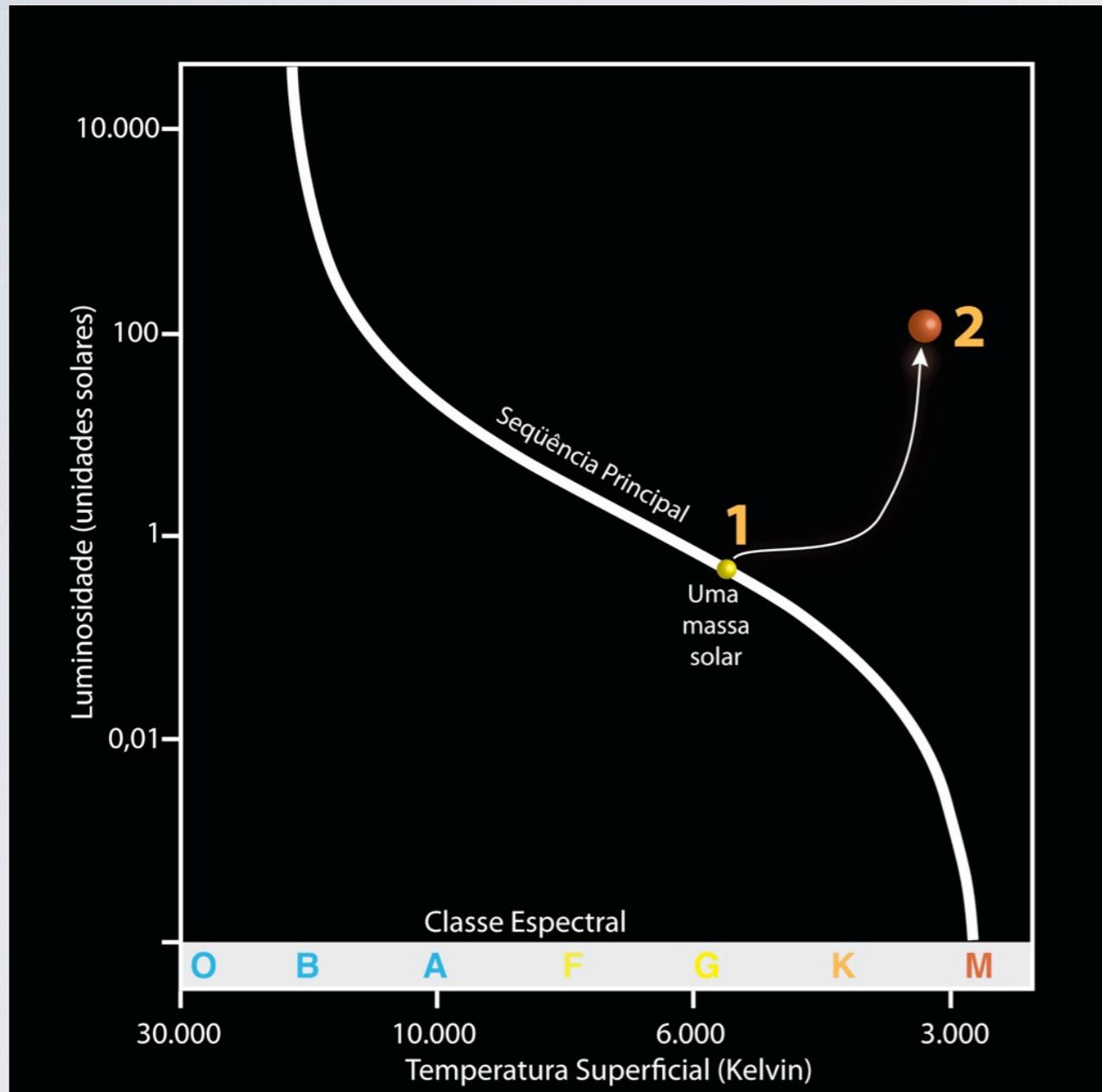
Por cerca de 10 bilhões de anos, uma estrela com uma massa semelhante à do Sol funde hidrogênio, em seu núcleo, via a reação proton-proton. Um núcleo enriquecido em hélio é lentamente obtido. Ainda não há o início da fusão do hélio. A estrela encontra-se na **seqüência principal**.

Evolução de uma estrela de massa intermediária (0,8 a 4 M_{\odot})



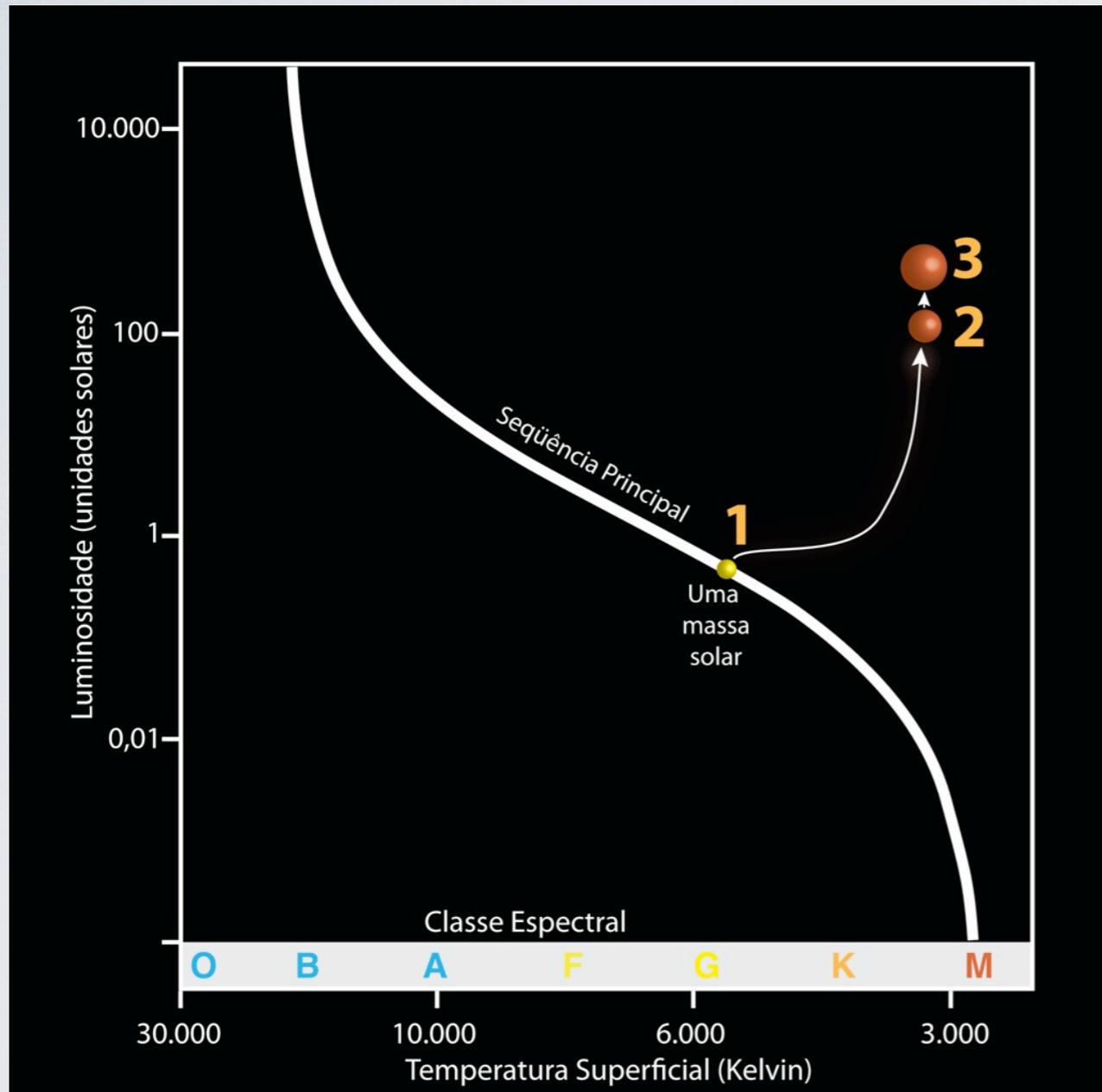
O núcleo acumulou hélio e o hidrogênio, nos 10% centrais da estrela, está praticamente esgotado. O núcleo começa a colapsar, aumentando a pressão e temperatura. Uma casca de hidrogênio move-se para fora do núcleo. A fusão continua em torno do núcleo e as camadas da estrela se expandem.

Evolução de uma estrela de massa intermediária (0,8 a 4 M_{\odot})



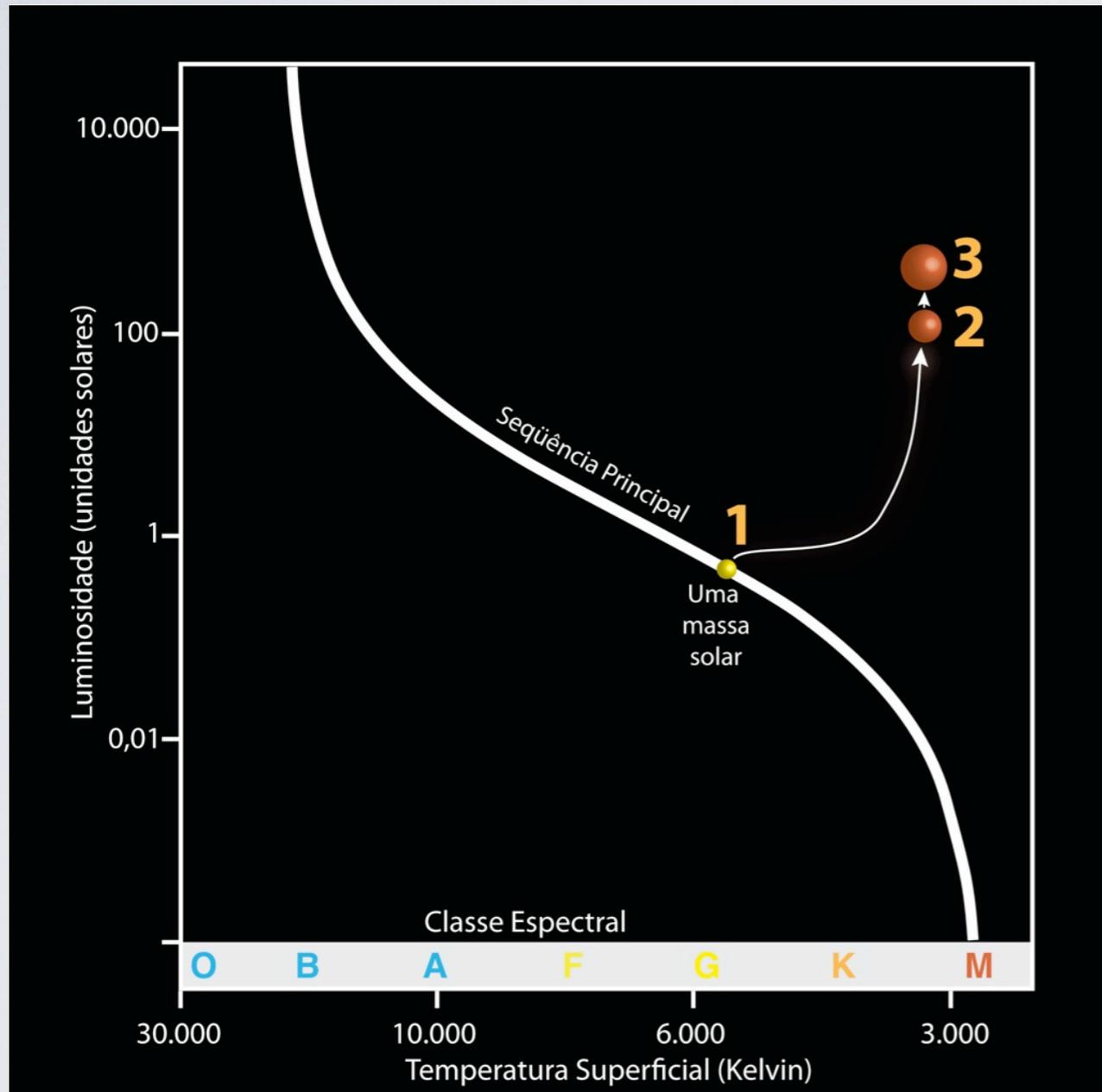
Conforme a estrela torna-se maior ela esfria. A estrela entra no **ramo das gigantes vermelhas**.

Evolução de uma estrela de massa intermediária (0,8 a 4 M_{\odot})



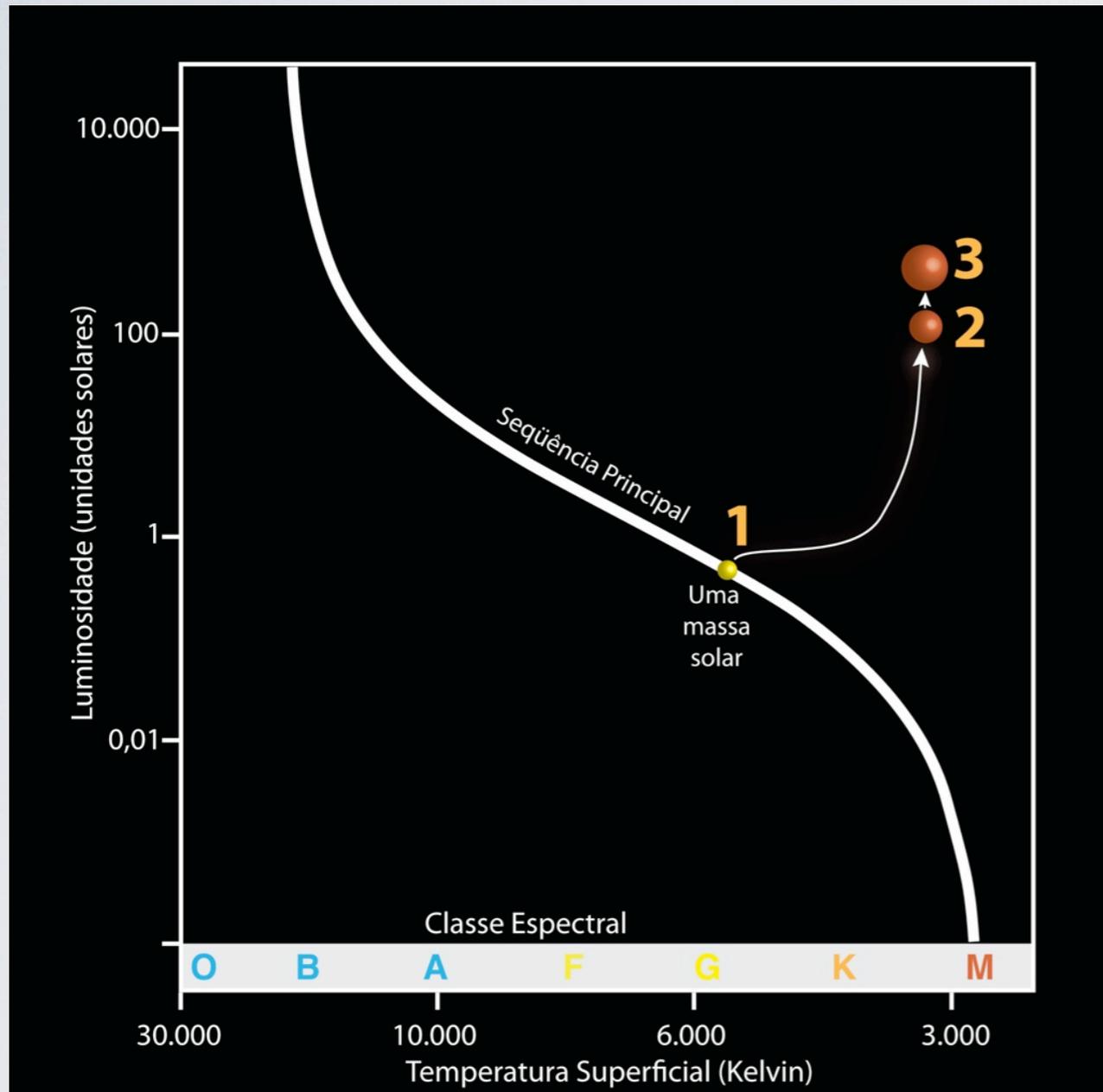
A fusão continua na casca de hidrogênio aumentando a massa do núcleo. Quando a metade interna do núcleo tiver se tornado quase hélio puro, o núcleo atinge a temperatura crítica que permite a fusão de 3 núcleos de hélio em um de carbono.

