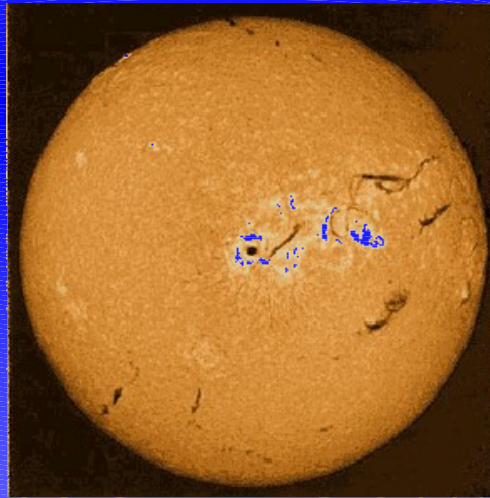


# Evolução de estrelas de massa intermediária

*Roberto Ortiz*  
EACH - USP

# *O que é uma estrela?*

Um corpo celeste dentro do qual processam-se reações termonucleares de fusão



O Sol é uma estrela !



# *Fusão nuclear em estrelas*

- São reações nas quais **dois núcleos atômicos** (ou um núcleo e outra partícula) **se fundem**, formando um núcleo diferente.
- No núcleo de uma estrela ocorrem diversos tipos de reações nucleares, simultaneamente
- As mais comuns envolvem colisões entre prótons e outras partículas (outro próton ou o núcleo de He, por exemplo)
- Problema: **a repulsão eletrostática** entre os núcleos não favorece a ocorrência da fusão nuclear.

# *Fusão nuclear em estrelas*

$$F_e = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

- A repulsão aumenta muito com a aproximação das cargas
- Maior velocidade de aproximação das cargas → Maior aproximação
- Maior velocidade de aproximação das partículas = **Maior temperatura**
- Normalmente envolvem uma enorme quantidade de energia (absorvida ou emitida)

# *Fusão Nuclear nas estrelas*

- A reação nuclear que ocorre com maior frequência em estrelas é a fusão de 4 átomos de hidrogênio (H) formando hélio (He) com liberação de energia:



- Vamos analisar a massa desses reagentes e seu produto:

$$m(\text{p}^+): 1,00728 \text{ u.m.a.}$$

$$4 \times m(\text{p}^+) = 4,0291 \text{ u.m.a.}$$

$$m({}^4\text{He}^{2+}) = 4,0026 \text{ u.m.a.}$$

$$\Delta m = 0,0265 \text{ u.m.a.}$$

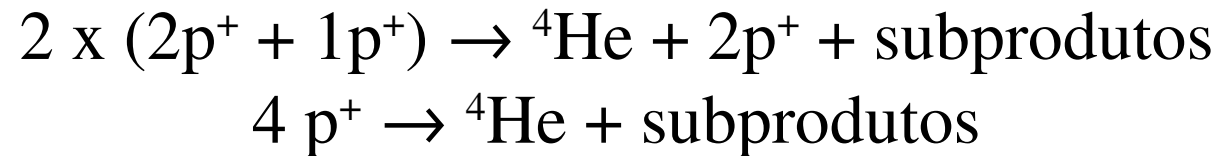
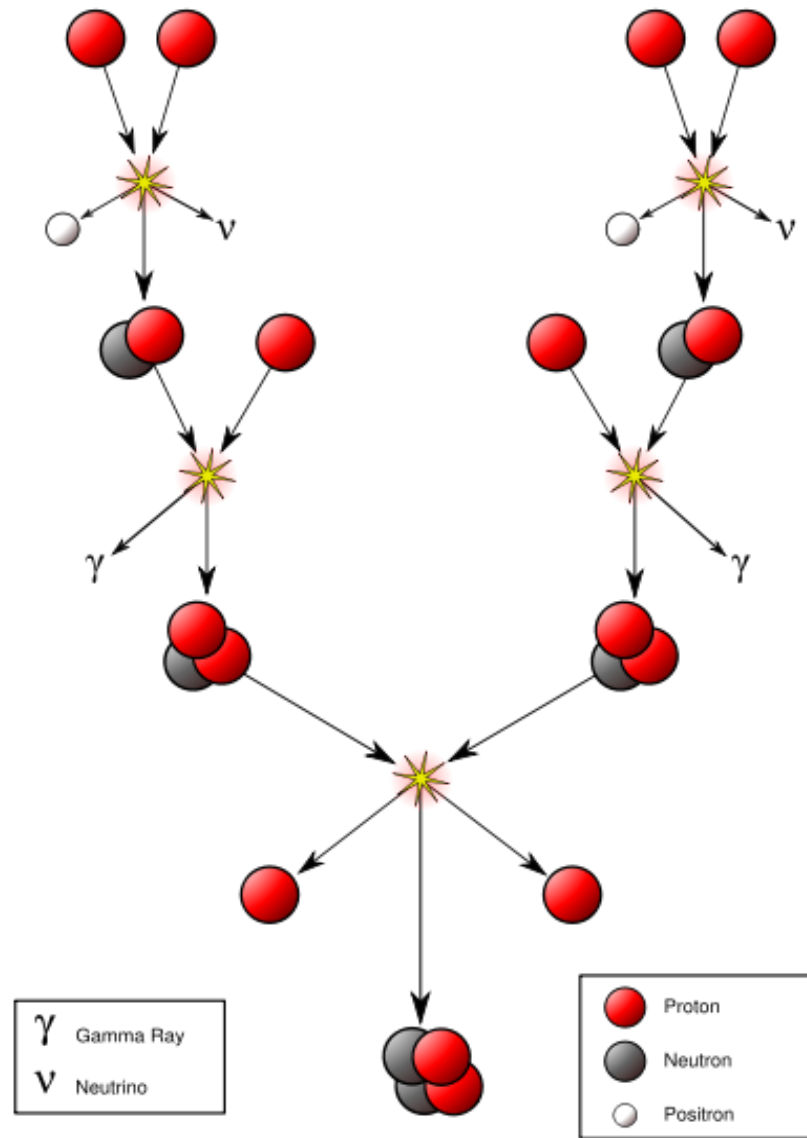
$$\Delta m = 4,4004 \times 10^{-26} \text{ g}$$

*Equação de Einstein:*

$$E = m c^2$$

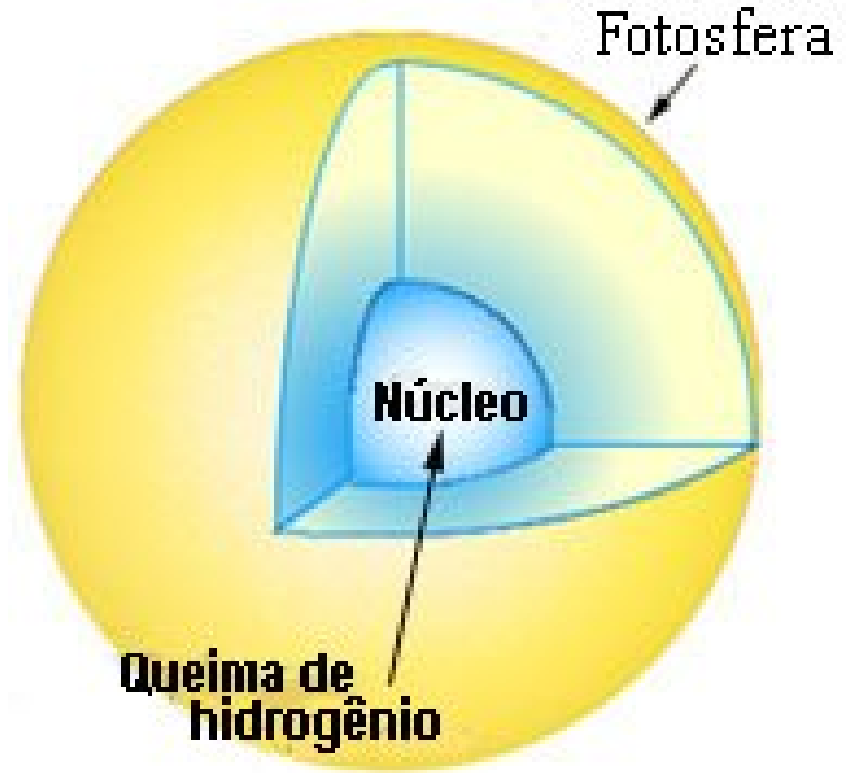
$$E = 3,604 \times 10^{-12} \text{ J (por reação)}$$

Ciclo p-p (próton-próton): como de fato ocorre.



# *O local da fusão nuclear: o núcleo das estrelas*

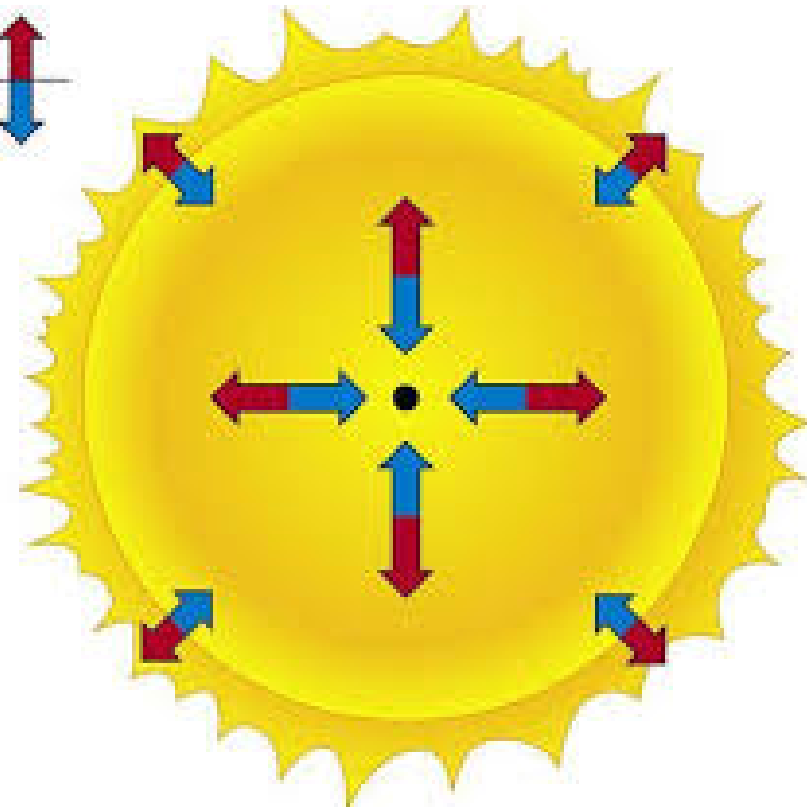
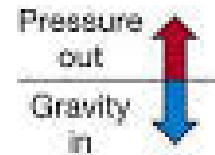
- Uma temperatura mínima de 13 milhões de graus, é necessária para a ocorrência do ciclo p-p
- Hidrogênio é paulatinamente convertido em hélio, liberando energia
- Após uma série de espalhamentos e transformações, a radiação escapa pela superfície, chegando até nós





# *O equilíbrio hidrostático: Gravidade x Pressão do Gás*

- Quando uma estrela não sofre variações de tamanho ou de distribuição radial de matéria, dizemos que está em **equilíbrio hidrostático**.
- Exemplos: O Sol e estrelas da sequência principal (não pulsantes)
- A gravidade gerada pela ação do próprio peso da estrela é contrabalanceada pela pressão do gás.



# *Como nascem as estrelas?*

No espaço interestelar existem nuvens de gás muito frias, formadas por hidrogênio molecular

Devido à força gravitacional própria, essas nuvens de gás contraem-se.

Durante o colapso gravitacional a nuvem de gás se fragmenta de muitos pedaços, que gerarão protoestrelas.

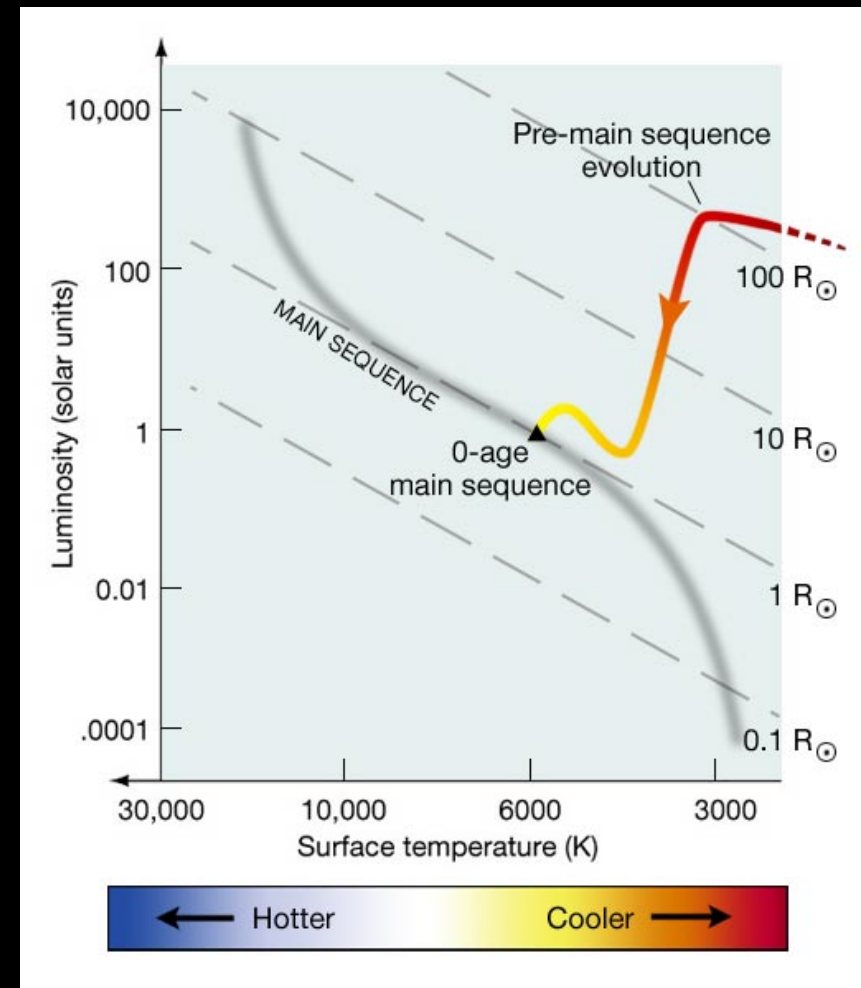


# *Como nascem as estrelas?*

Durante o colapso gravitacional a proto-estrela não está em equilíbrio hidrostático.

A temperatura no núcleo de cada protoestrela aumenta até que ocorram as primeiras reações do ciclo p-p.

Uma nuvem de gás normalmente forma centenas ou milhares de estrelas, de diversas massas



# *Estrelas recém-formadas na nebulosa de Orion*

**Visible • WFPC2**



**Infrared • NICMOS**





*As Plêiades: um jovem aglomerado de estrelas na constelação de Touro (visível a olho nu)*

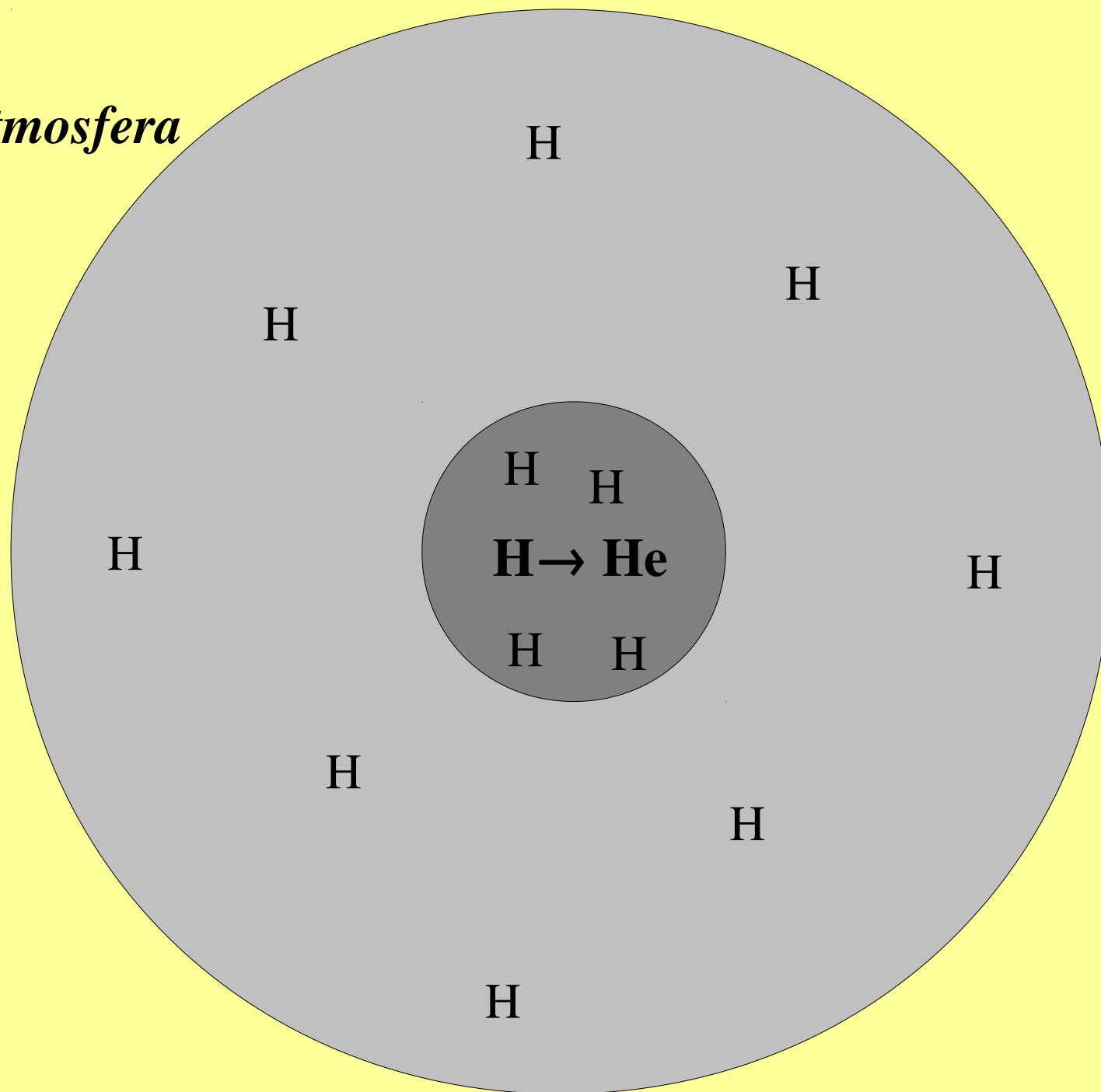


*A tênue nebulosidade é remanescente da nuvem molecular que originalmente formou este aglomerado de estrelas.*

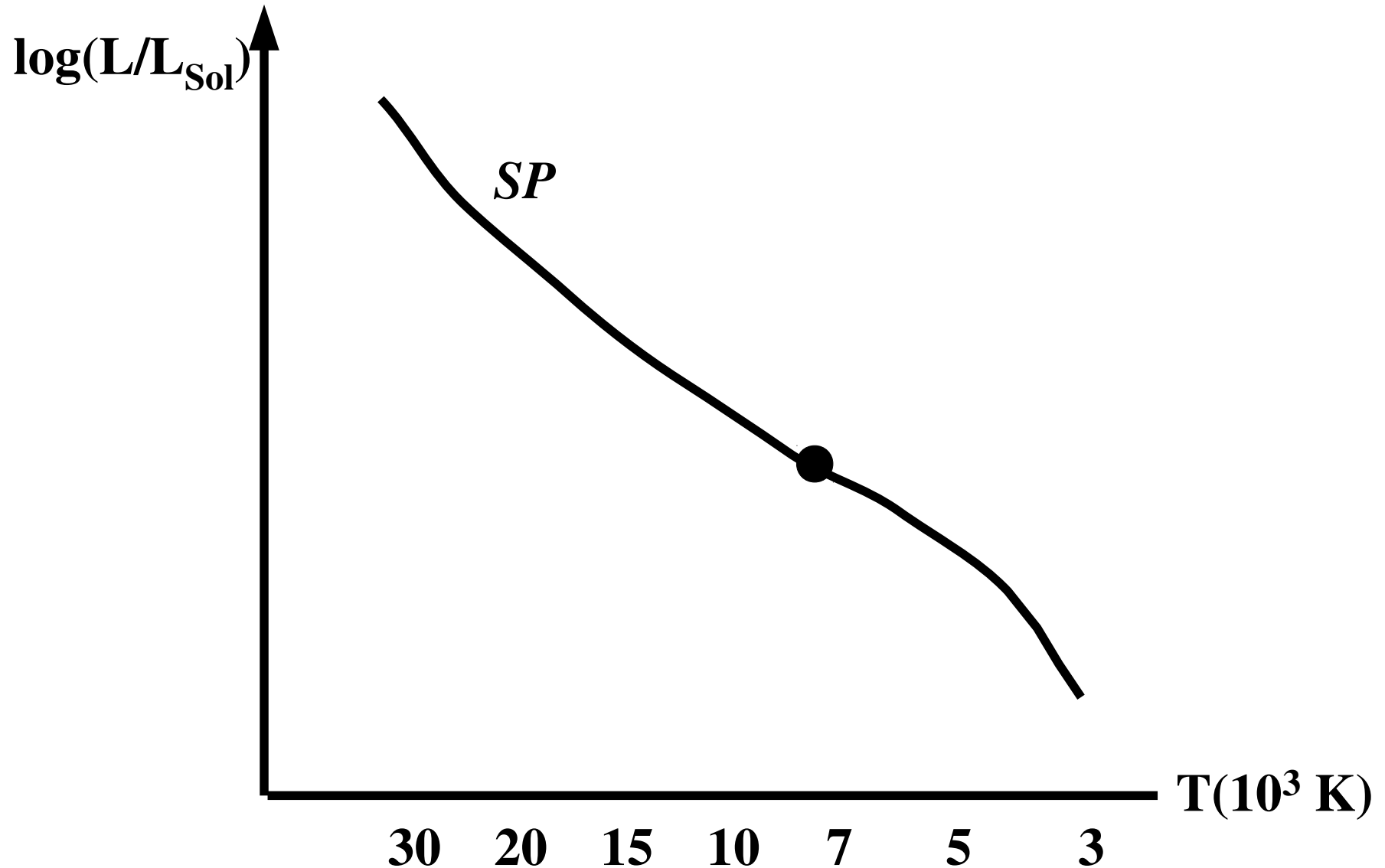
Evolução de estrelas de massa intermediária:

$$0,8 < M_*/M_{sol} < 8,0$$

*Atmosfera*

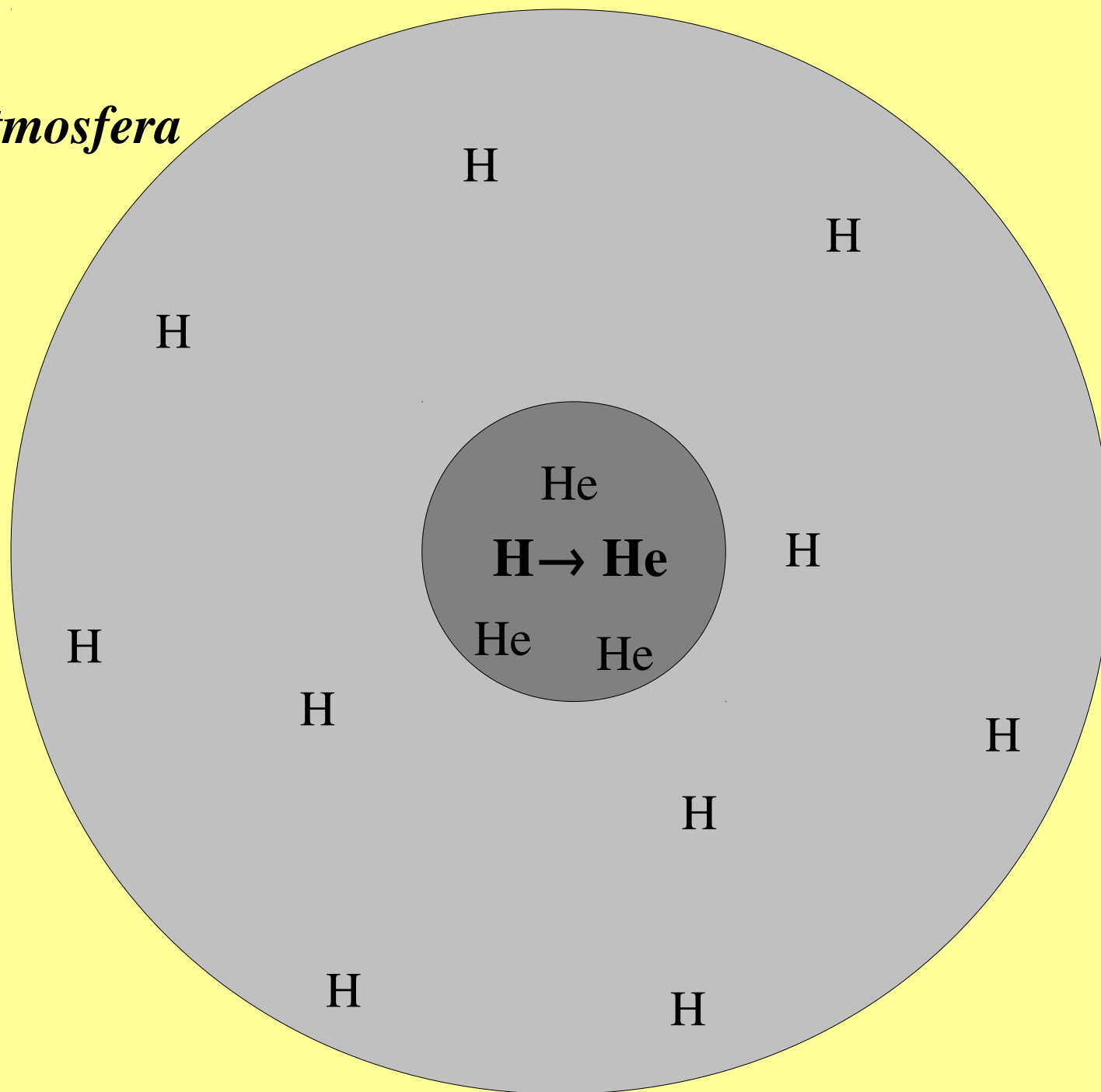


*Enquanto a estrela queima H em seu núcleo, ela permanece praticamente estática na sequência principal*