Evolução de uma estrela de massa intermediária (0,8 a 4 M_{\odot})



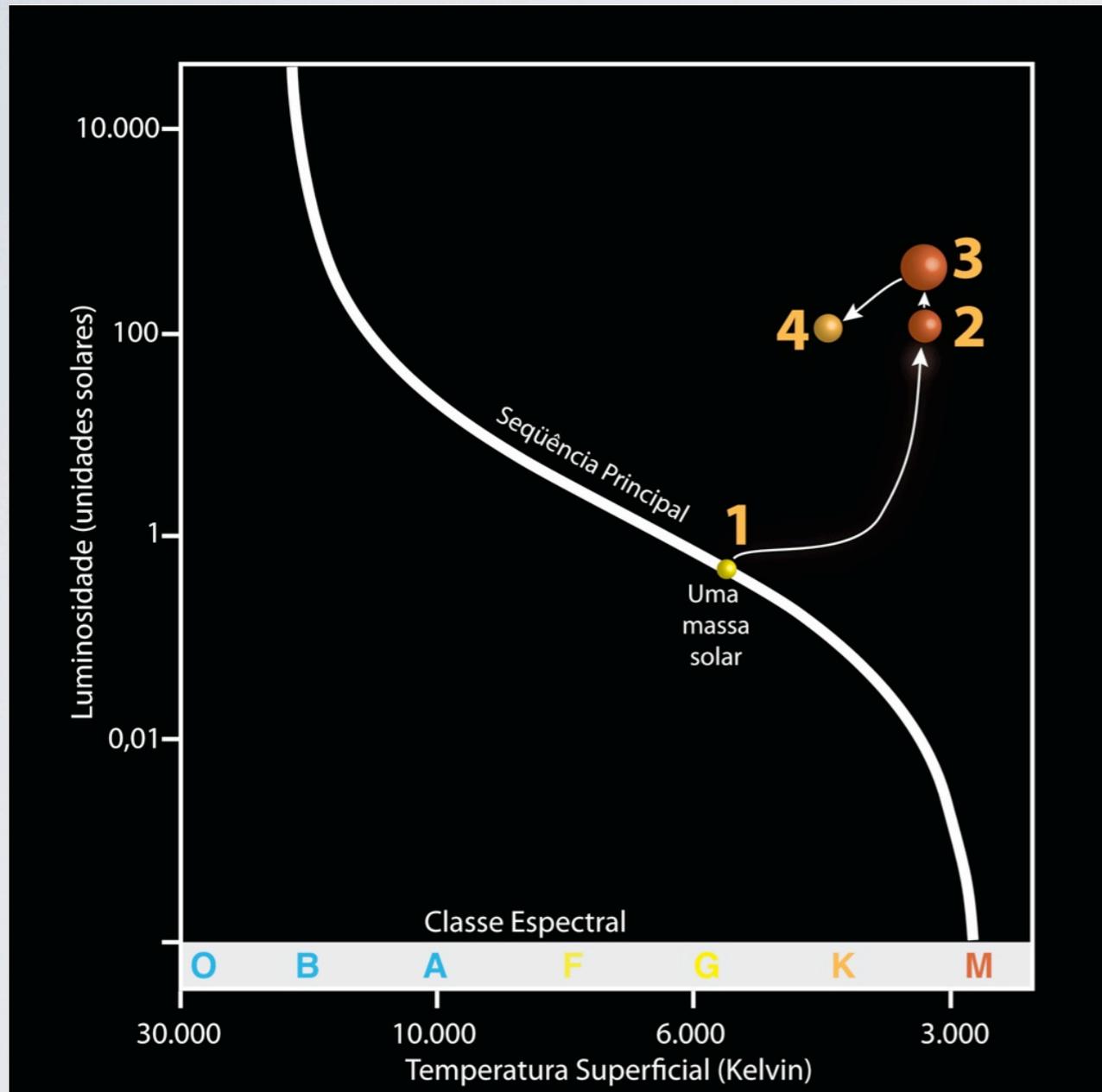
Esse ponto é chamado o “flash do hélio” porque a fusão do hélio inicia-se de maneira brusca para estrelas com massas inferiores a 2,5 M_{\odot} . Para estrelas acima desse valor a fusão inicia-se de maneira mais gradual.

Evolução de uma estrela de massa intermediária (0,8 a 4 M_{\odot})



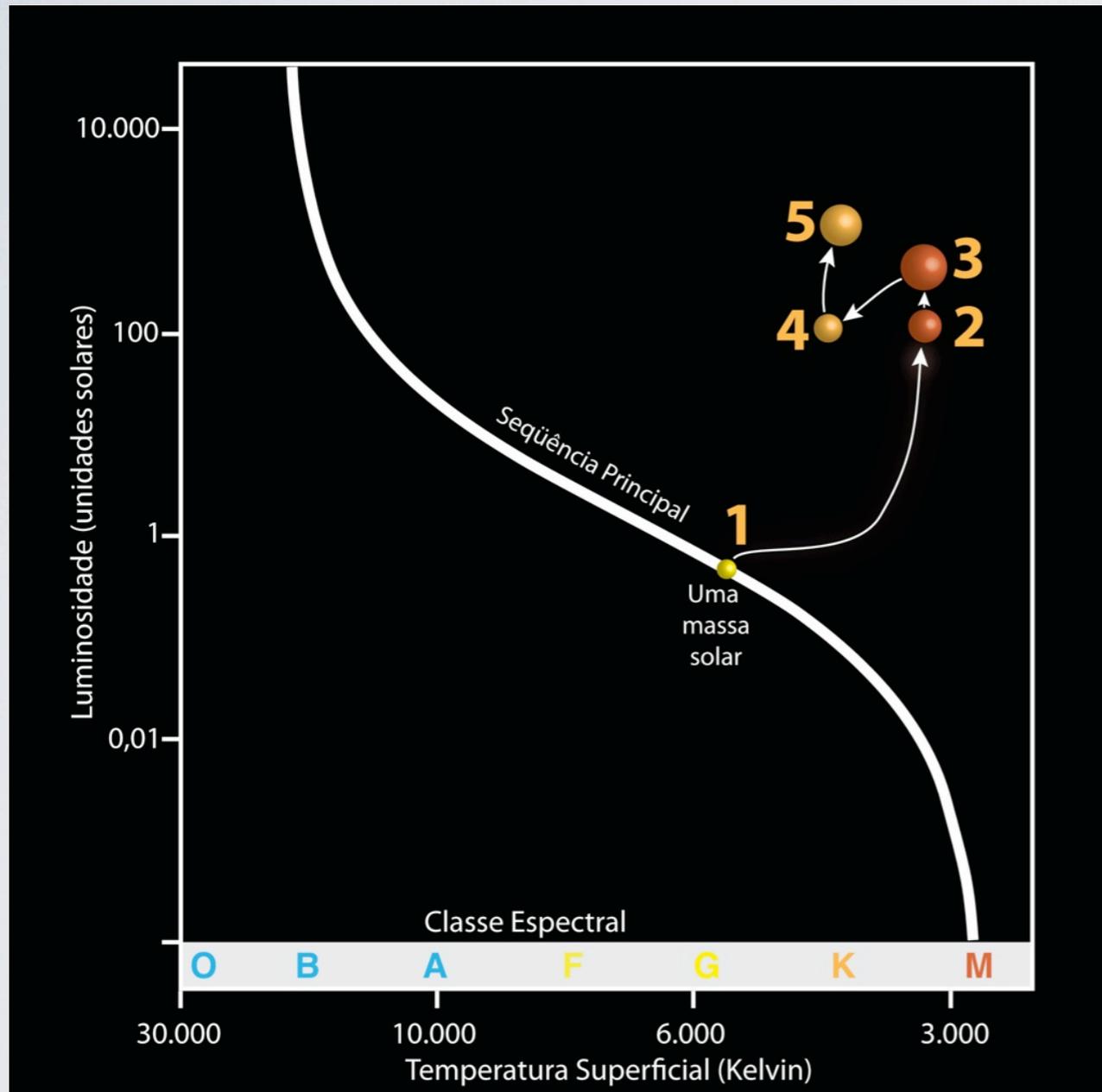
Como o núcleo de hélio é uma partícula alfa, os astrofísicos chamam esse tipo de fusão de **processo triplo-alfa**.

Evolução de uma estrela de massa intermediária (0,8 a 4 M_{\odot})



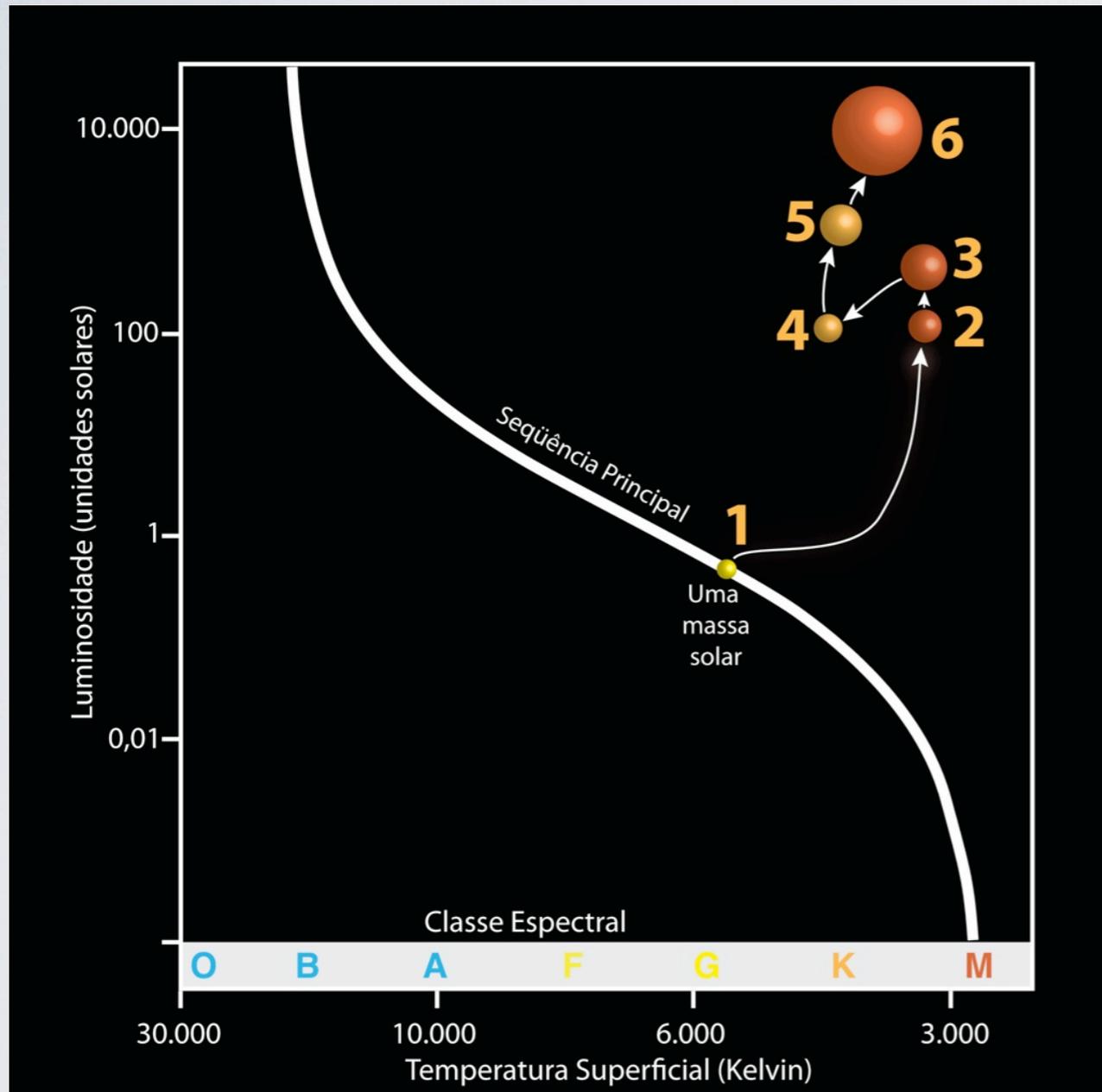
A estrela agora funde, em seu núcleo, hélio em carbono. Torna-se mais quente e conseqüentemente mais azulada. Uma casca de hidrogênio ainda envolve o núcleo. A estrela encontra-se no **ramo horizontal**.

Evolução de uma estrela de massa intermediária (0,8 a 4 M_{\odot})



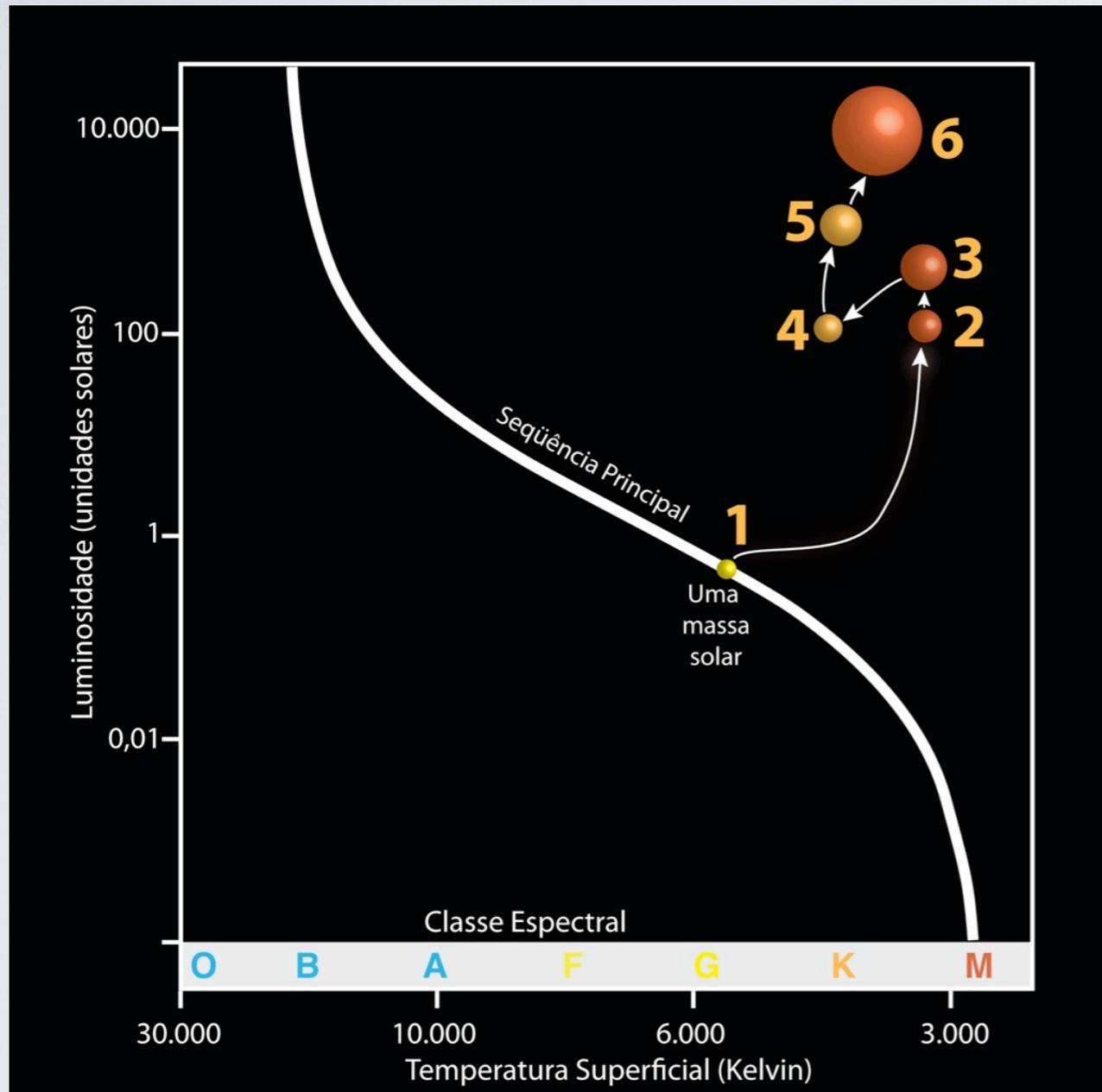
O carbono acumula-se no núcleo. Ocasionalmente um núcleo de carbono e outro de hélio irão fundir-se para criar oxigênio. Após cerca de 0,1 e 1 bilhão de anos, a estrela possui um núcleo de carbono-oxigênio envolvido por uma casca de hélio, que por sua vez é envolvida por uma casca de hidrogênio.

Evolução de uma estrela de massa intermediária (0,8 a 4 M_{\odot})



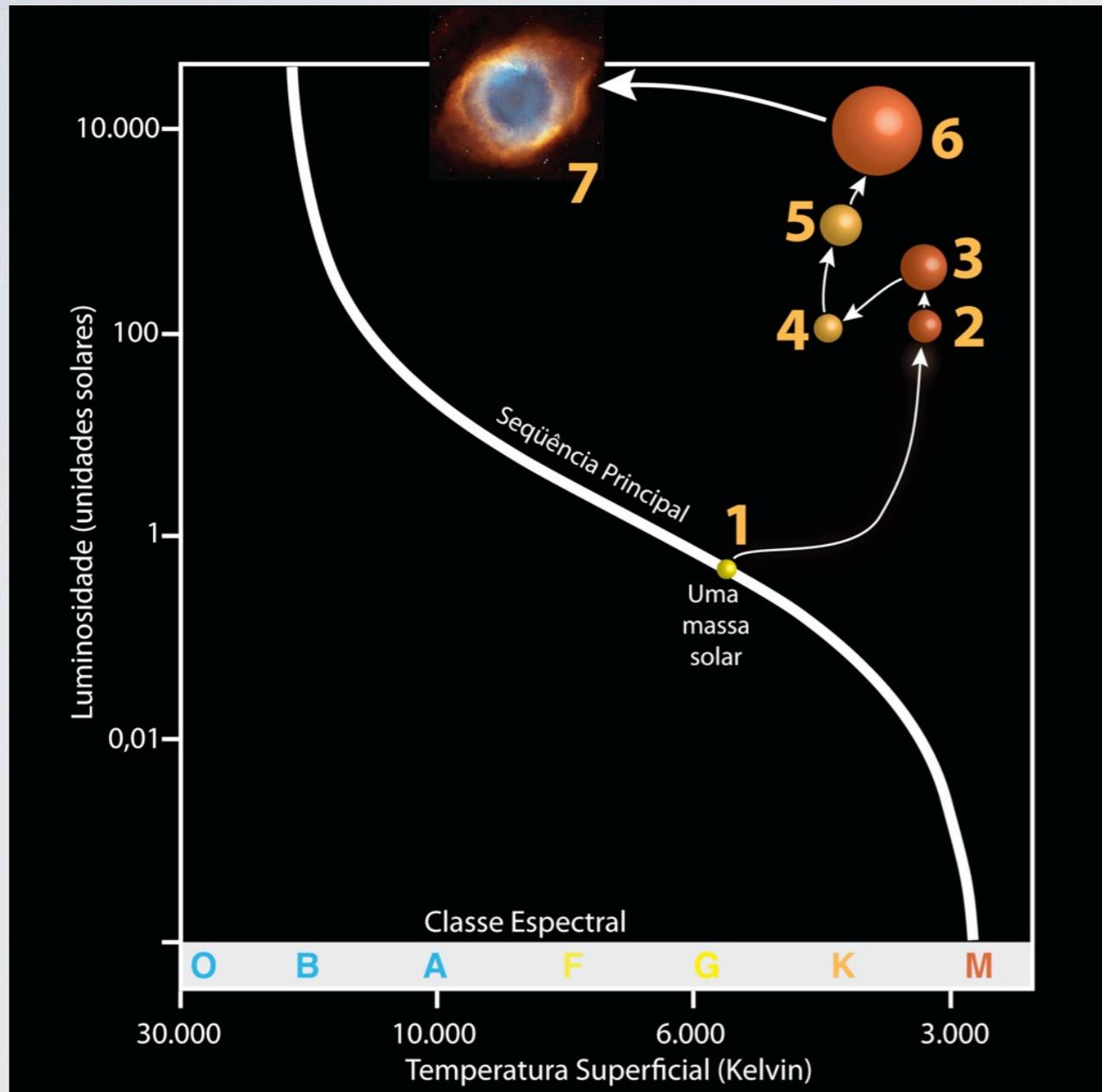
Após o núcleo ter convertido grande parte de seu hélio em carbono, ele colapsa e se aquece. Exatamente como ocorreu antes, as camadas exteriores da estrela tornam-se maiores e frias. Dessa vez a estrela encontra-se no **ramo assintótico das gigantes**.

Evolução de uma estrela de massa intermediária (0,8 a 4 M_{\odot})



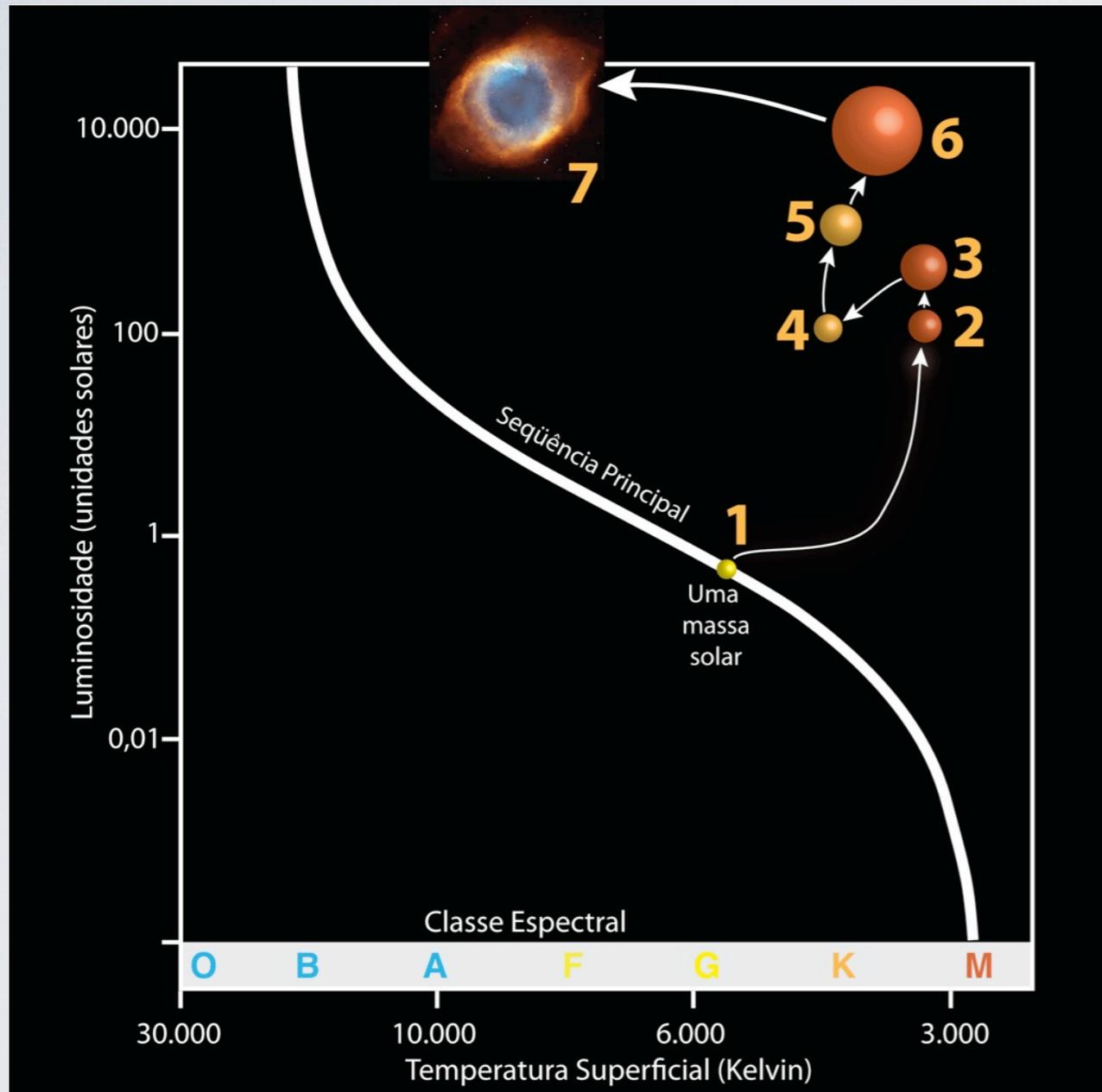
Uma estrela com massa inferior a 4 M_{\odot} não consegue aquecer-se o suficiente para dar início à fusão do carbono. Assim, as camadas da estrela — incluindo as cascas de hidrogênio e hélio — continuam a se expandir.

Evolução de uma estrela de massa intermediária (0,8 a 4 M_{\odot})



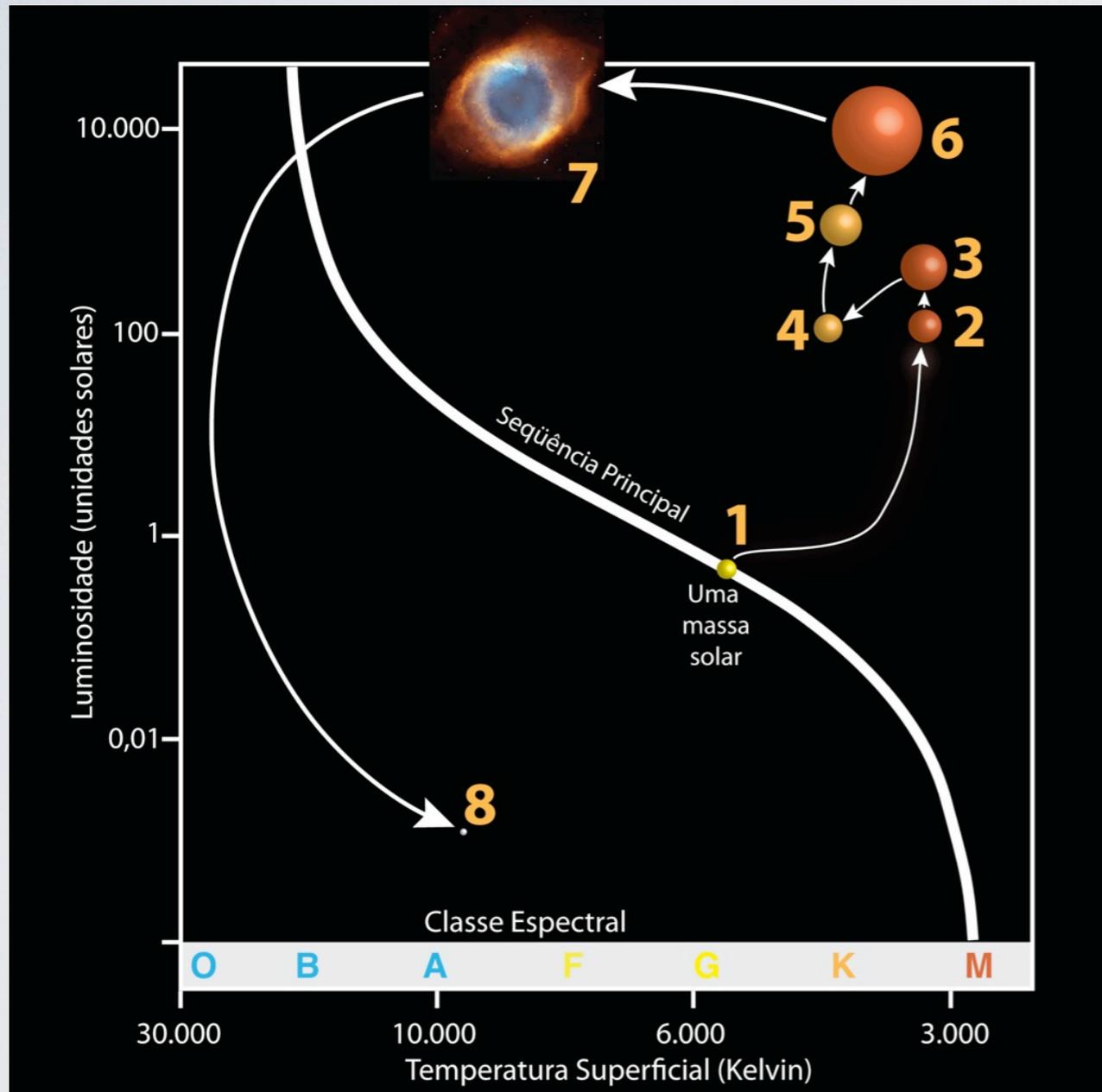
Eventualmente, a estrela torna-se uma **variável tipo Mira**, pulsando com um período de cerca de 1 ano. Em um período astronomicamente curto de cerca de 100.000 anos, a estrela perde todo seu material excepto seu núcleo de carbono-oxigênio.