*Atmosfera*



H

H

H

He

**H → He**

H

H

He

He

H

H

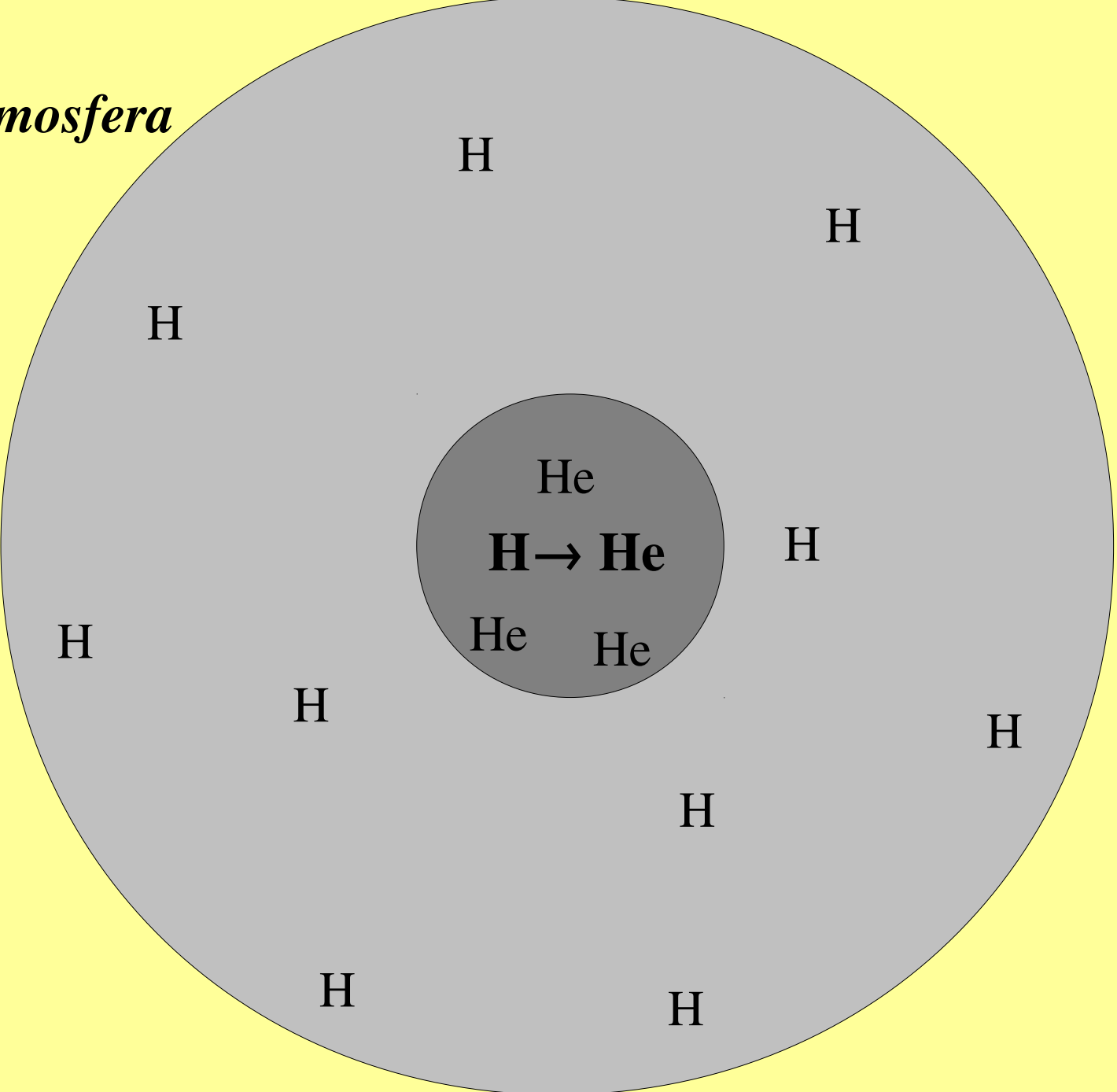
H

H

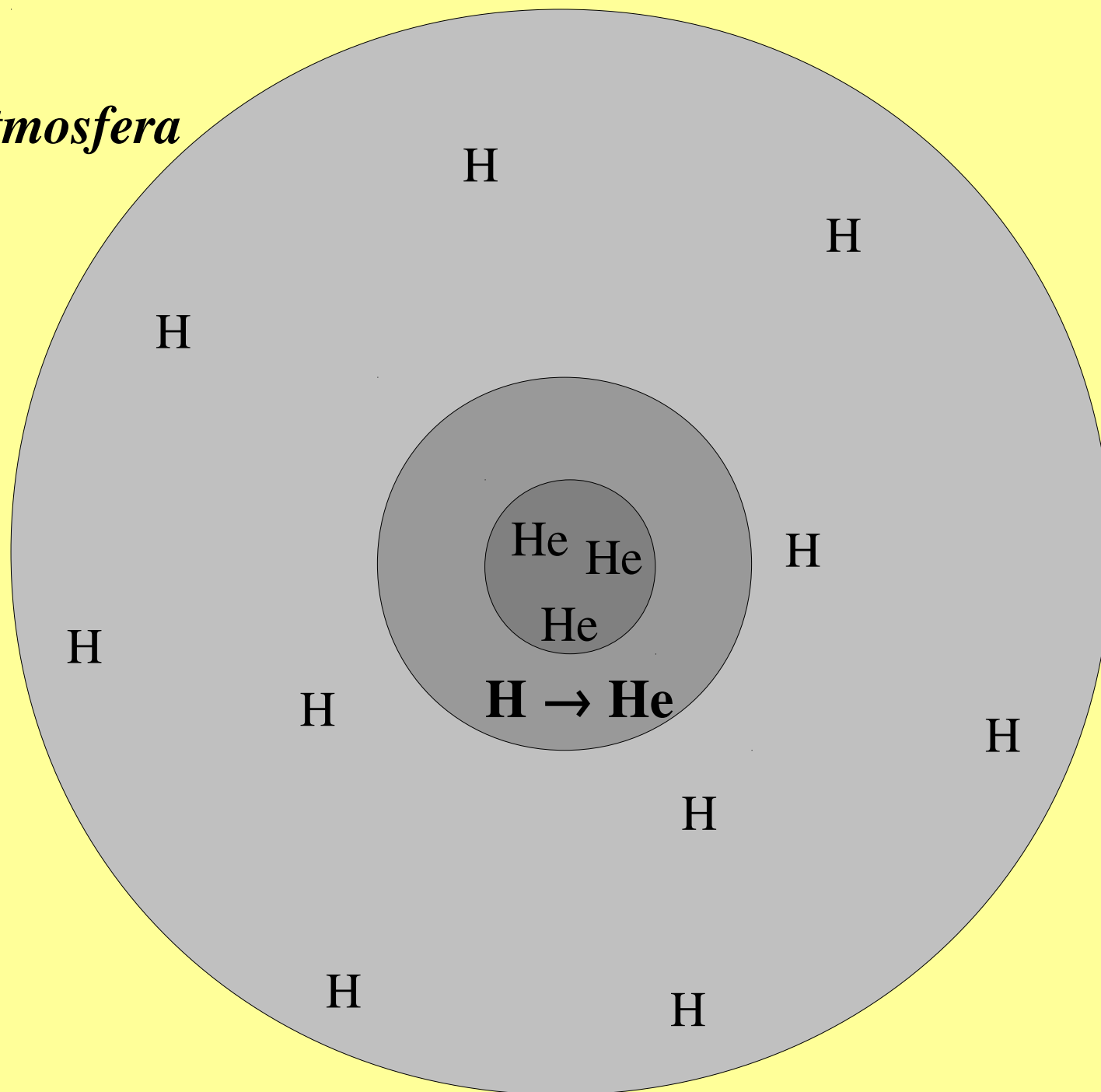
H

**COM O TEMPO, COMEÇA A FALTAR H NO NÚCLEO DA ESTRELA !**

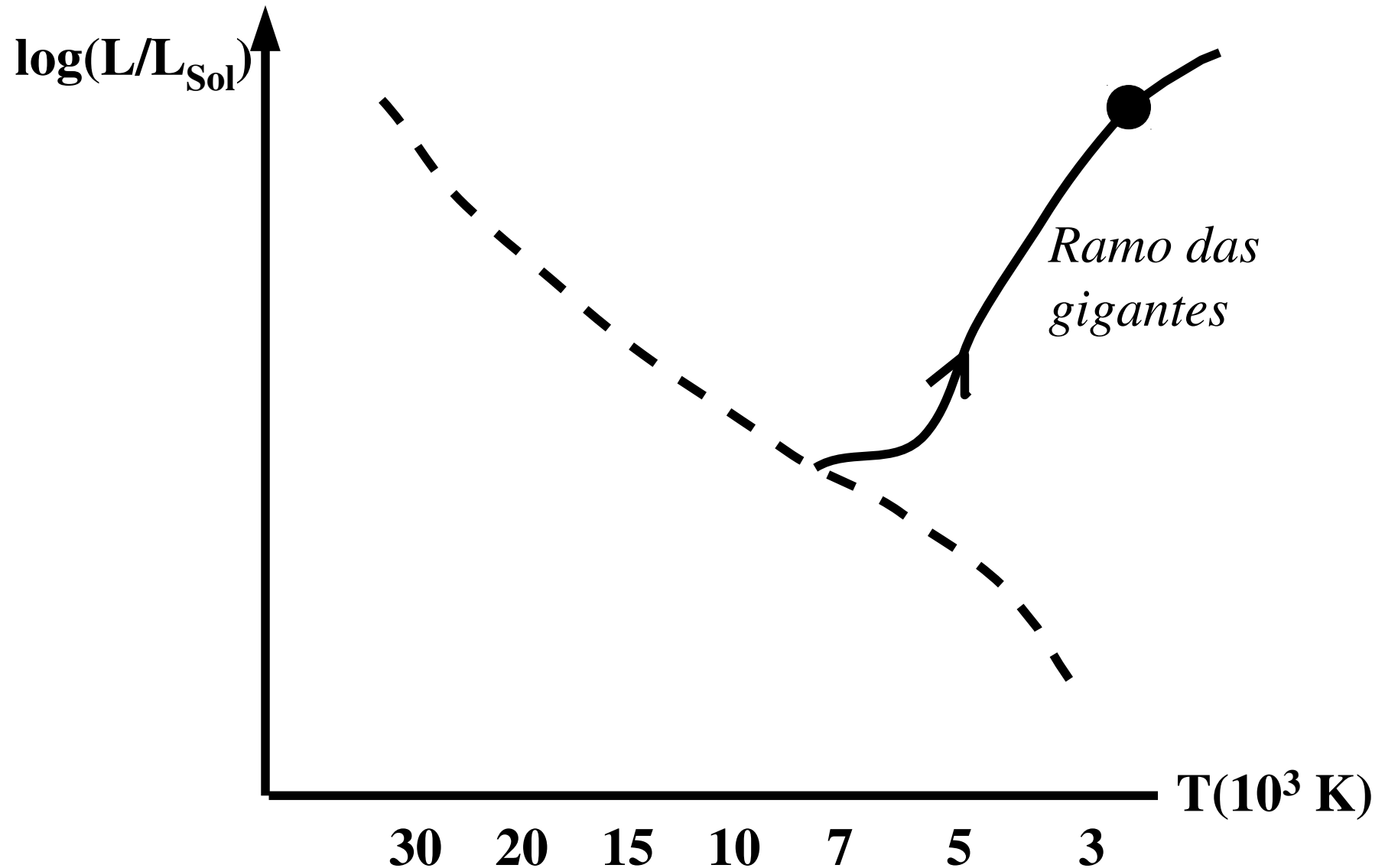
*Atmosfera*



*Atmosfera*



*Com o esgotamento do H no núcleo da estrela, ela abandona a sequência principal e “sobe” o ramo das gigantes vermelhas*



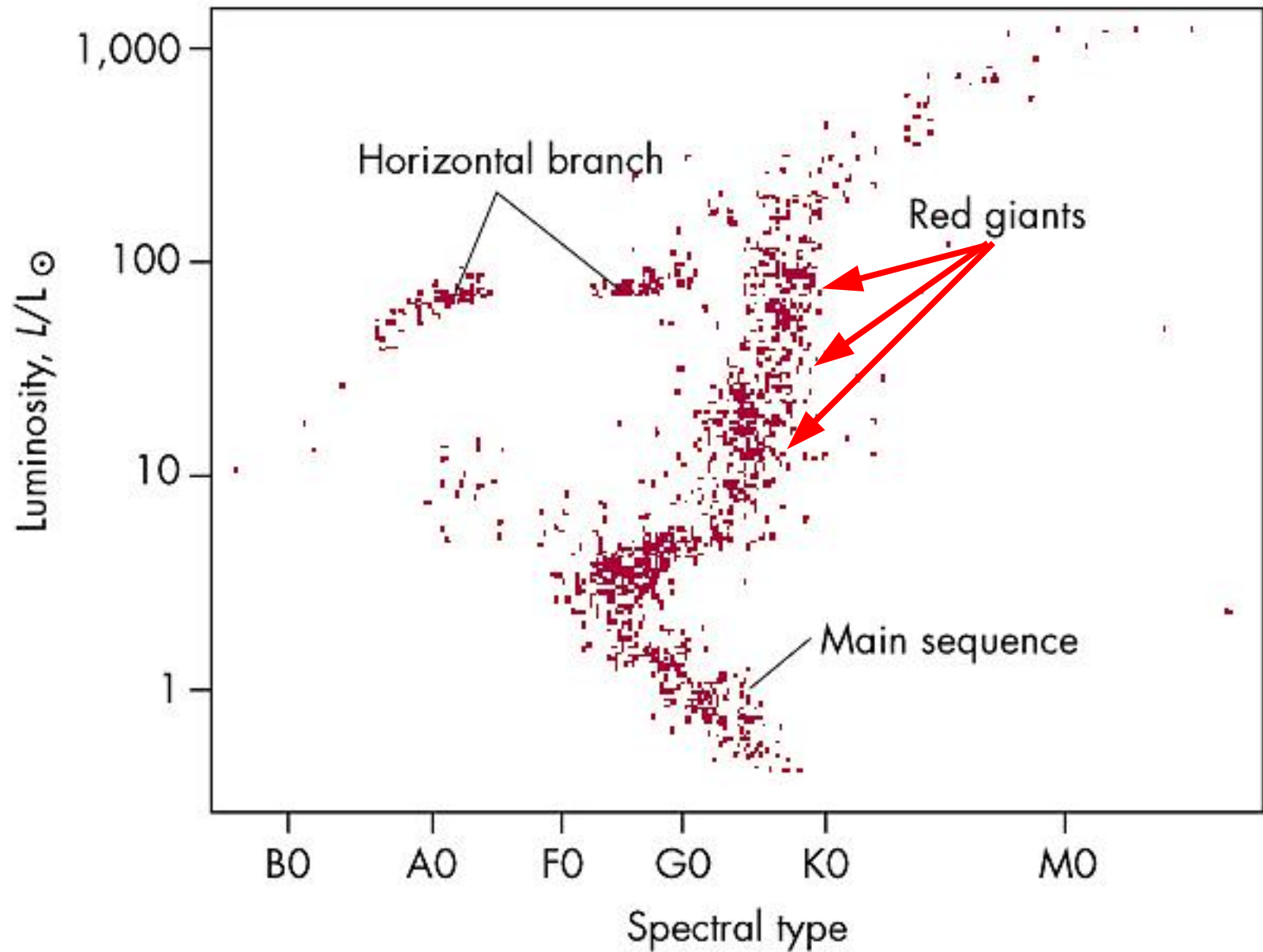


*A produção de energia passa a ocorrer numa camada em torno do núcleo, onde Hidrogênio é convertido em Hélio.*

*A estrela experimenta um aumento de tamanho e de brilho*

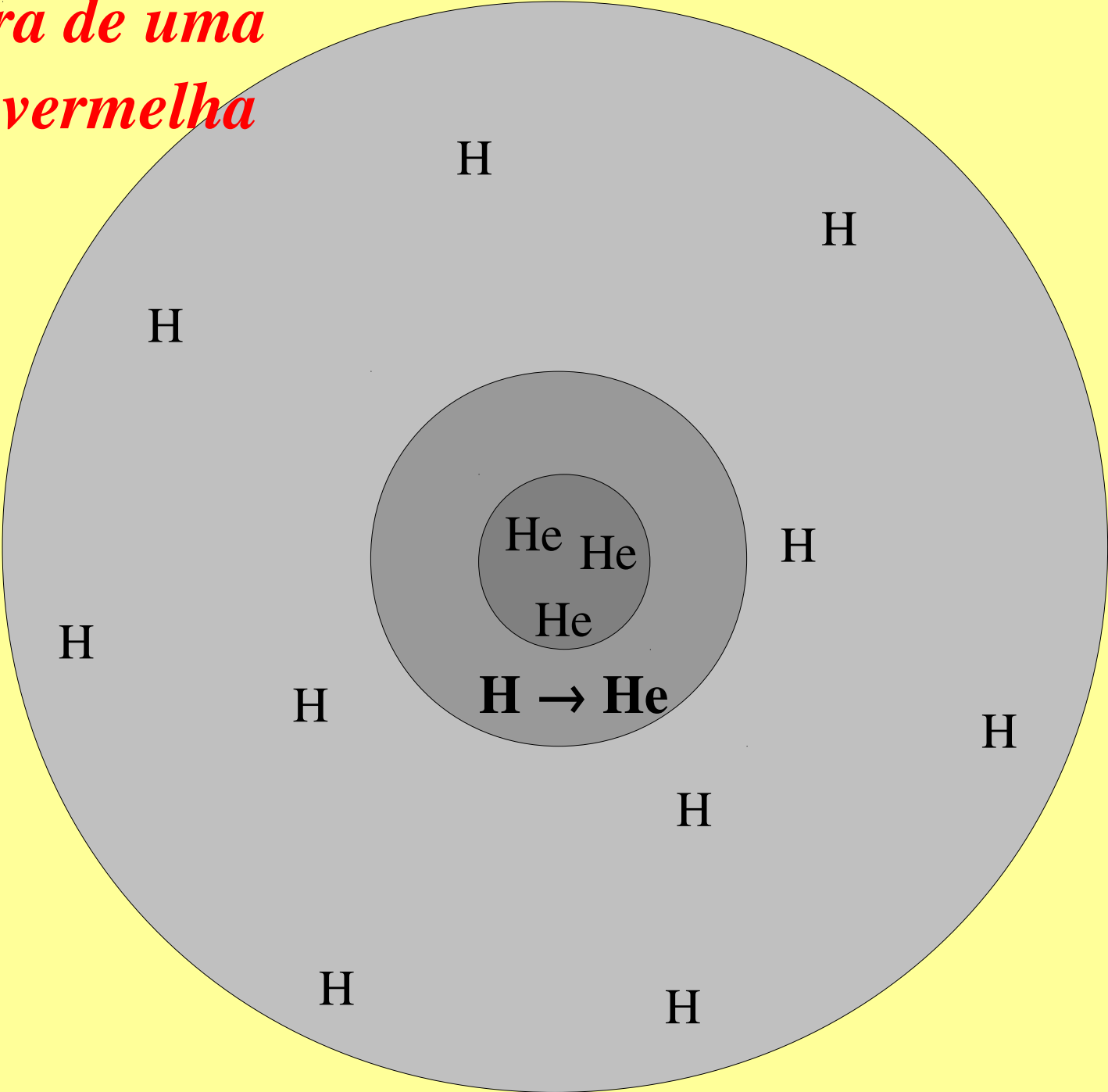
*A atmosfera da estrela esfria à medida que se expande*