Evolução de uma estrela de massa intermediária (0,8 a 4 M_{\odot})



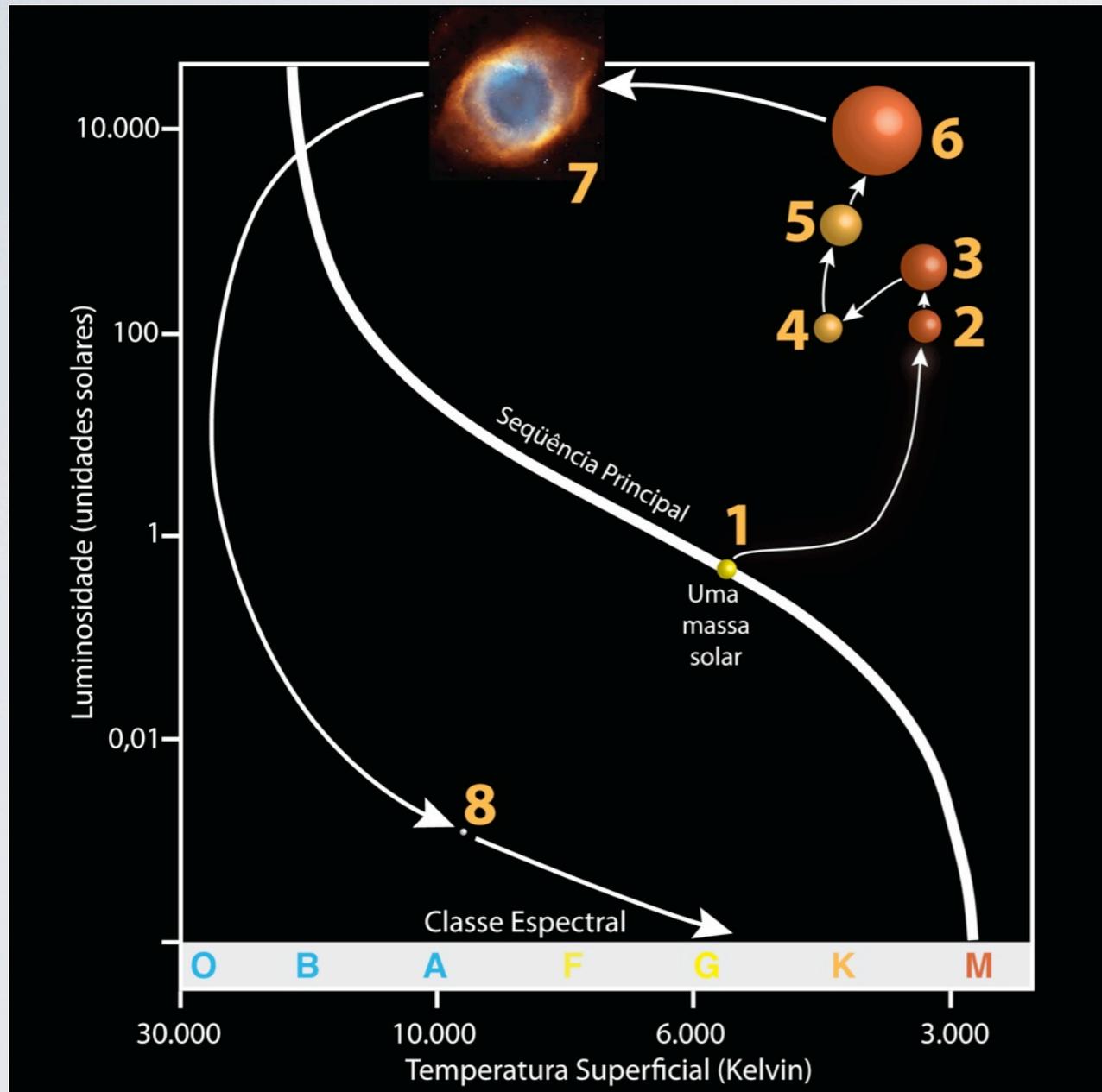
Enquanto suas camadas se separam criam belas imagens no céu. Uma **nebulosa planetária** é o remanecente das camadas externas de uma estrela do tipo solar.

Evolução de uma estrela de massa intermediária (0,8 a 4 M_{\odot})



Resta, então, um núcleo de carbono-oxigênio, quente, branco, e de dimensões semelhantes à da Terra. Pelos próximos cem bilhões de anos ou mais, uma **anã branca**, irá gradualmente se esfriar....

Evolução de uma estrela de massa intermediária (0,8 a 4 M_{\odot})

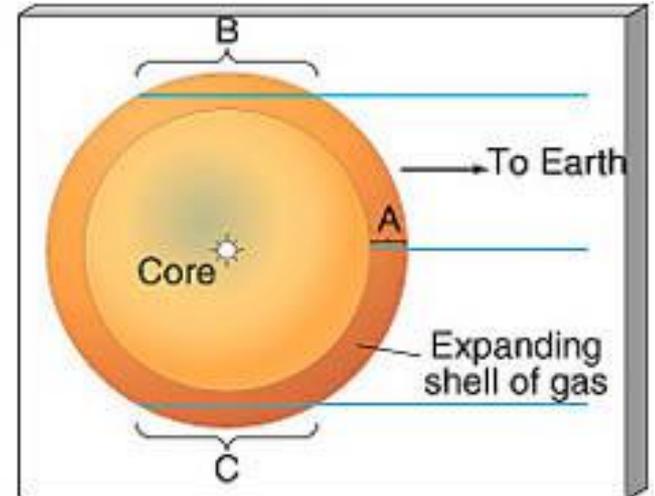


.... e desaparecer.

Nebulosas Planetárias e Anãs Brancas

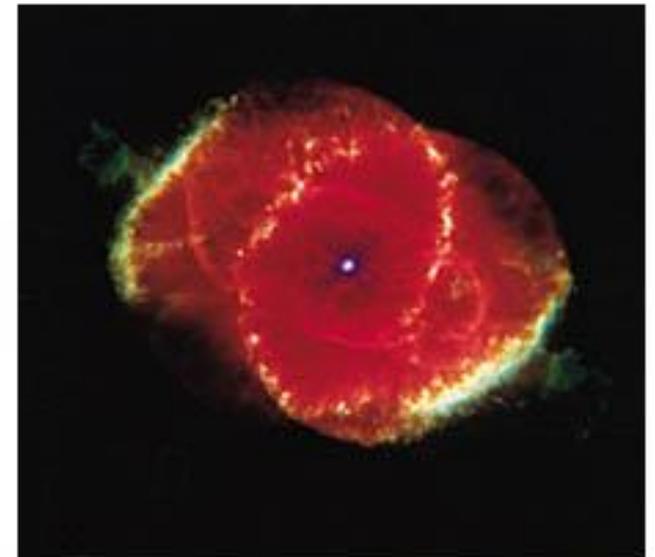


(a)



(b)

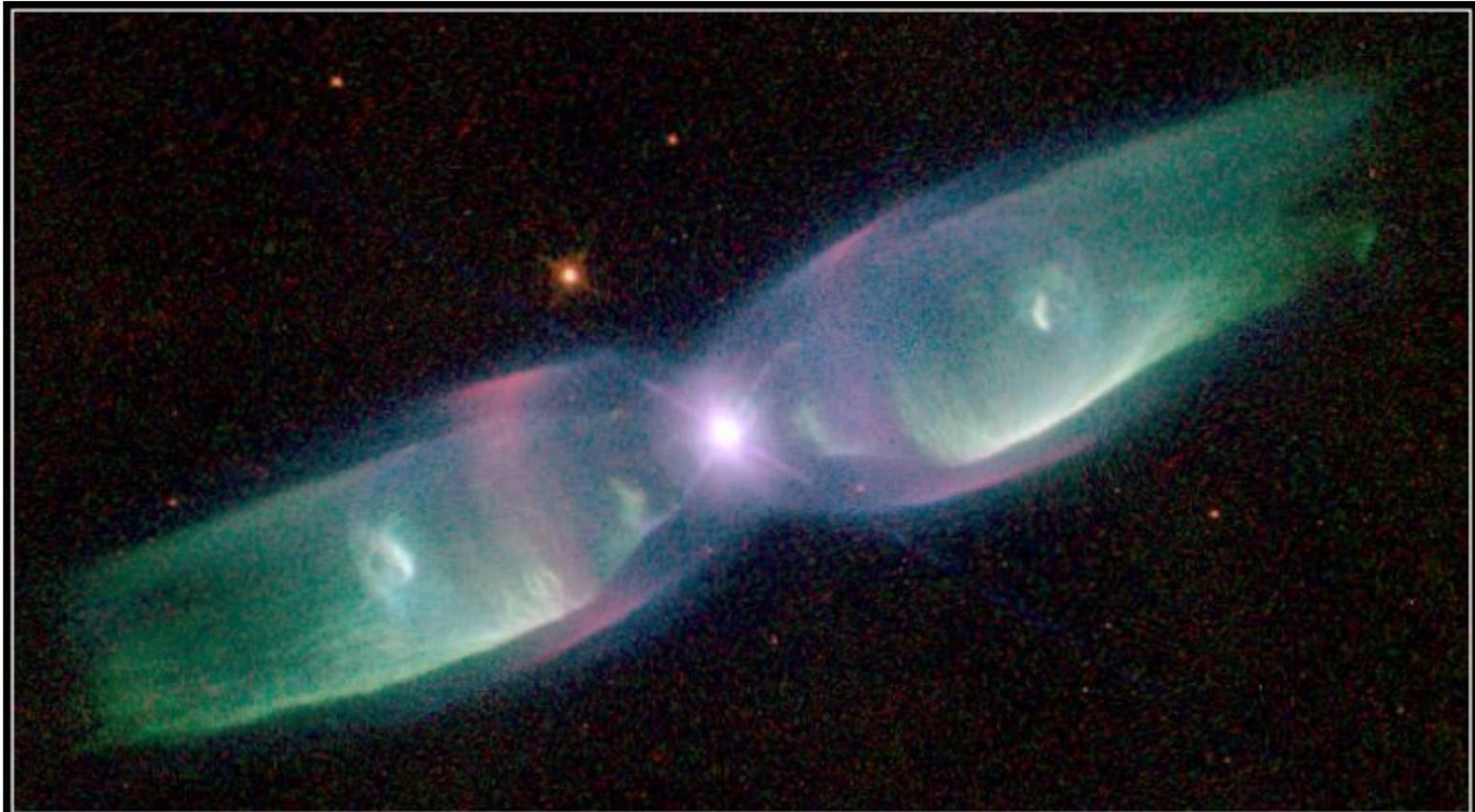
Nebulosa Planetária: continua expandindo, tornando-se cada vez mais difusa e fria, ao mesmo tempo que enriquece o meio interestelar com He e C que foram dragados do interior, por movimentos de convecção, durante os últimos anos de sua existência.



(c)



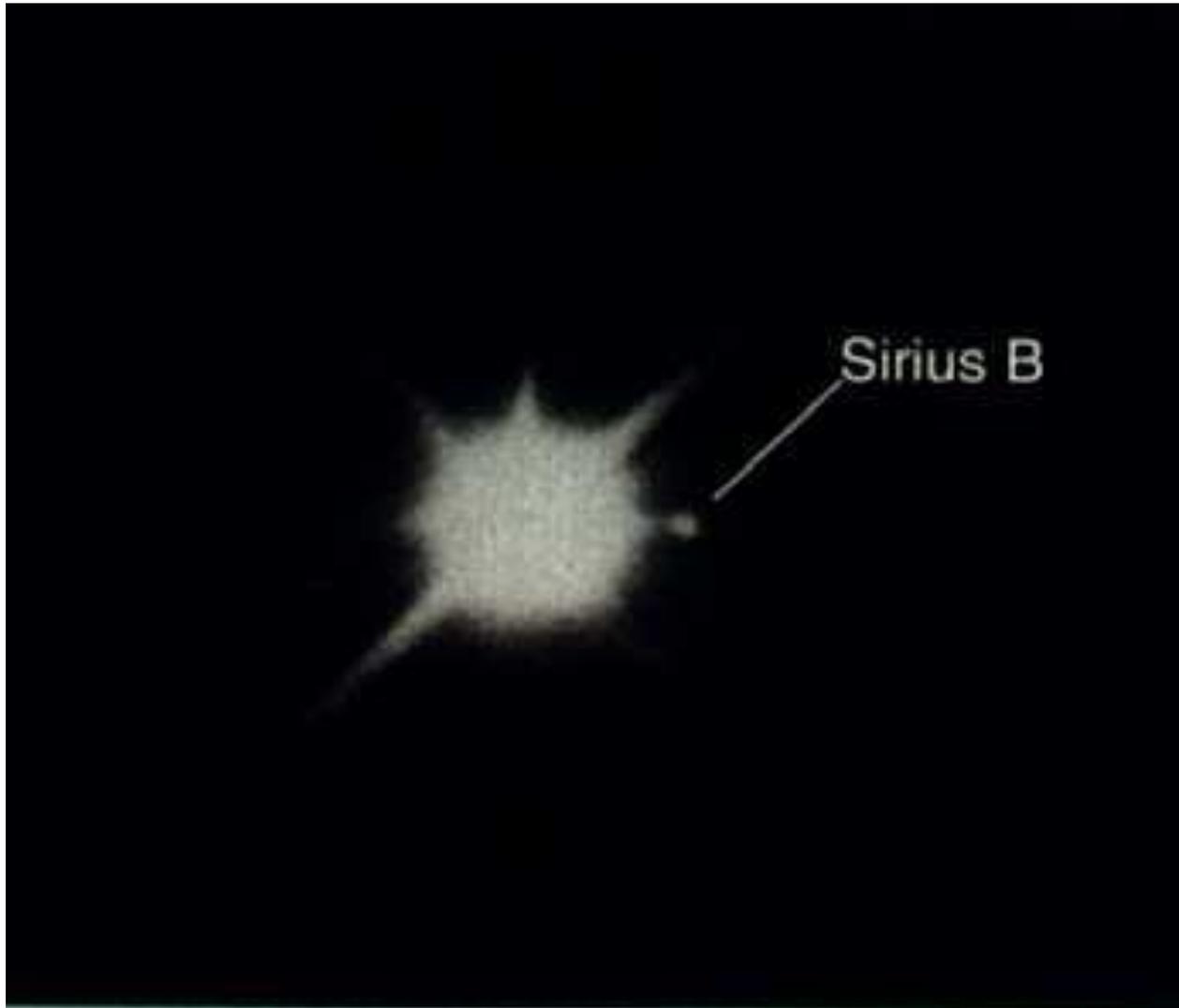
Outro ex. de Nebulosa Planetaria e Ana Branca



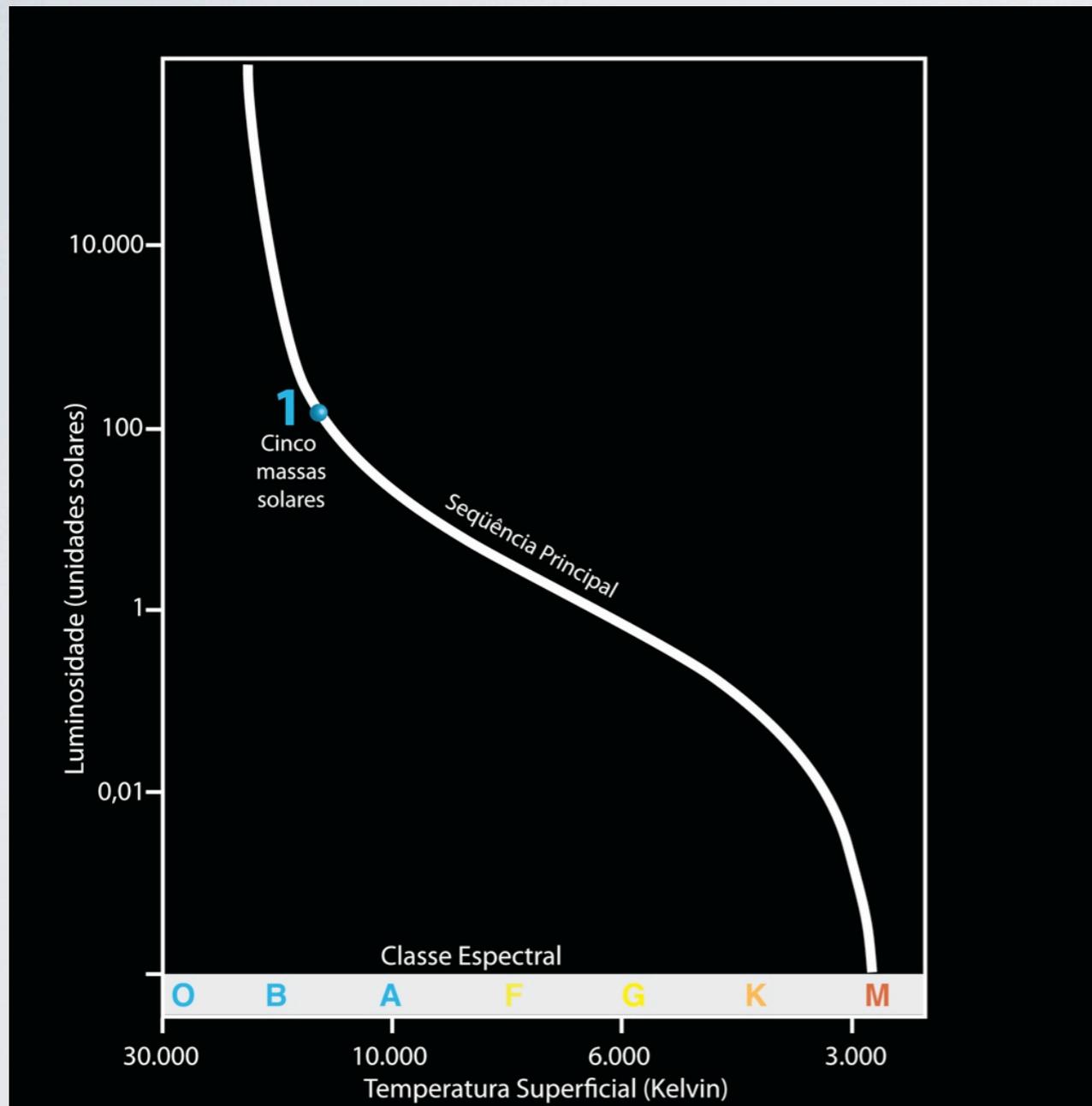
Planetary Nebula M2-9
PRC97-38a • ST ScI OPO • December 17, 1997
B. Balick (University of Washington) and NASA

HST • WFPC2

Ana Branca

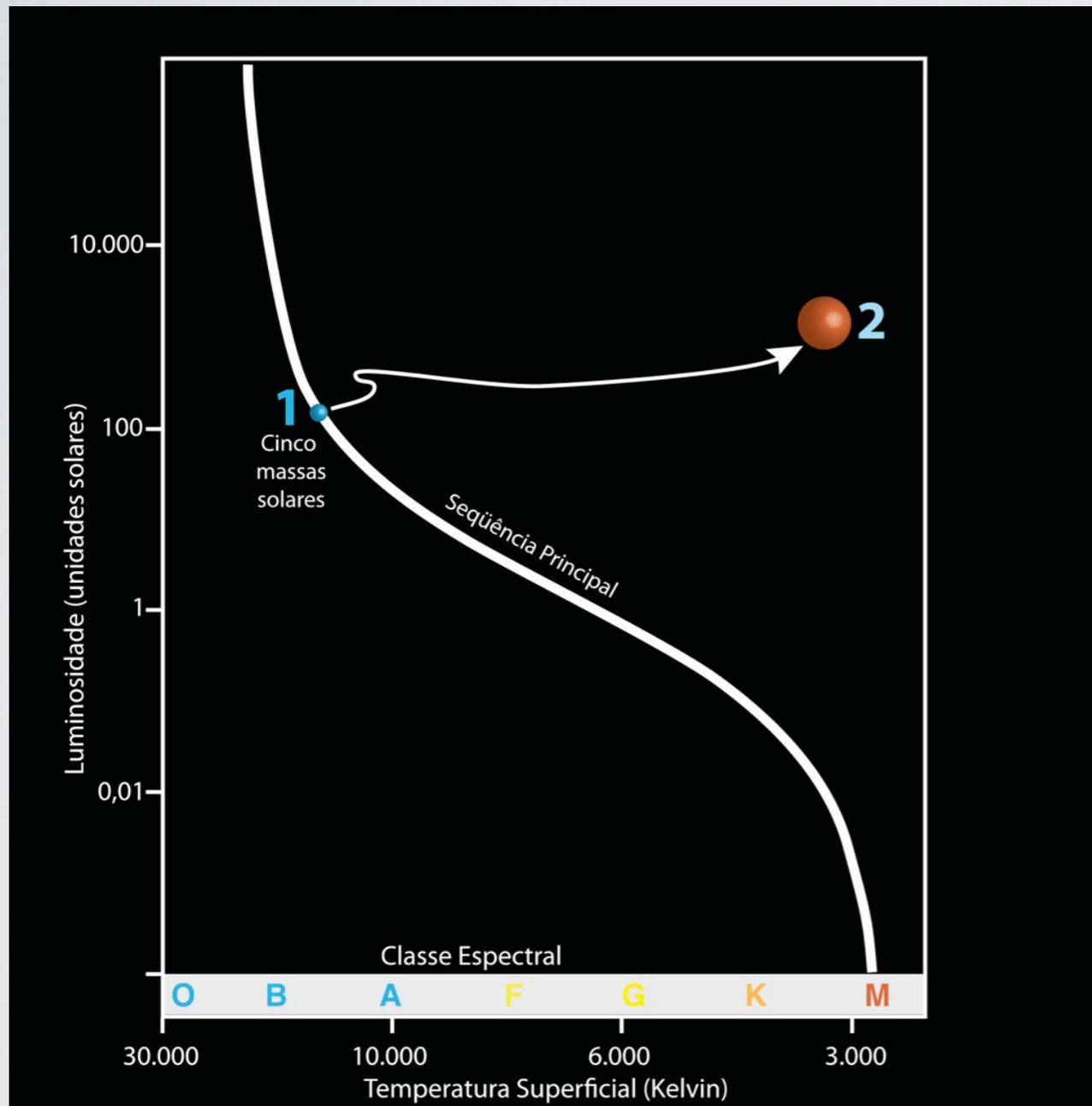


Evolução de uma estrela massiva ($5 M_{\odot}$)



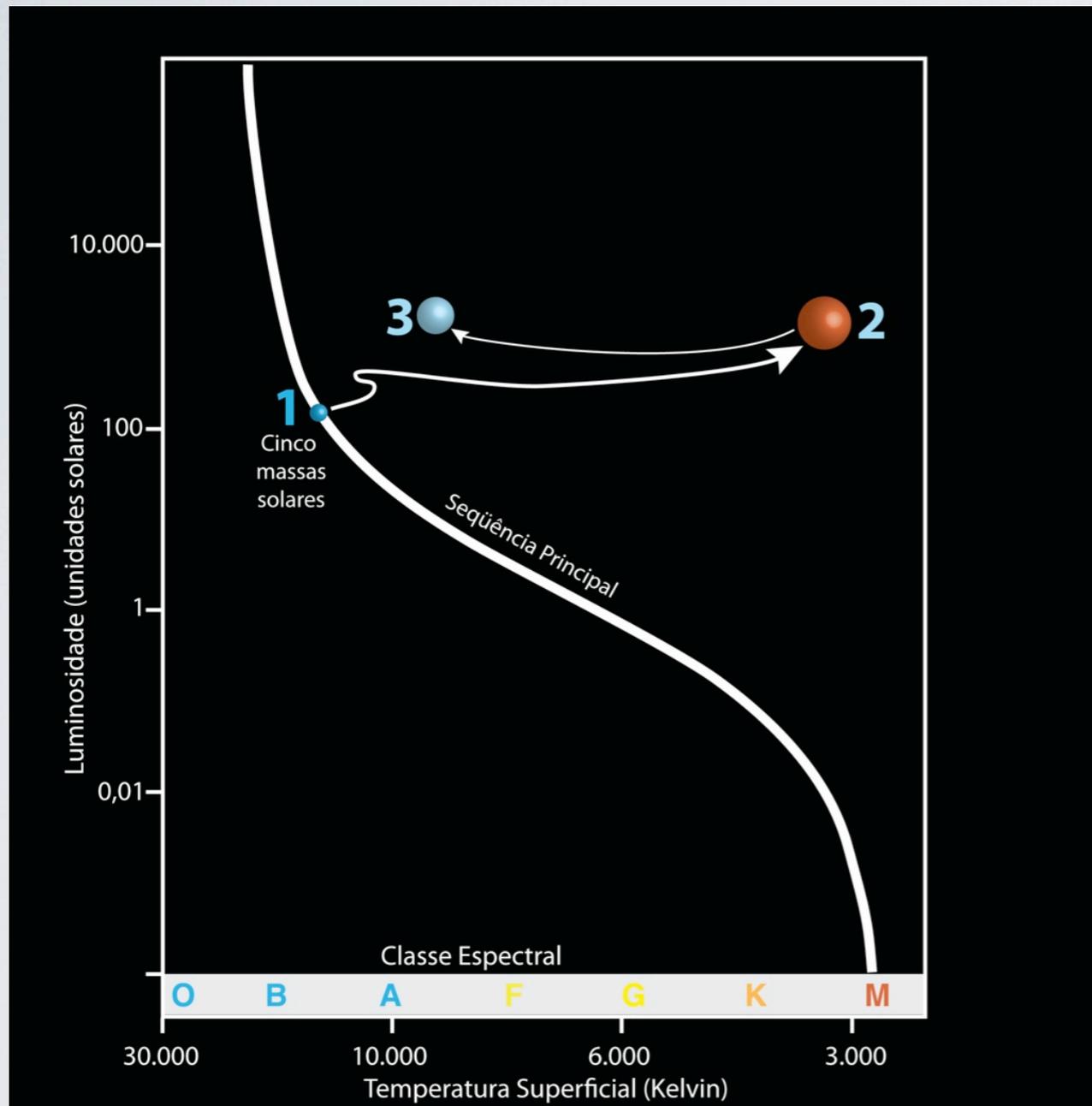
Estrelas mais massivas do que $4 M_{\odot}$ fundem hidrogênio em hélio na seqüência principal por 10 a 100 milhões de anos. Enquanto estrelas de baixa massa fazem isso via a cadeia proton-proton, as estrelas de alta massa fundem hidrogênio via ciclo **CNO**.

Evolução de uma estrela massiva ($5 M_{\odot}$)



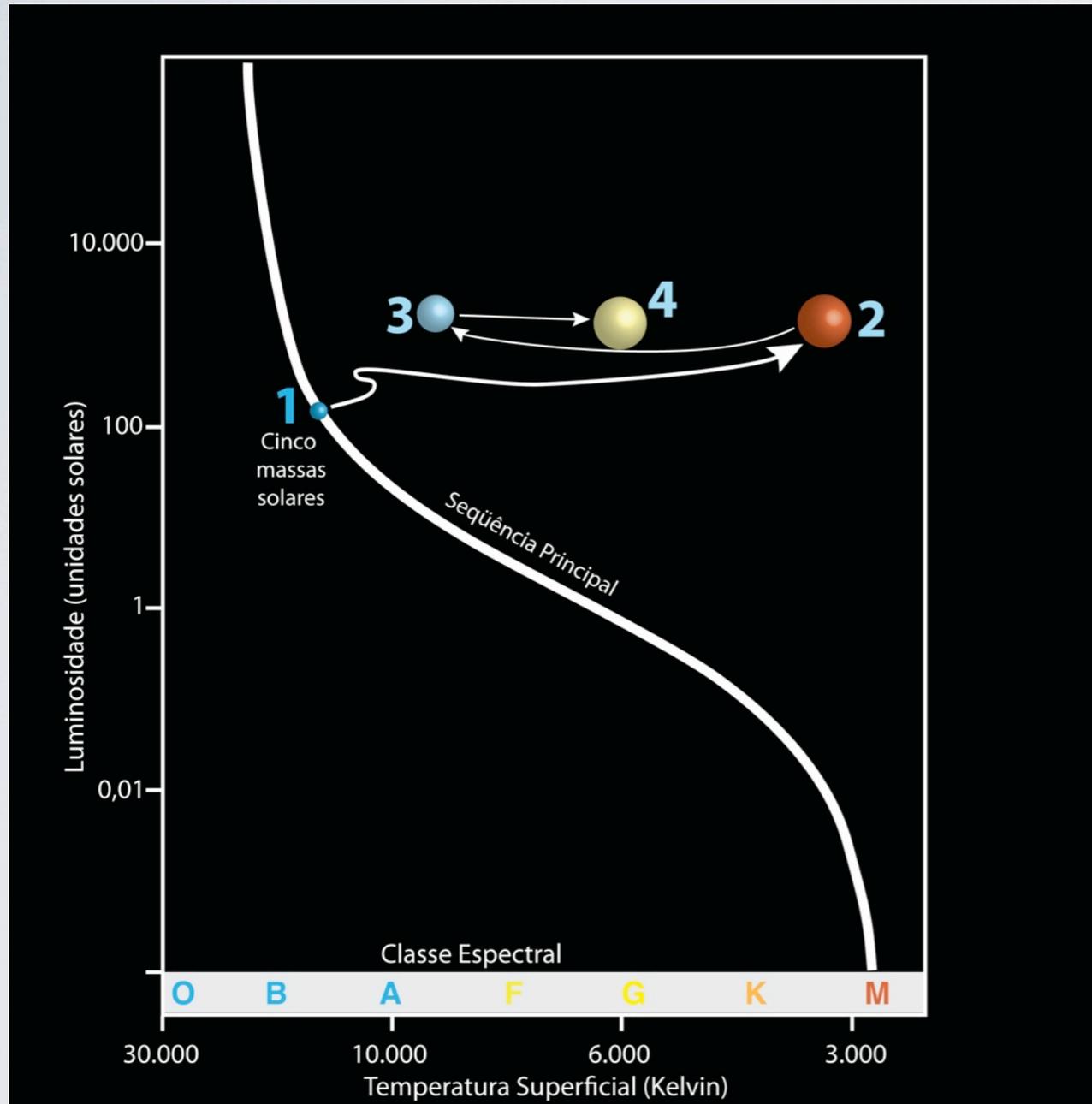
Quando cessa a fusão de hidrogênio, o núcleo de hélio se contrai aquecendo-se. As camadas externas da estrela se expandem e a estrela torna-se uma supergigante vermelha.