*Nesta fase, a estrela é classificada como uma gigante vermelha*



**1o. ramo das gigantes:** *queima de H em torno do nucleo (inerte) de He*

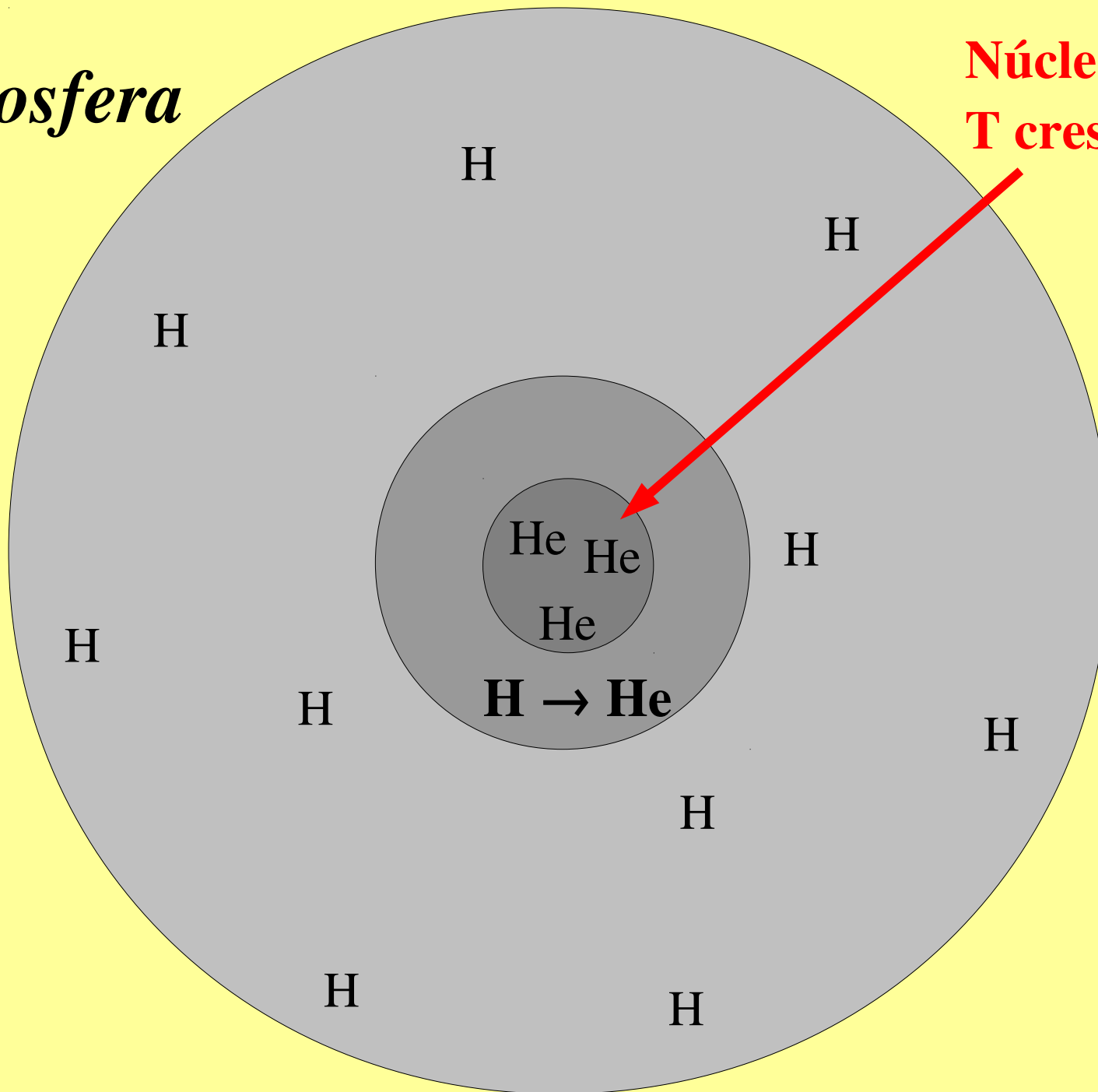
*Estrutura de uma gigante vermelha*



***O núcleo da estrela, composto pelo elemento Hélio, cresce à medida que  $H \rightarrow He$  na camada acima.***

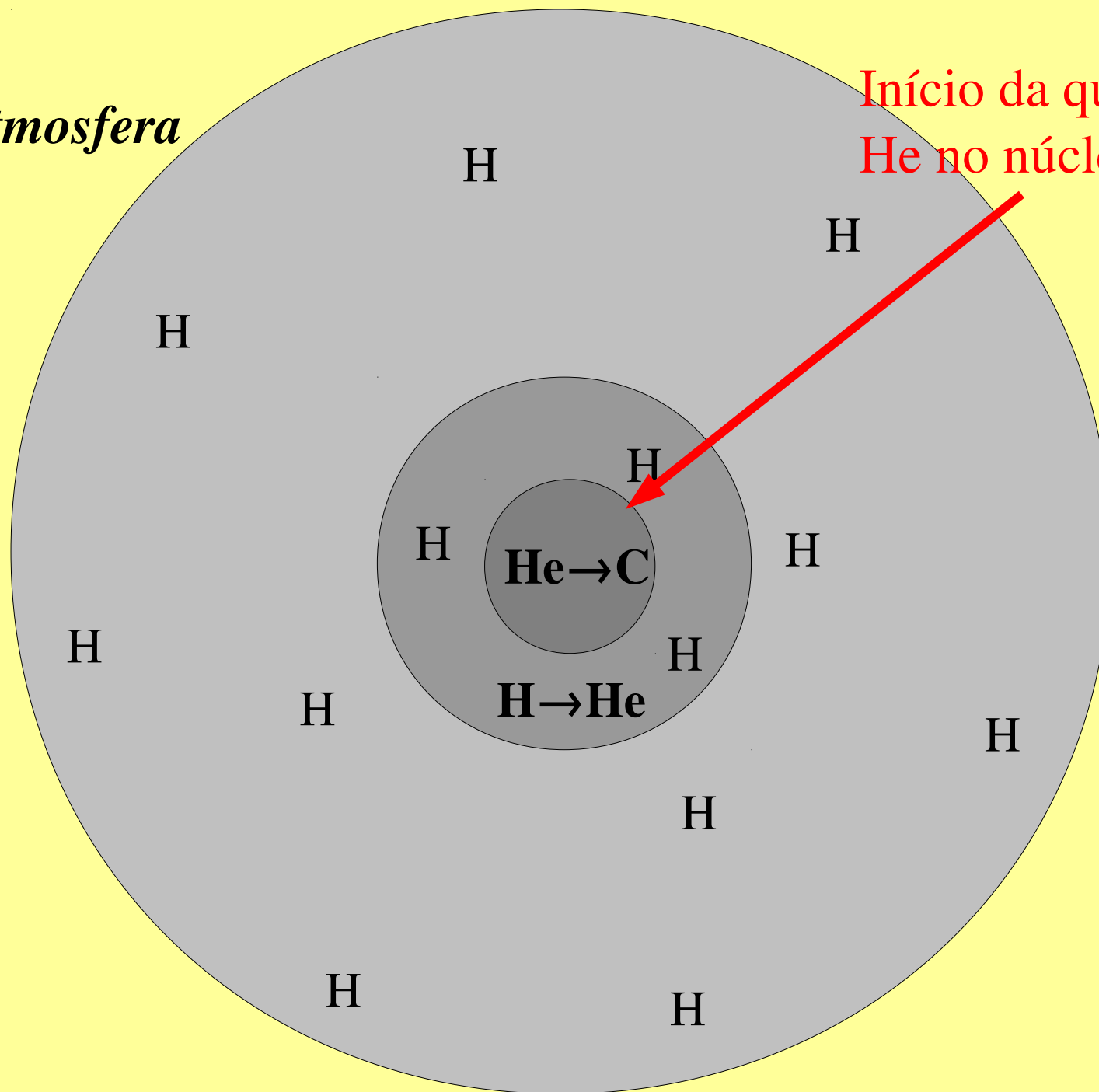
***Quando o núcleo de Hélio (inerte) acumula determinada massa, sua temperatura é alta o suficiente ( $T > 10^8 \text{ K}$ ) para iniciar a conversão  $He \rightarrow C$ .***

*Atmosfera*



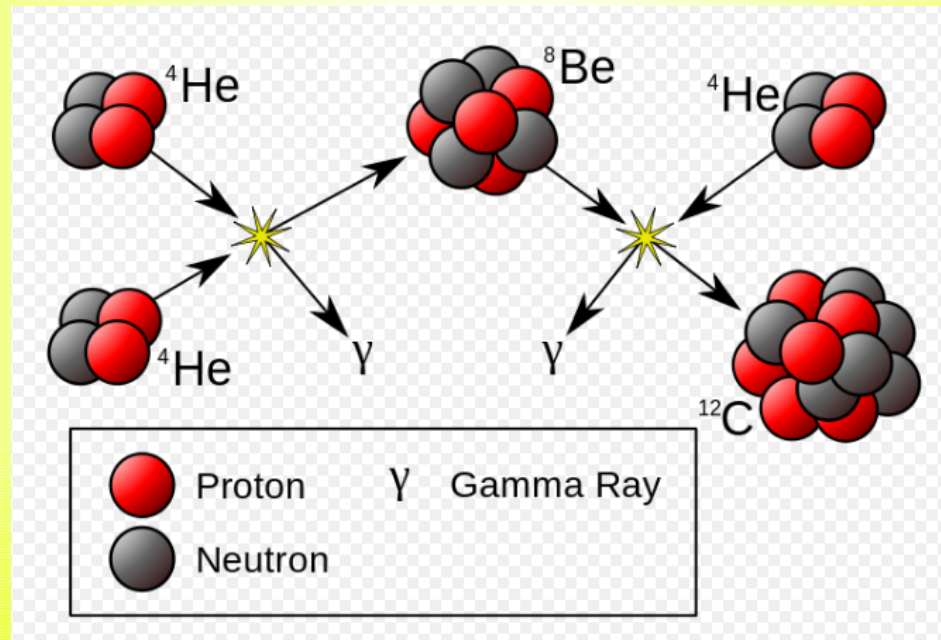
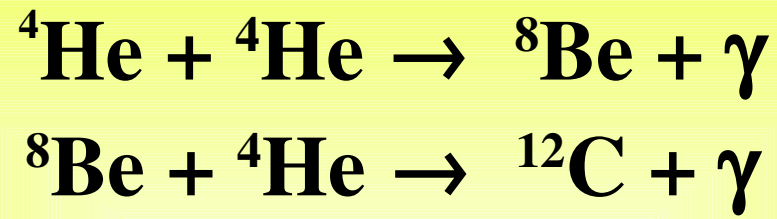
**Núcleo crescente,  
T crescente**

*Atmosfera*



Início da queima de  
He no núcleo ( $T > 10^8 \text{K}$ )

No núcleo da estrela, Hélio é convertido em Carbono através da reação triplo- $\alpha$  (se  $T > 10^8\text{K}$ ):

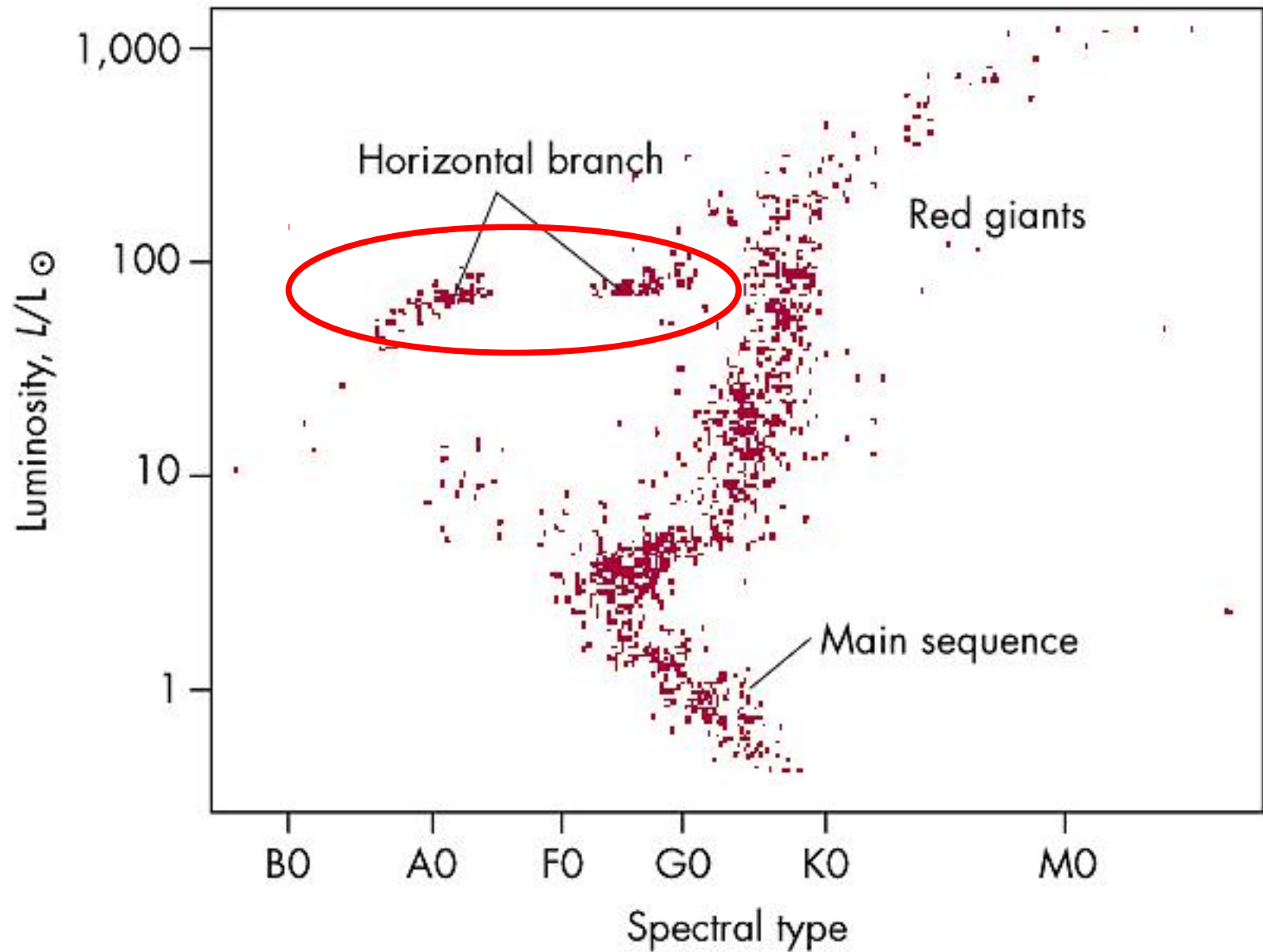


Ou resumidamente:  $3 {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + 2 \gamma$



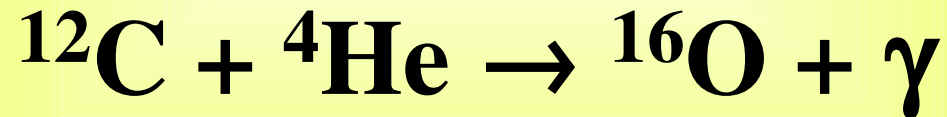
*Portanto, a estrela volta a gerar energia em seu núcleo, como se ela retornasse à sequência principal, porém agora queimando He ao invés de H.*

*A estrela desloca-se para o Ramo Horizontal do diagrama HR*

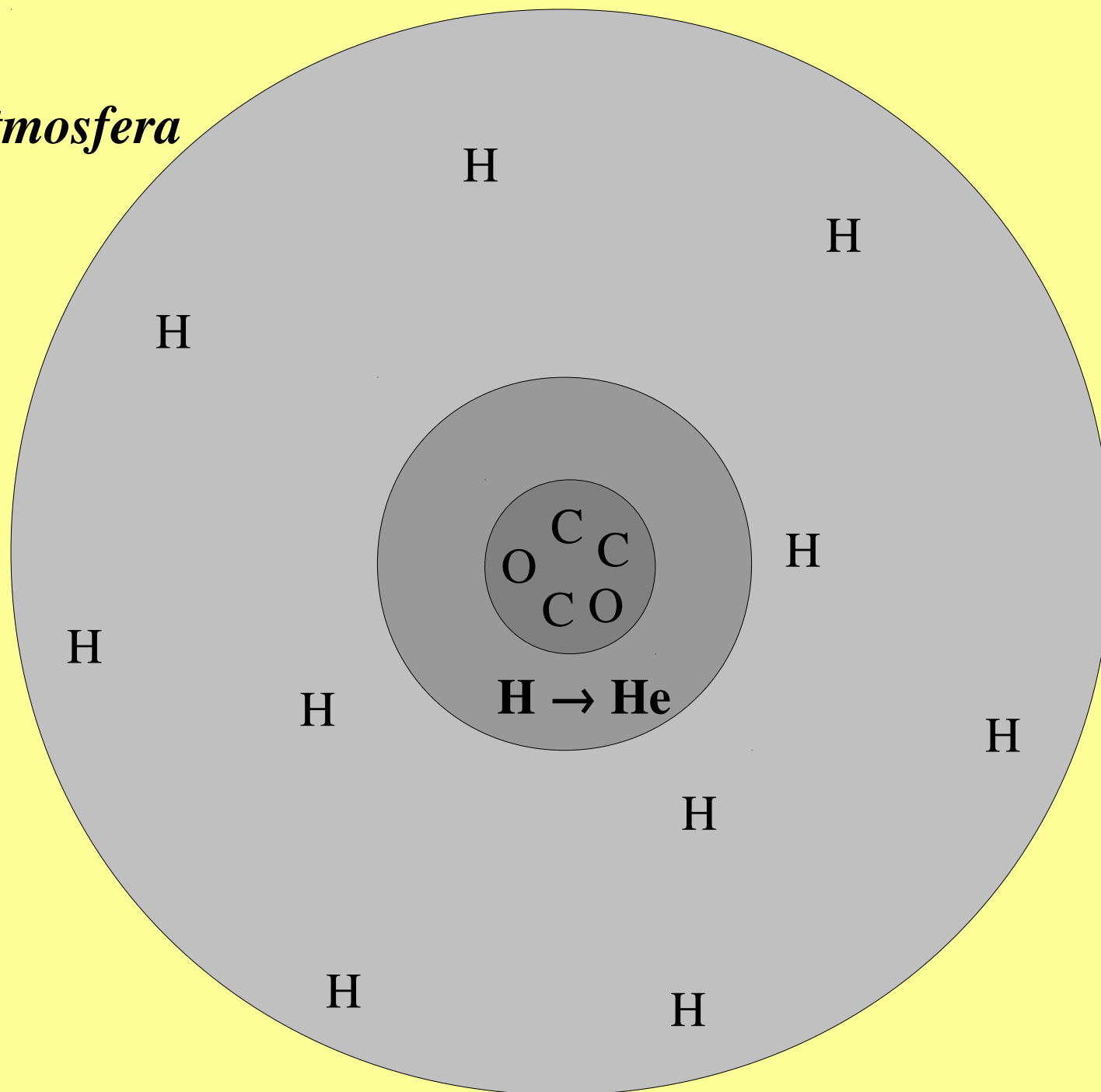


**Ramo Horizontal:** *queima de He no núcleo da estrela*

*Nas estrelas com massa maior, parte do Carbono é convertido em Oxigênio através da reação- $\alpha$  :  
(se  $T > 10^9\text{K}$ )*