Evolução de uma estrela massiva ($5 M_{\odot}$)



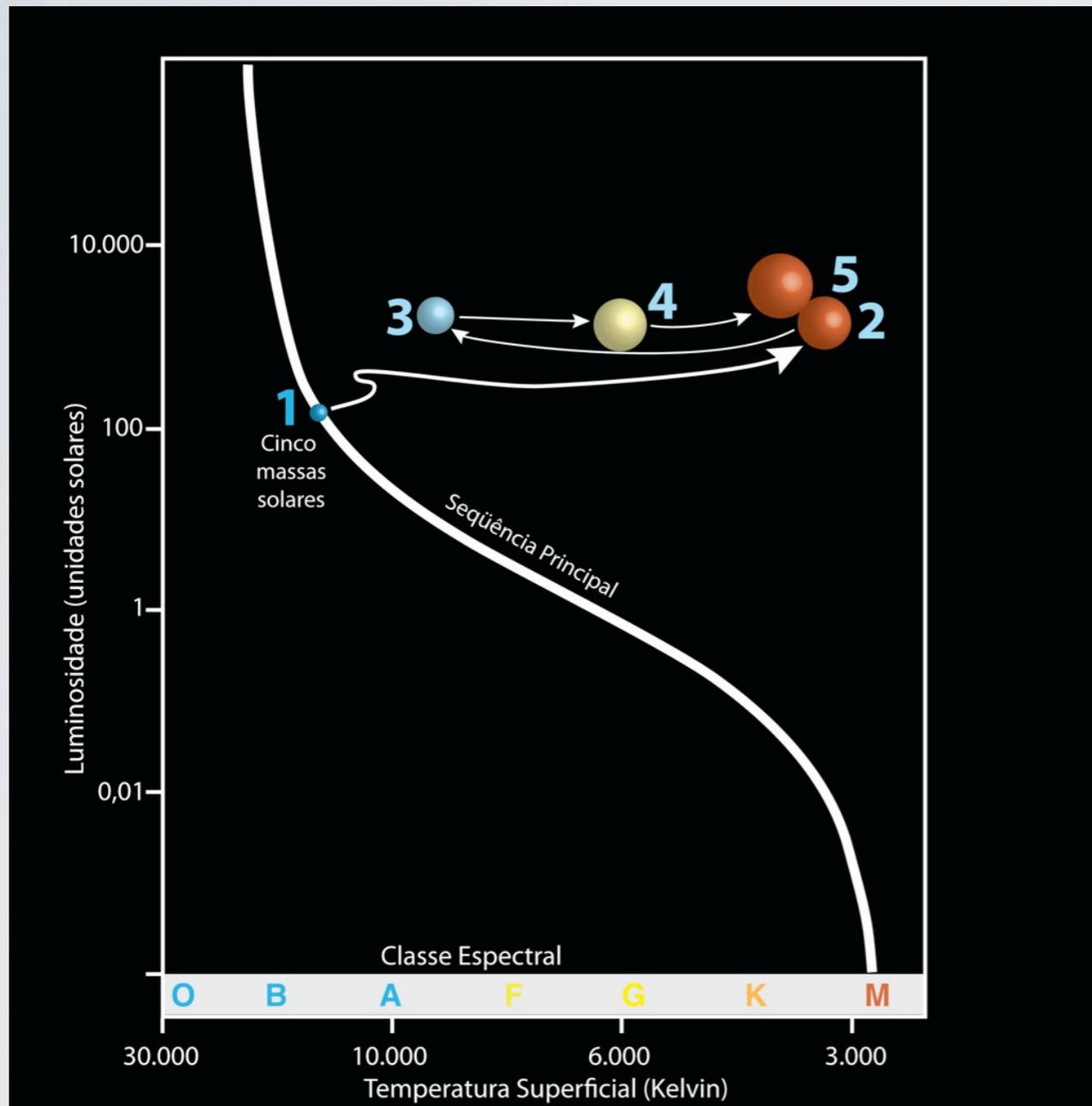
O calor do núcleo funde hélio em carbono. Ocasionalmente carbono e hélio podem se fundir e formar oxigênio. O hidrogênio continua a queimar na casca. A estrela se aquece e torna-se uma supergigante azul.

Evolução de uma estrela massiva ($5 M_{\odot}$)



Em algum momento o conteúdo de hélio no núcleo se esgota. O núcleo de carbono-oxigênio colapsa aquecendo a estrela. O aumento de temperatura inicia novas fusões produzindo mais energia. Esse excesso de energia empurra as camadas externas para longe e ...

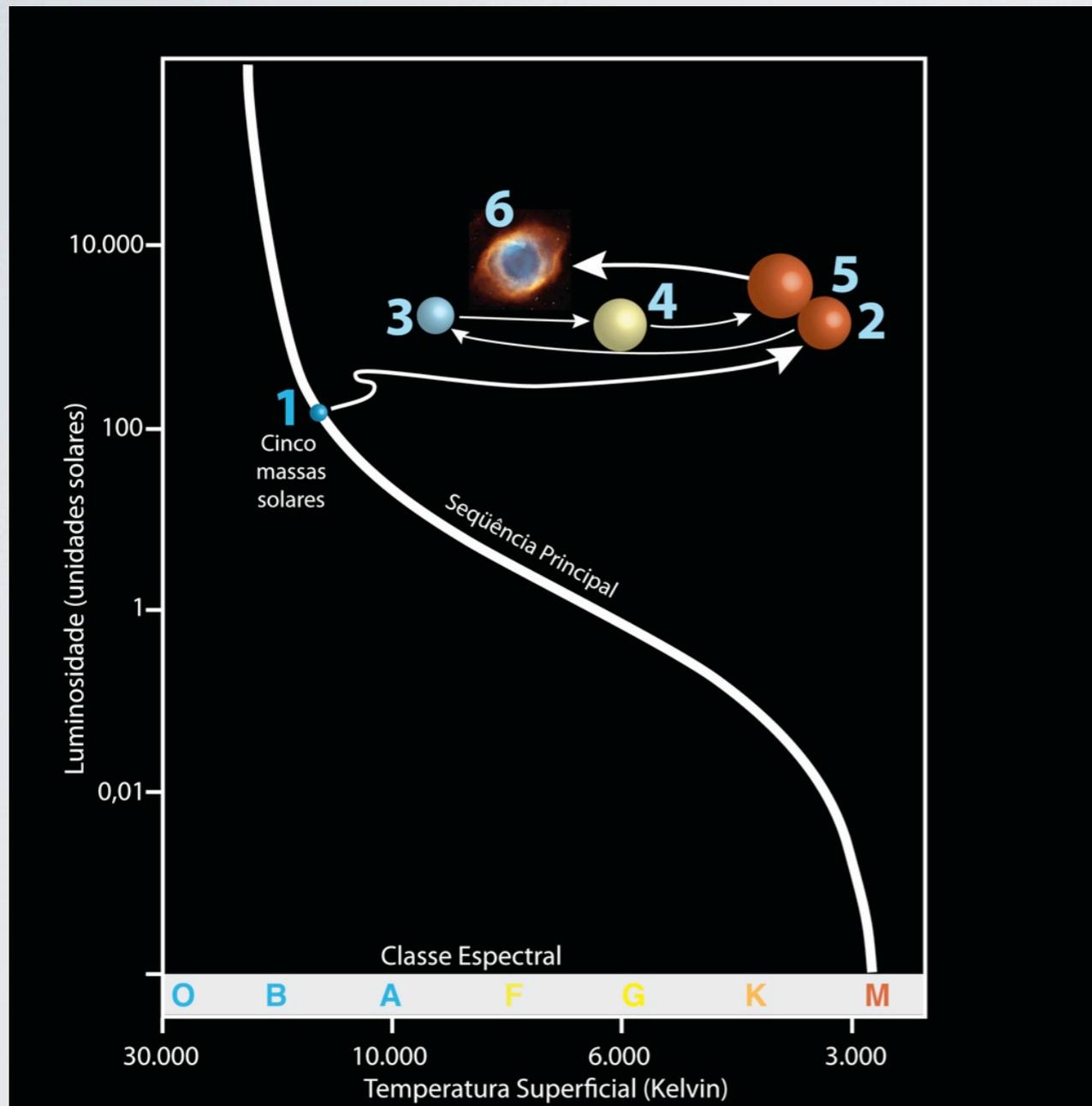
Evolução de uma estrela de massiva ($5 M_{\odot}$)



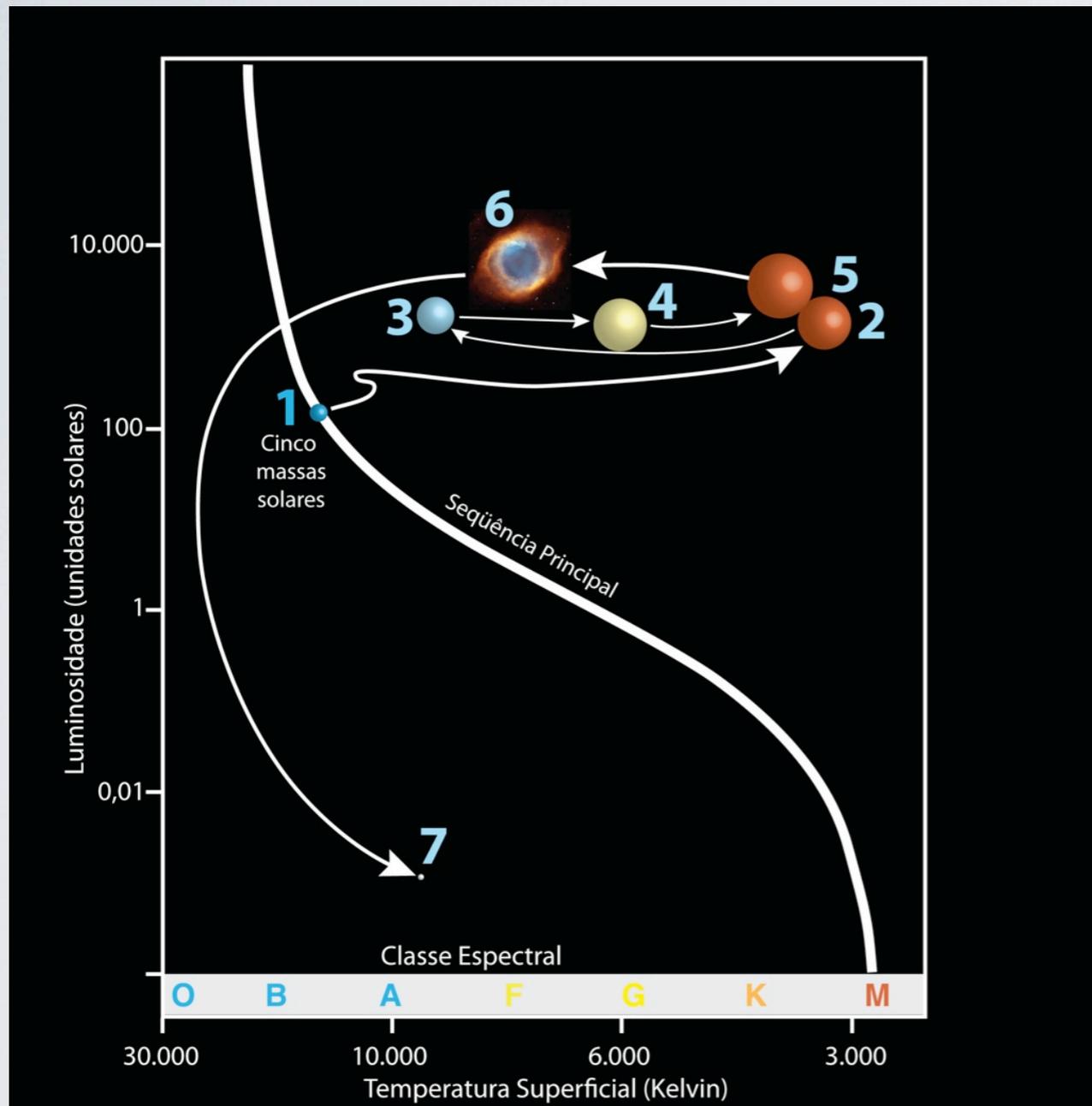
.... ao mesmo tempo que estas se expandem, se esfriam. A estrela é novamente uma supergigante vermelha. A temperatura no núcleo é suficientemente alta para fundir carbono. Isso permite várias reações que produzem oxigênio, neon, magnésio. Esses elementos são produzidos no núcleo da estrela.

Evolução de uma estrela de massiva ($5 M_{\odot}$)

Apenas cerca de 1.000 anos se passam antes de que a fusão do carbono cesse. Em uma estrela com menos do que $8 M_{\odot}$, o núcleo de oxigênio-neon-magnésio colapsa e se aquece, mas não o suficiente para iniciar uma nova fusão. A estrela perde todo seu material (excepto seu núcleo) e forma uma **nebulosa planetária**.

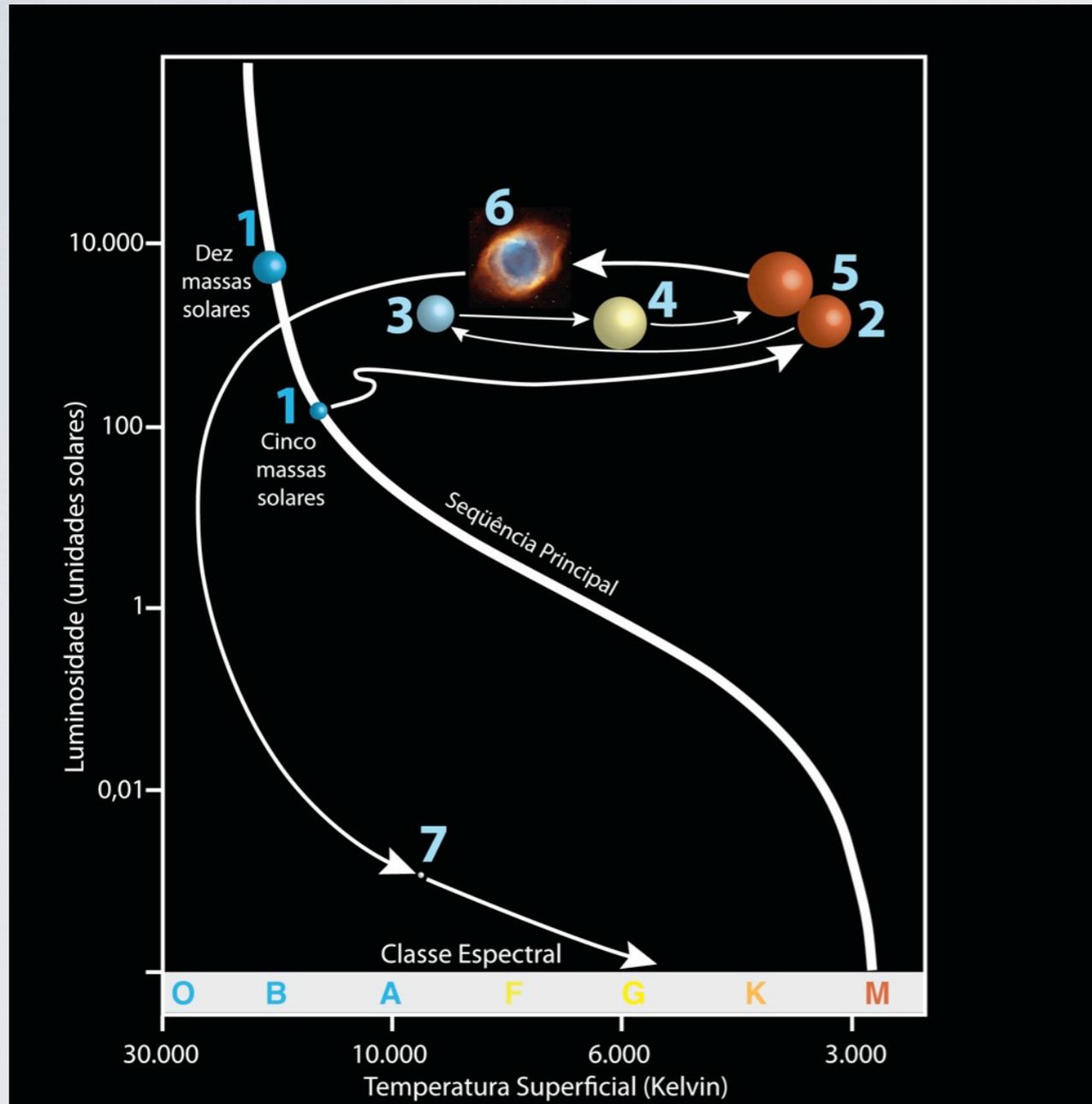


Evolução de uma estrela de massiva ($5 M_{\odot}$)