*Atmosfera*

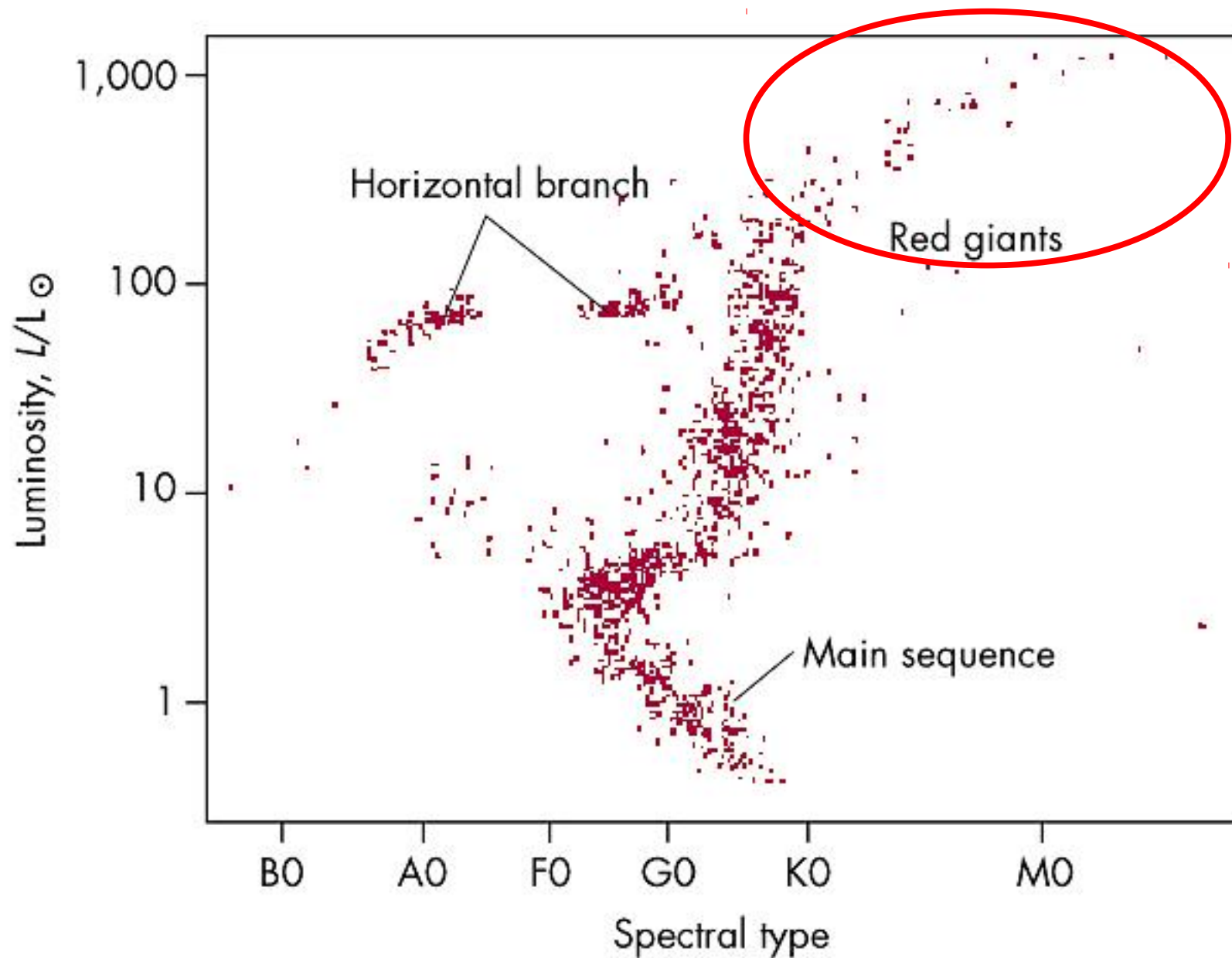


**A estrela sobe novamente o ramo das gigantes vermelhas: o ramo assintótico.**

**O raio cresce e atinge cerca de  $10^2 \times R_{\text{sol}}$  → a gravidade diminui muito pois:**

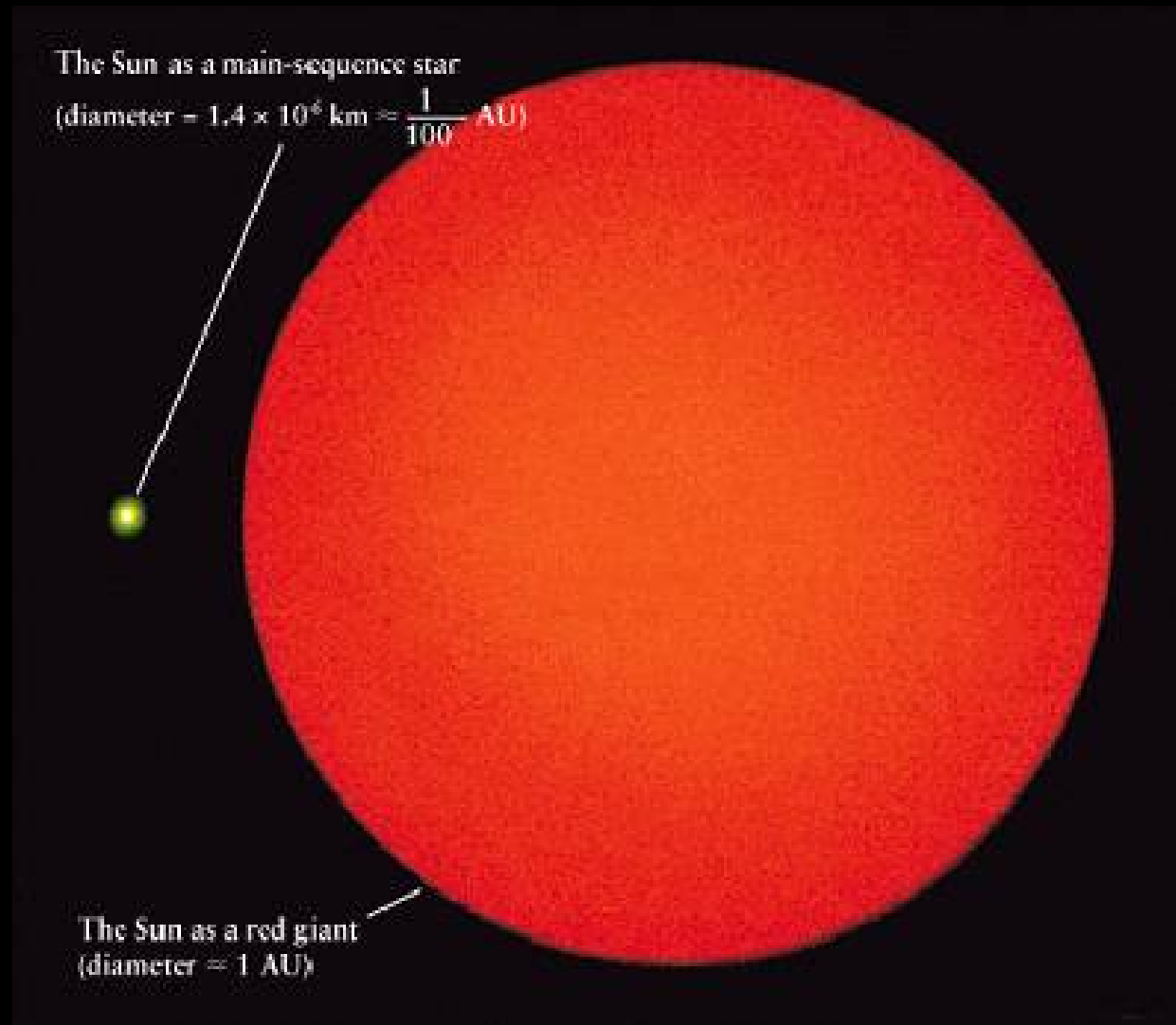
$$g = \frac{GM}{R^2}$$

**A luminosidade aumenta muito:  $10^3 \sim 10^4 \times L_{\text{sol}}$**



**2o. ramo das gigantes (ou ramo assintótico):**  
*H e He queimam em torno do nucleo inerte de C*

# *O Sol como uma Gigante Vermelha do ramo assintótico*





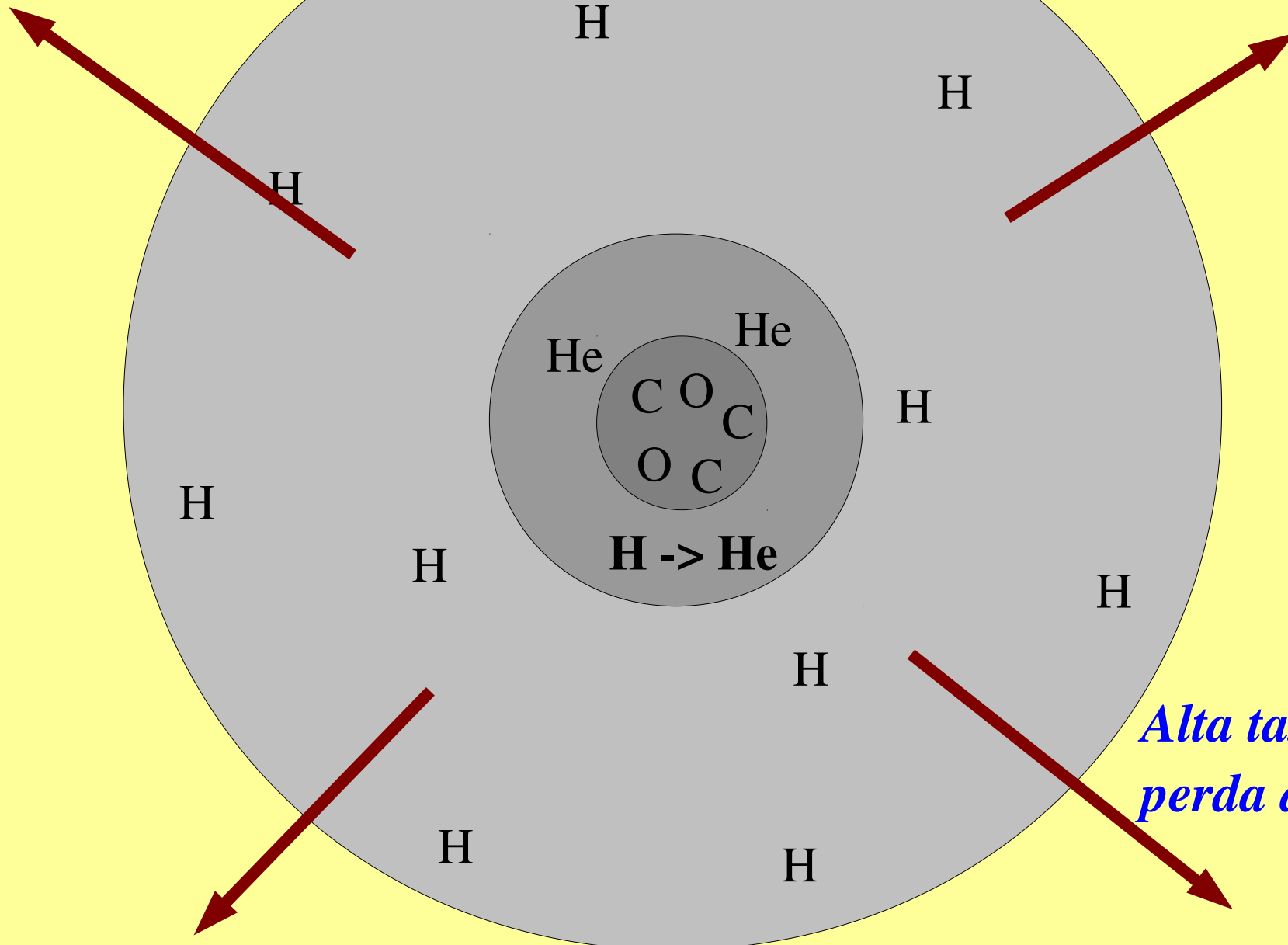
**A combinação de alta luminosidade e a baixa gravidade favorecem a perda de massa.**