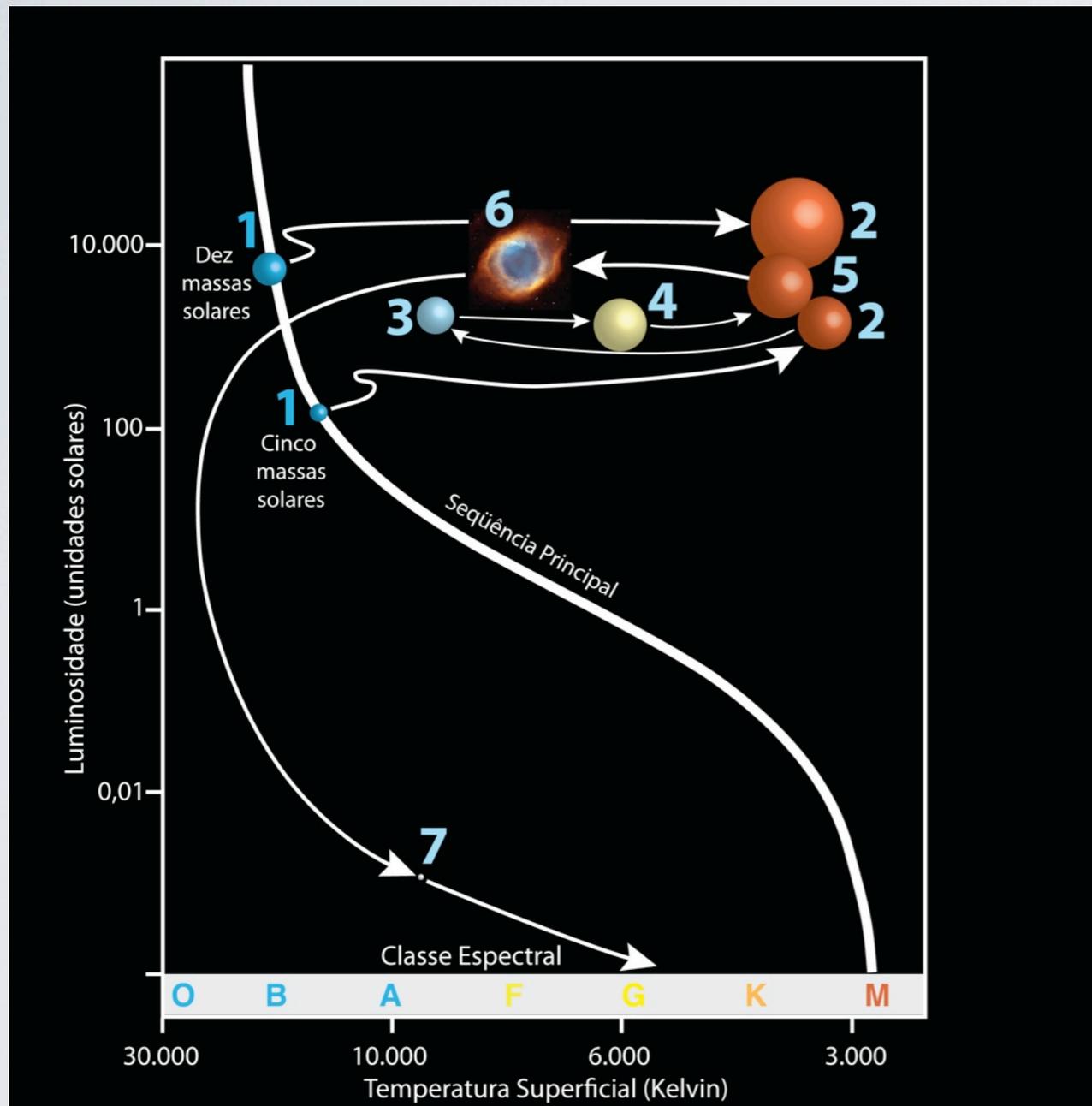
Com o tempo seu núcleo de oxigênio-neon-magnésio se esfria e a estrela desaparece como uma **anã branca**.

Evolução de uma estrela massiva ($10 M_{\odot}$)



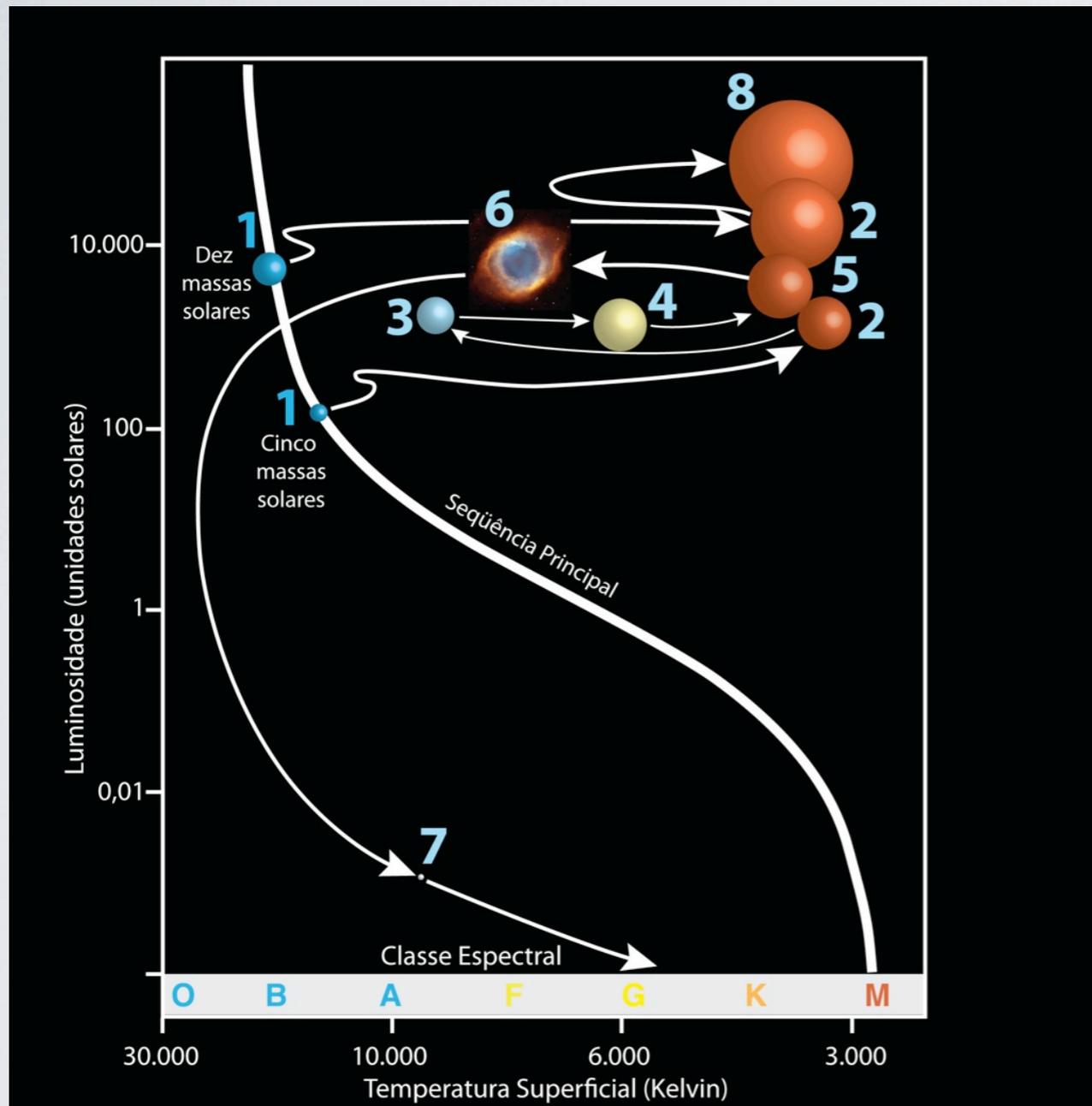
As estrelas mais massivas seguem uma evolução semelhante.

Evolução de uma estrela massiva ($10 M_{\odot}$)



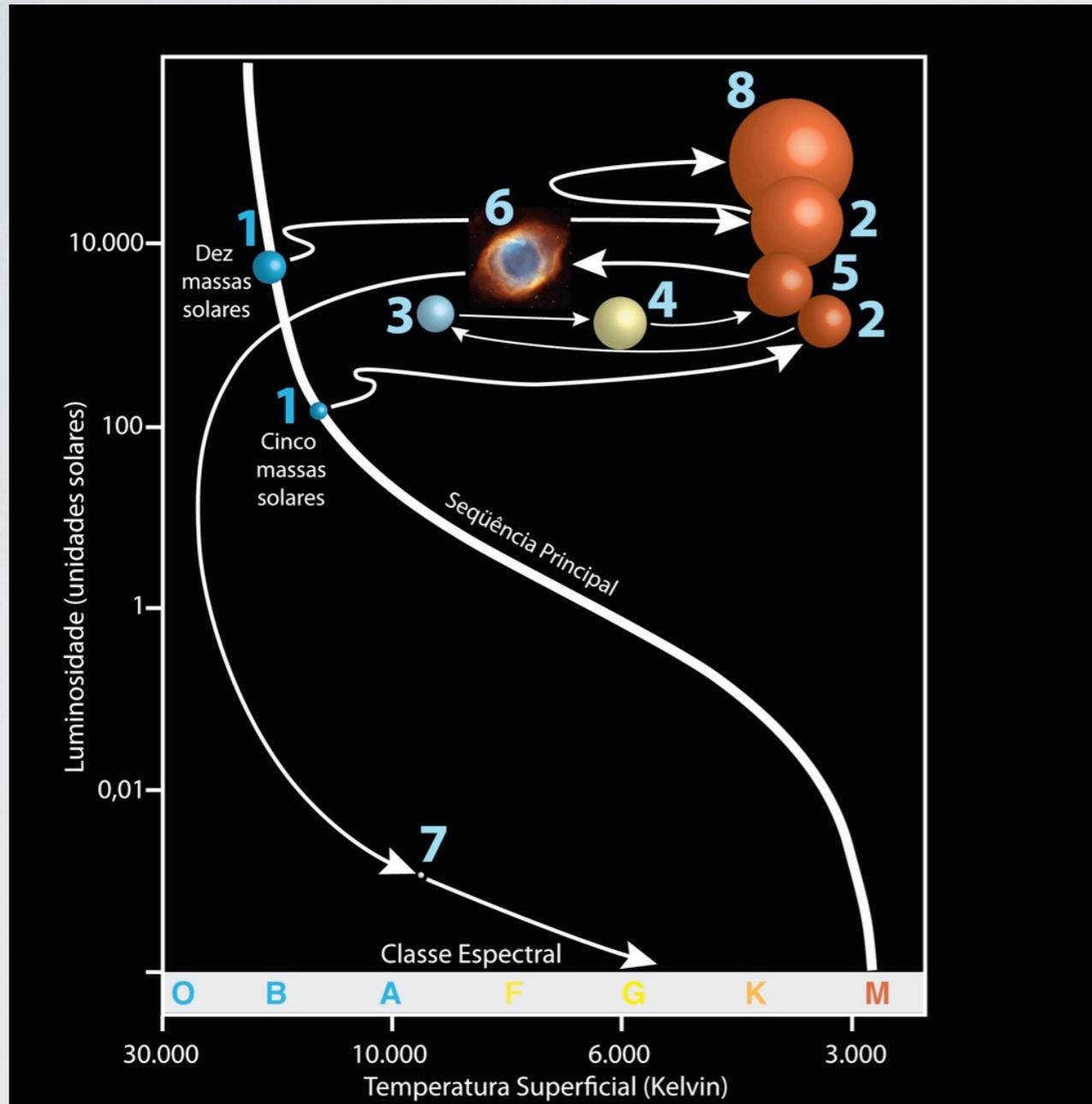
Depois de uma rápida passagem pela seqüência principal, o hidrogênio de seus núcleos se esgotam e elas se tornam uma supergigante vermelha.

Evolução de uma estrela massiva ($10 M_{\odot}$)



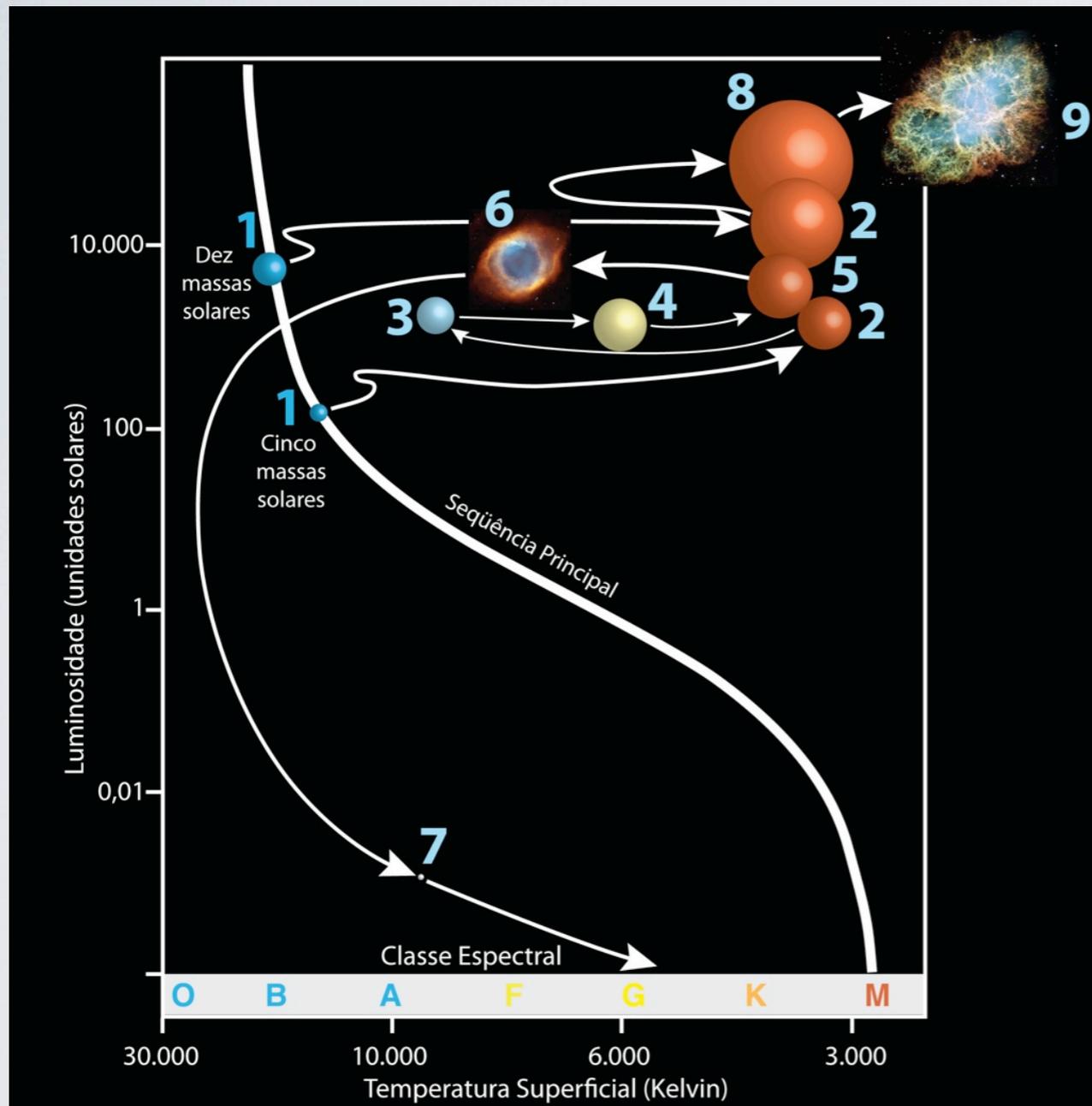
Estrelas com massas maiores do que $8 M_{\odot}$ podem aquecer-se o suficiente para fundir neônio e oxigênio em elementos adicionais. O núcleo transforma-se rapidamente (algumas décadas) em um núcleo de silício, que então funde-se em um núcleo de níqueo-ferro.

Evolução de uma estrela massiva ($10 M_{\odot}$)



A estrela possui cascas de outros elementos em volta do núcleo massivo.

Evolução de uma estrela massiva ($10 M_{\odot}$)

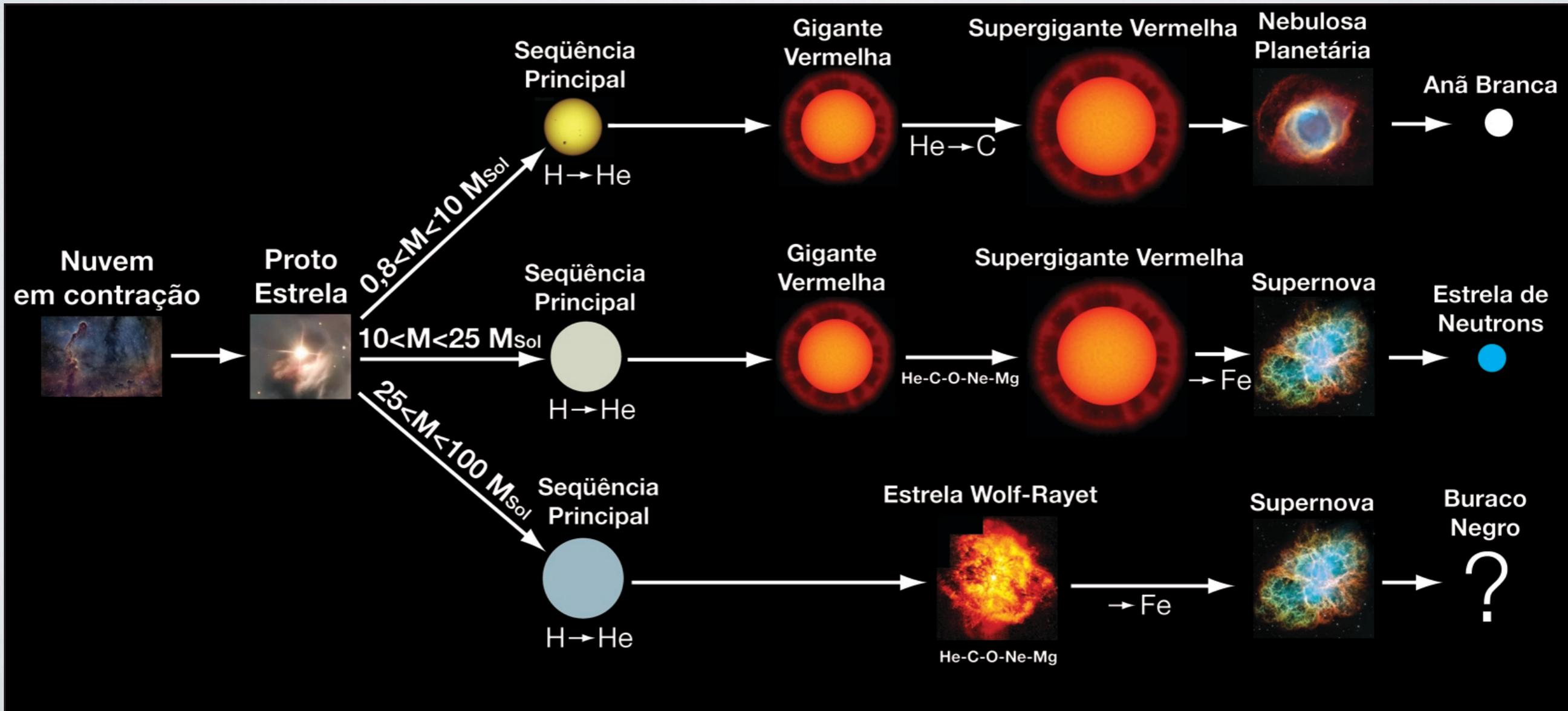
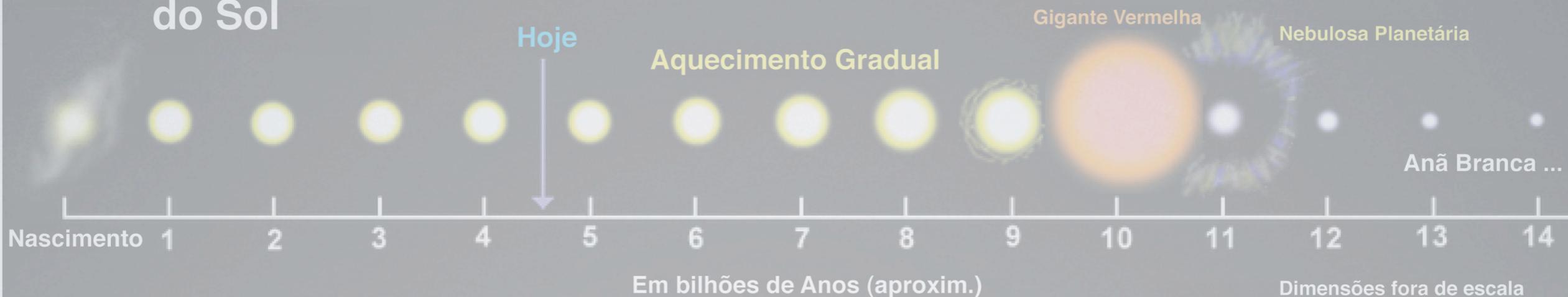


Ferro é o elemento de maior energia de ligação. Portanto, o ferro é o fim da “estrada”. O núcleo começa a colapsar sob a ação da gravidade e se aquece. A estrela explode como uma **supernova**, deixando para trás ou uma **estrela de neutrons** ou um buraco negro.

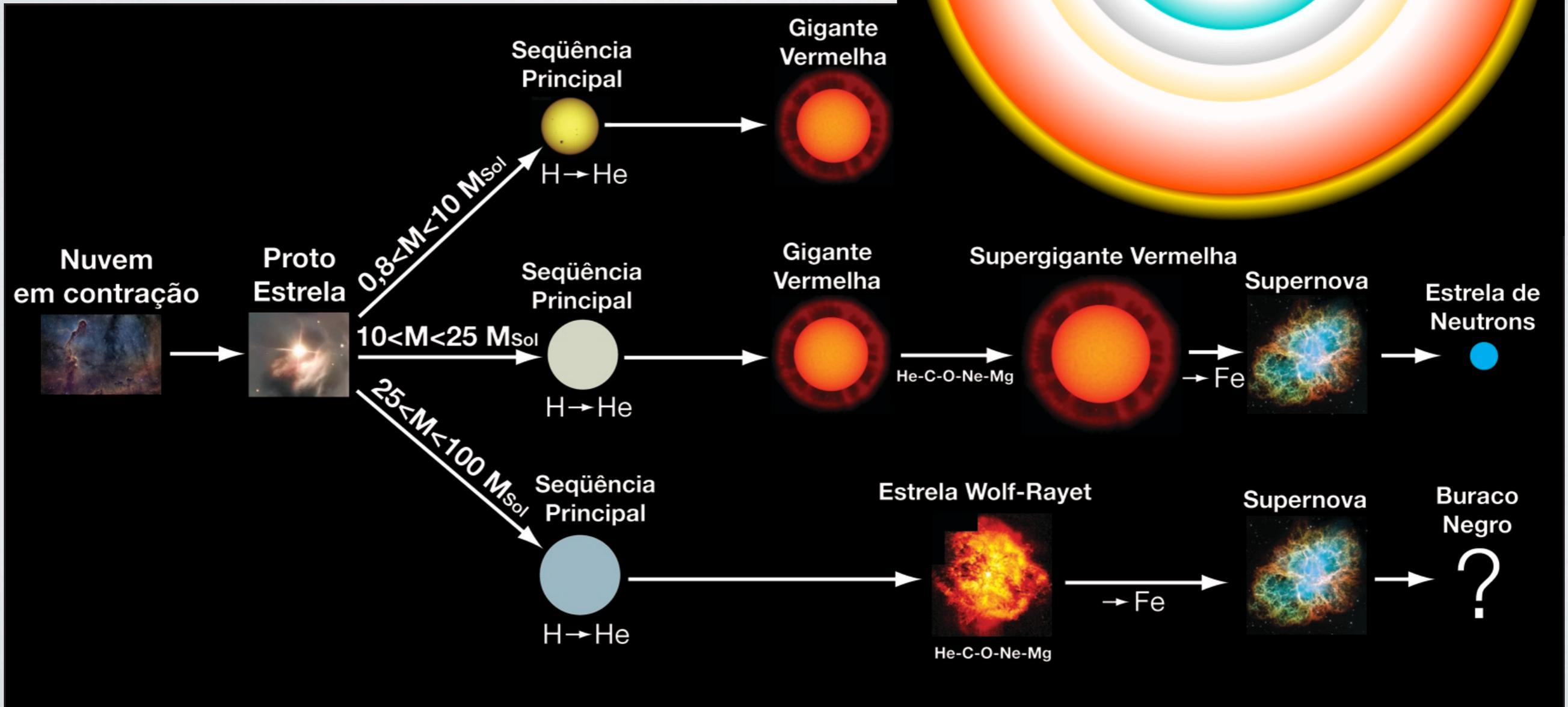
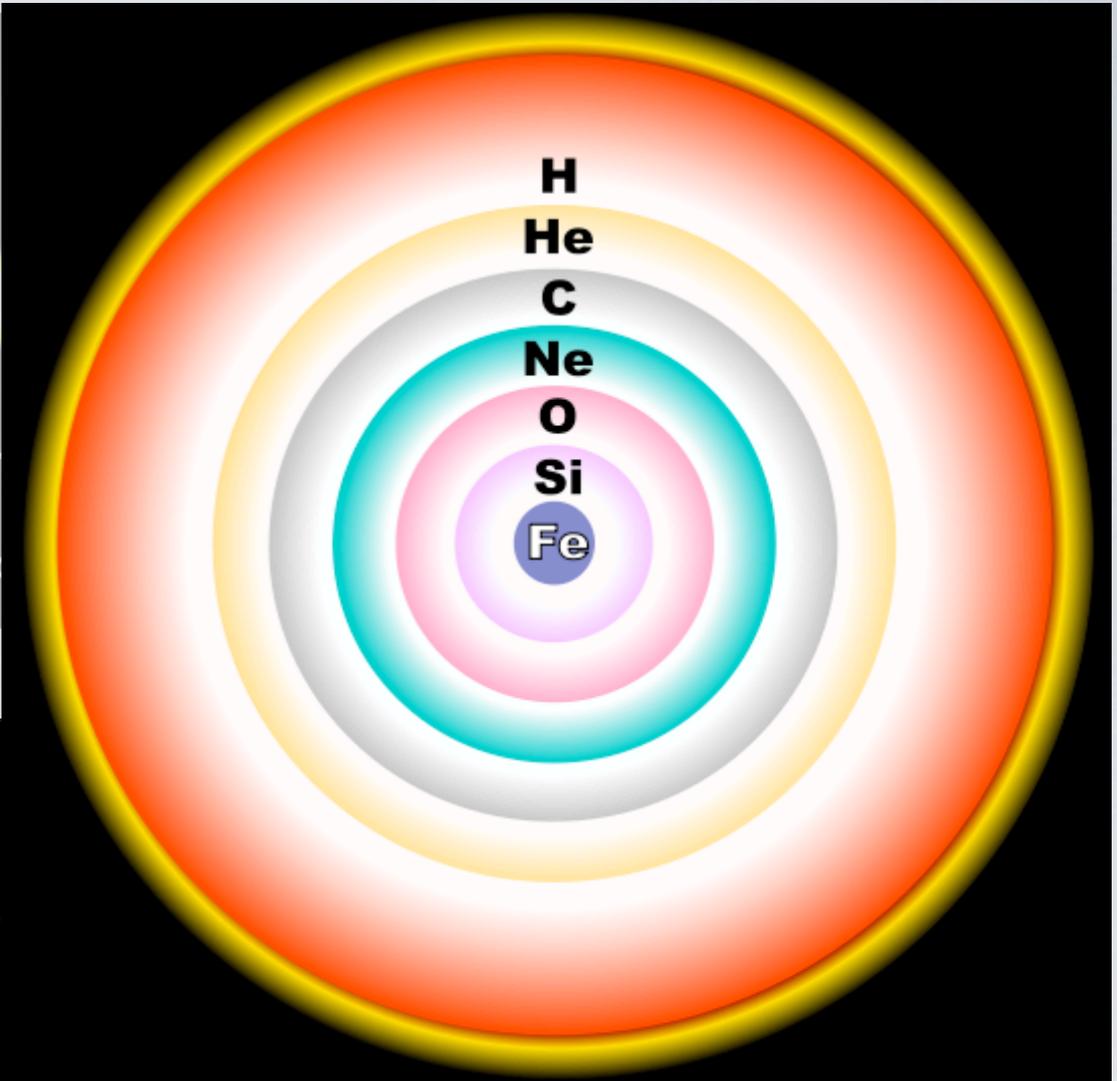
Ciclo de Vida do Sol



Ciclo de Vida do Sol



Ciclo de Vida do Sol



Ciclo de Vida do Sol