**A atmosfera da estrela é paulatinamente lançada ao espaço.**

**A perda da atmosfera da estrela não é um processo explosivo: dura cerca de  $\sim 10^2$  a  $\sim 10^4$  anos.**

*Atmosfera*

*gravidade fraca  
+  
alta luminosidade*



H

H

H

He

He

C O  
O C

H

H

H

H -> He

H

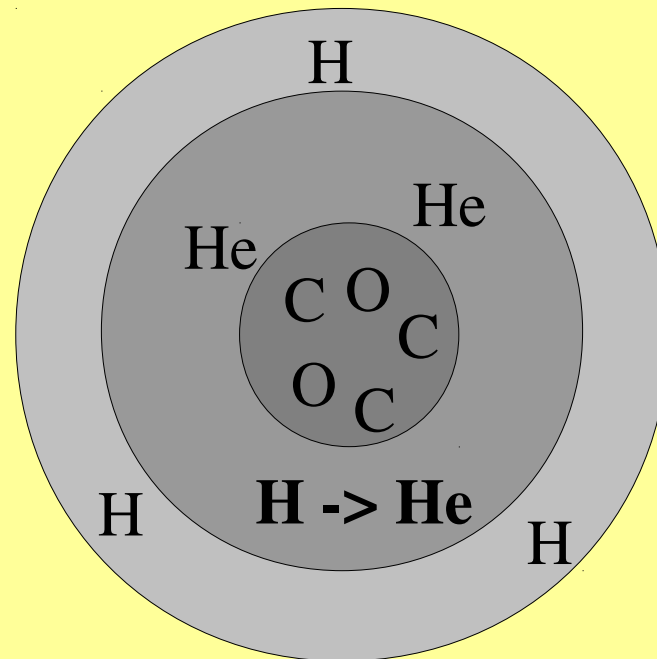
H

*Alta taxa de  
perda de massa*

H

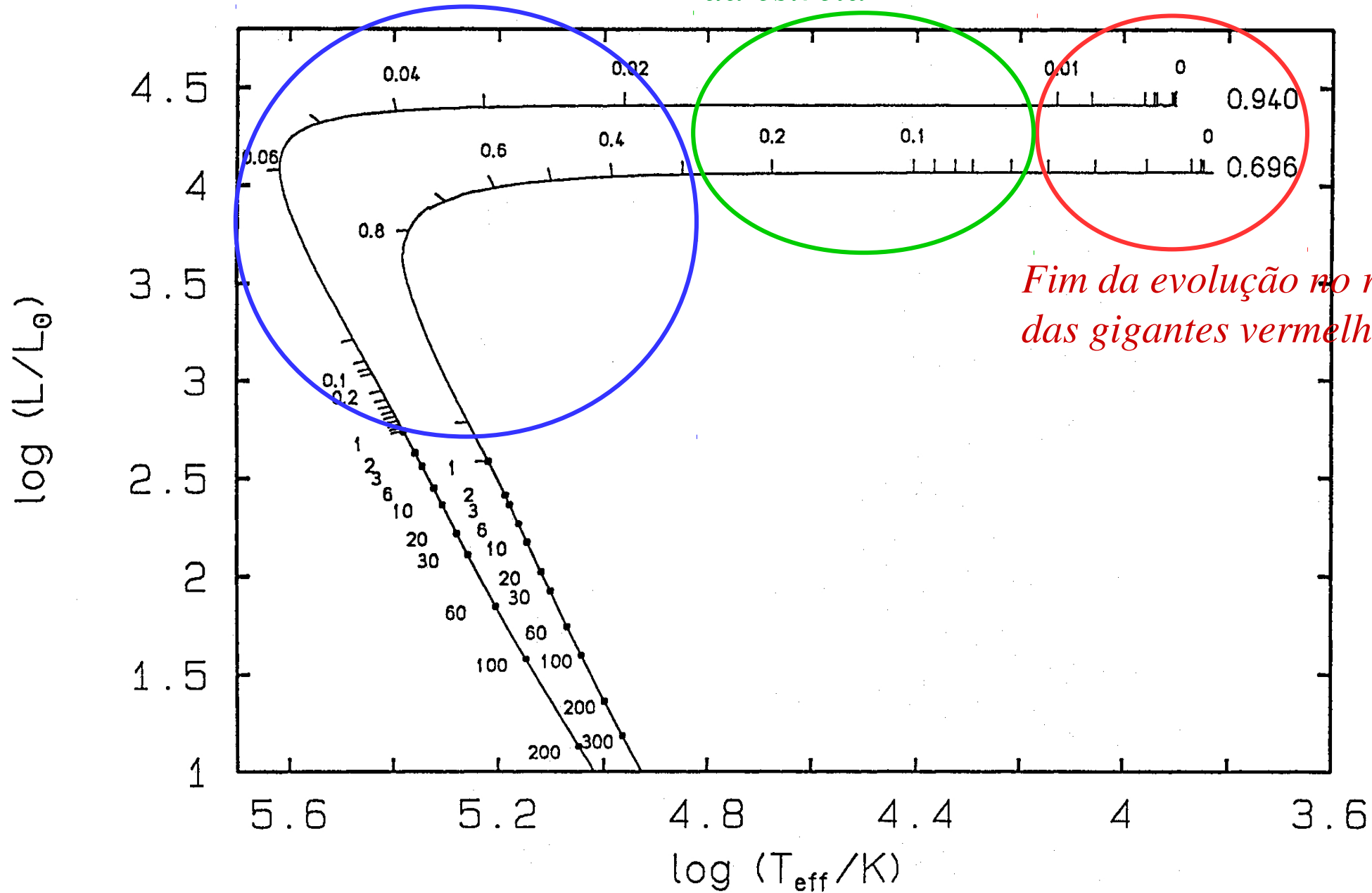
H

# *Núcleo de nebulosa planetária*



*Formação da  
Nebulosa Planetária*

*Expulsão da atmosfera  
da estrela*



*Fim da evolução no ramo  
das gigantes vermelhas*

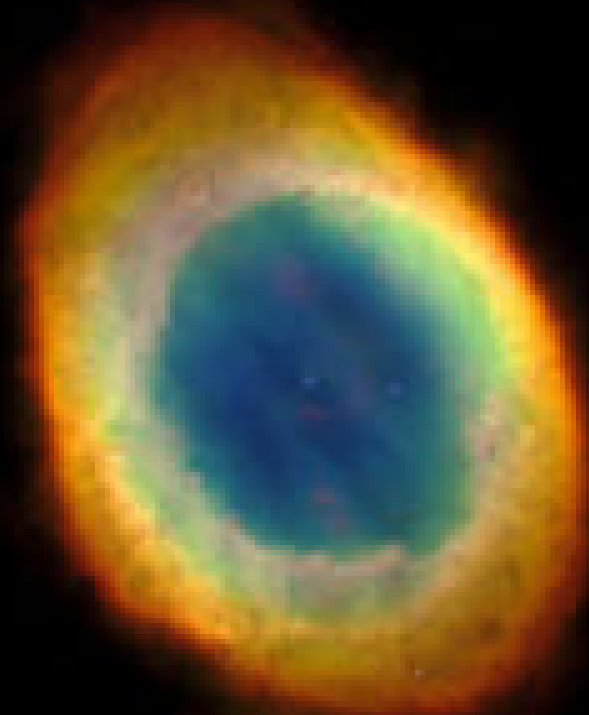
*Nebulosa Planetária: M27*



# *Resumindo*

- **Ao final da segunda ascensão no ramo das gigantes vermelhas, a estrela desenvolve um núcleo de C (e O) inerte, resultado da queima de He.**
- **A alta taxa de perda de massa aliada à baixa gravidade leva à ejeção da atmosfera da estrela.**
- **Restará o núcleo da estrela, de pequeno raio e alta temperatura, circundado pela atmosfera ejetada da estrela (nebulosa planetária).**
- **A atmosfera do núcleo da nebulosa planetária possui alta temperatura (até 300 000 K) e os ftons ultravioletas emitidos por ela ionizam o gás circundante.**

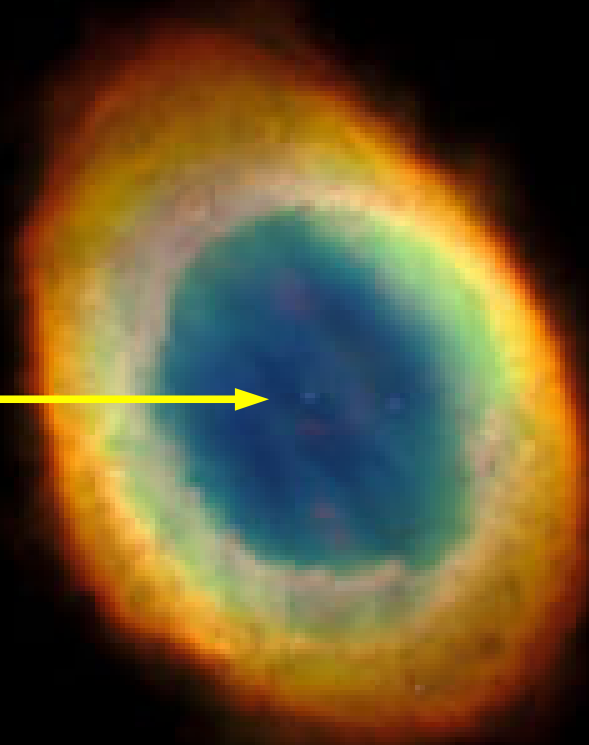
*Nebulosa Planetária: M57*

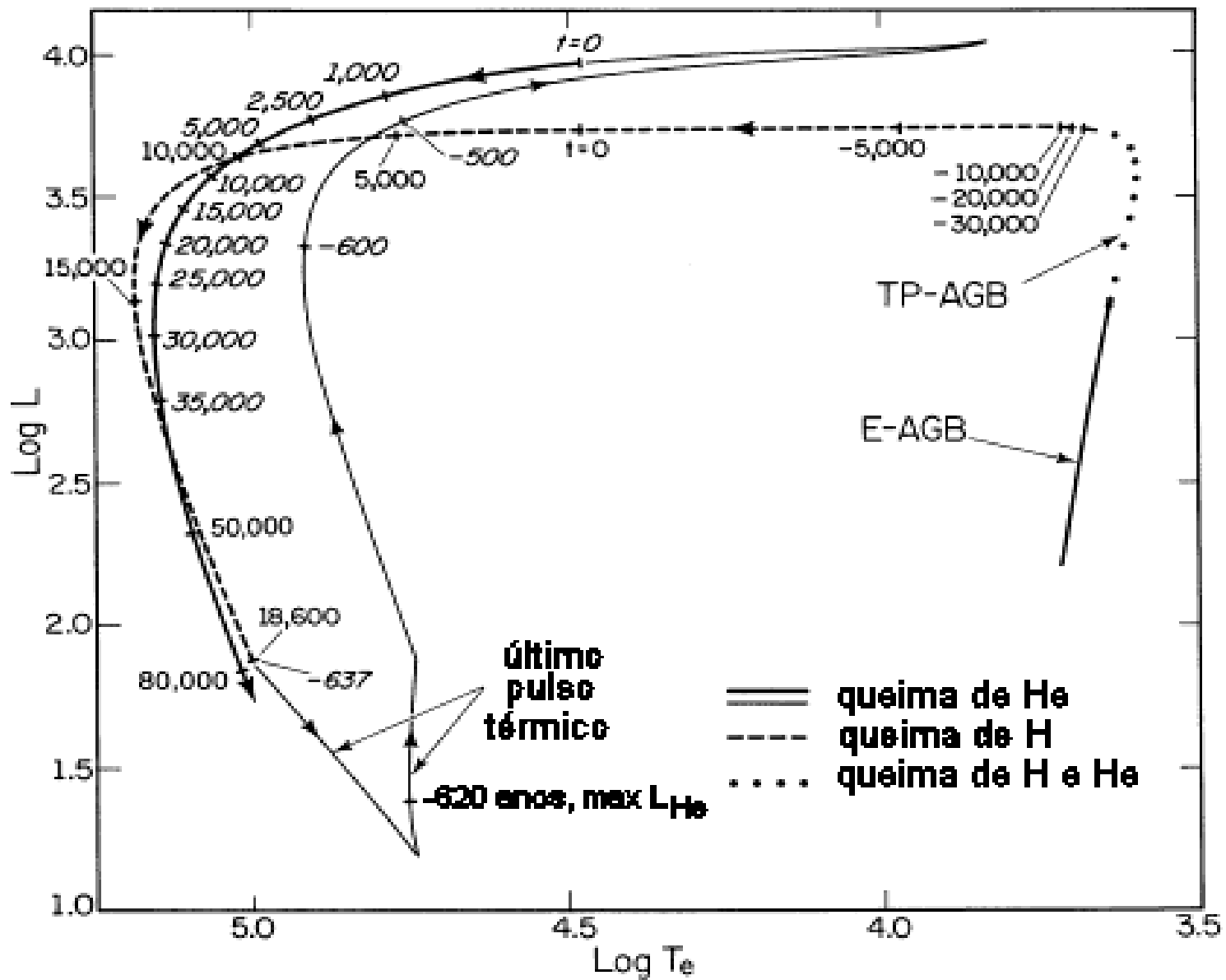


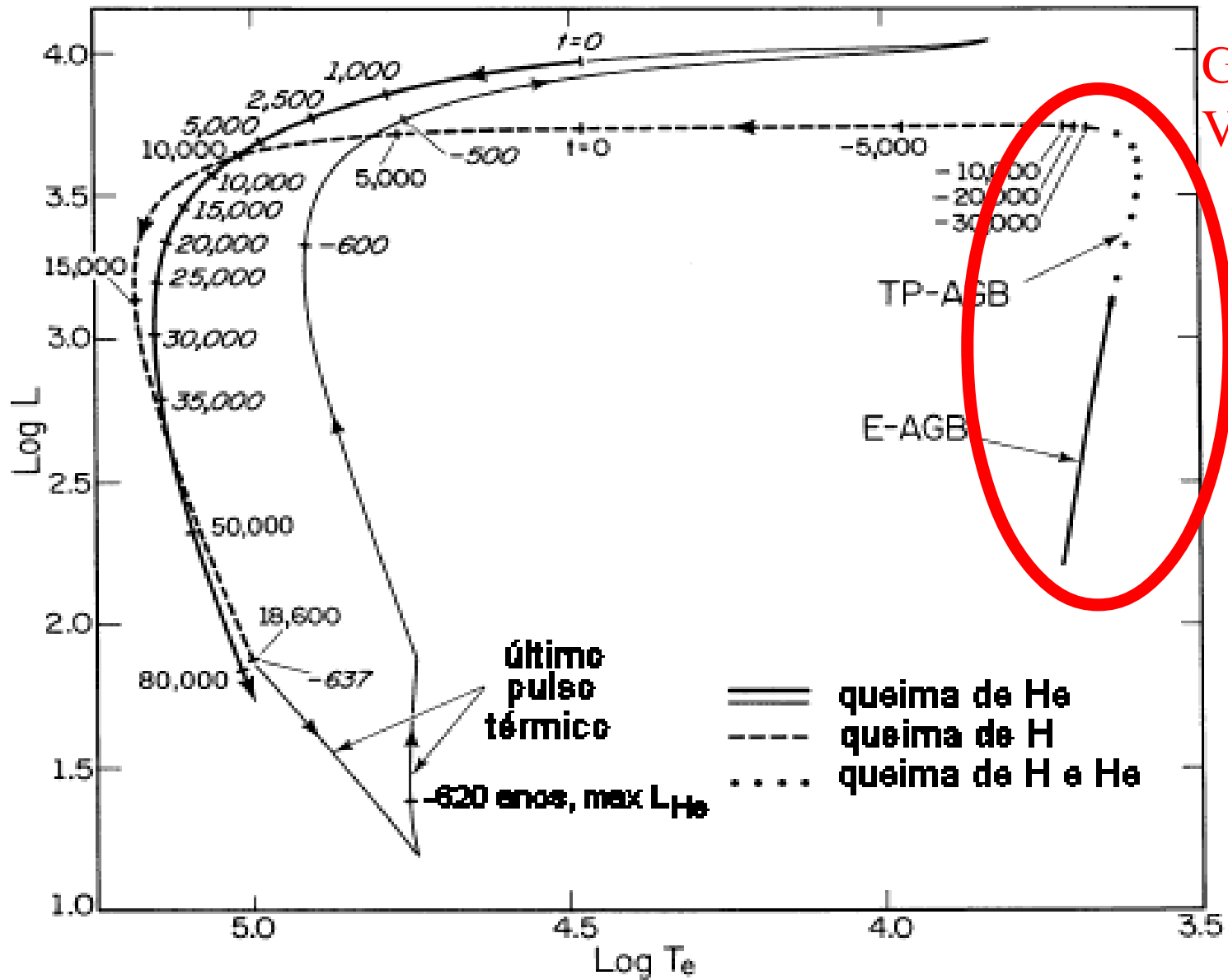


*Nebulosa Planetária: M57*

Núcleo da NP



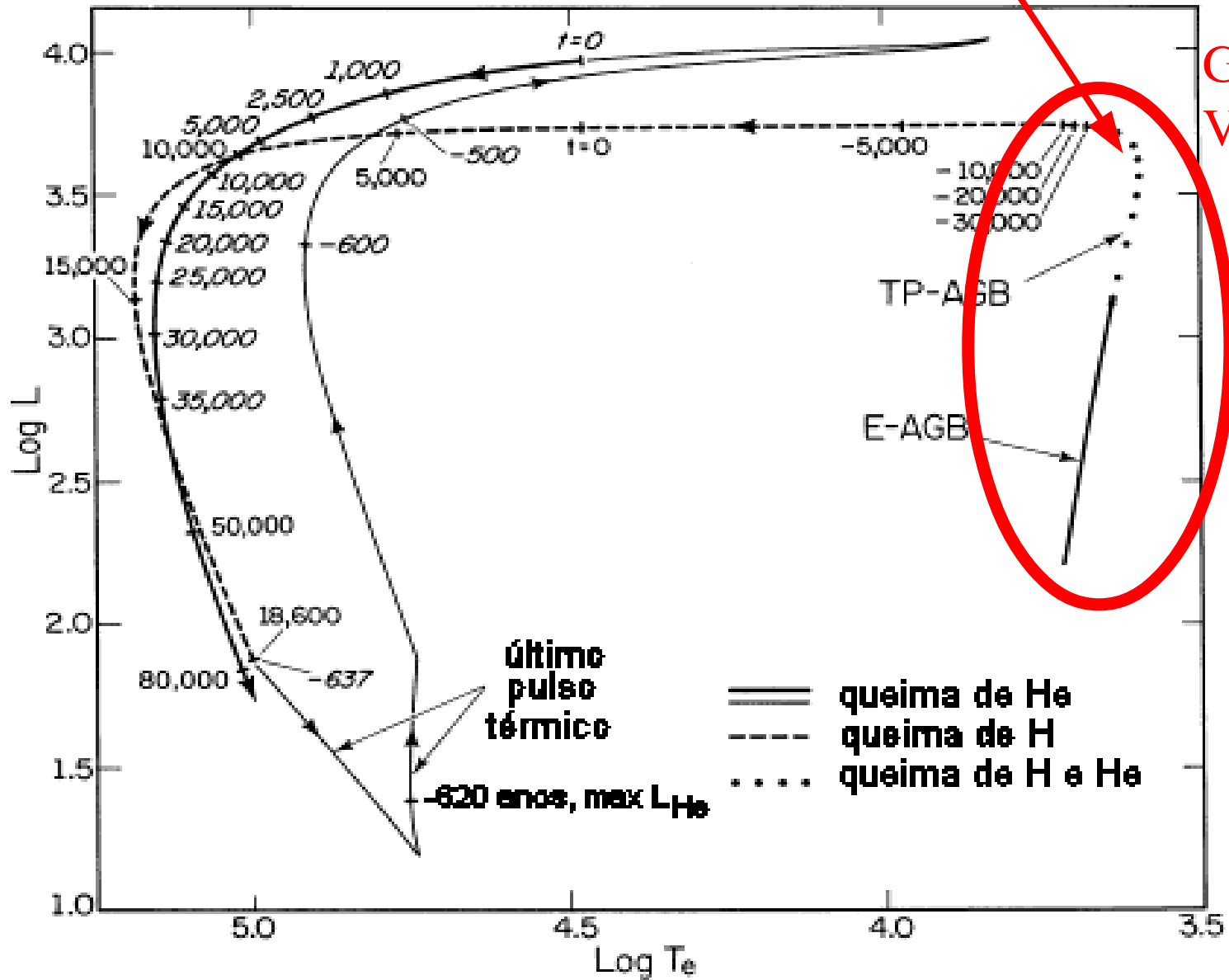




Gigantes  
Vermelhas

Ejeção da nebulosa

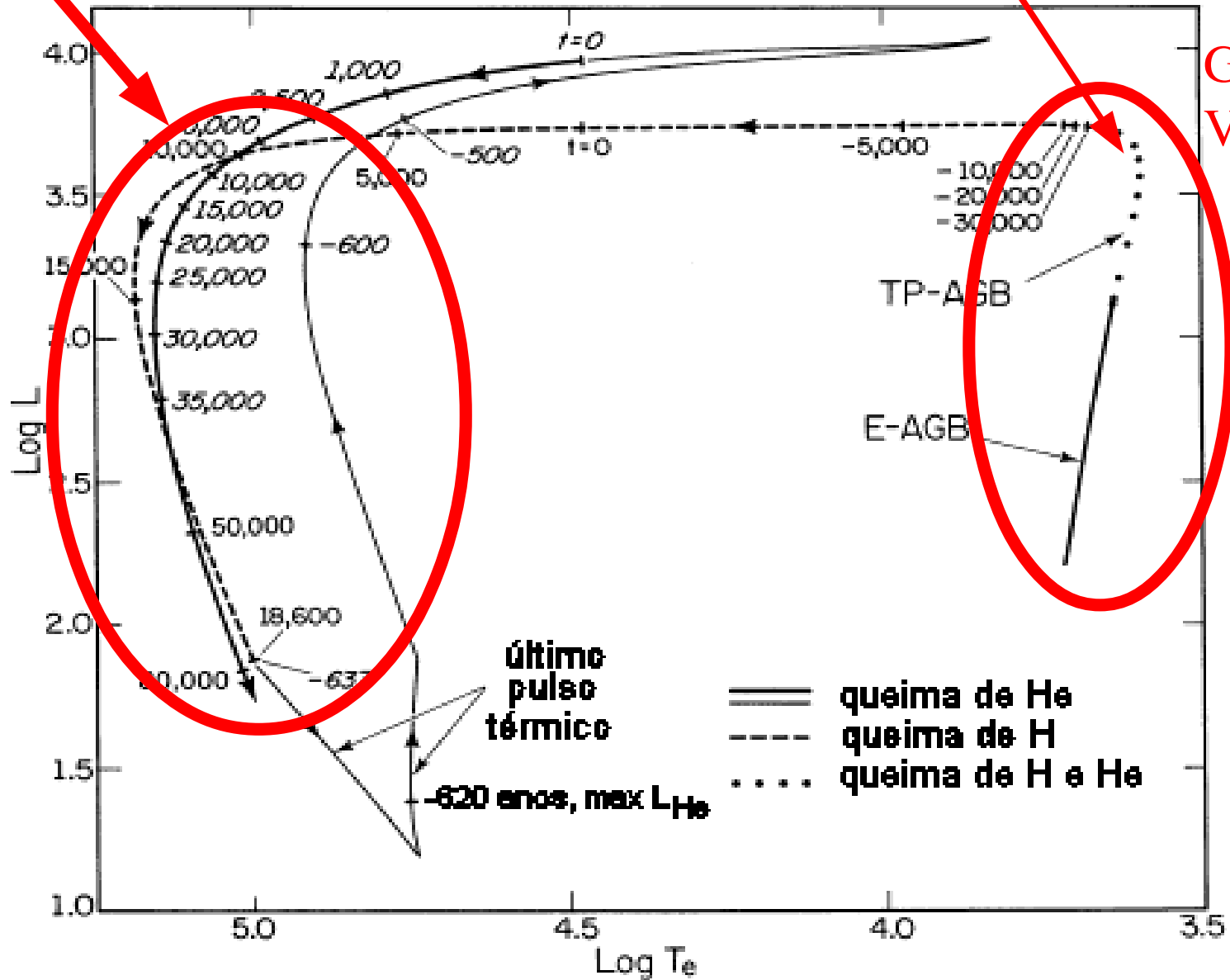
Gigantes  
Vermelhas



Nebulosa em expansão  
destacada da estrela

Ejeção da nebulosa

Gigantes  
Vermelhas



*Nebulosa Planetária NGC 6543*



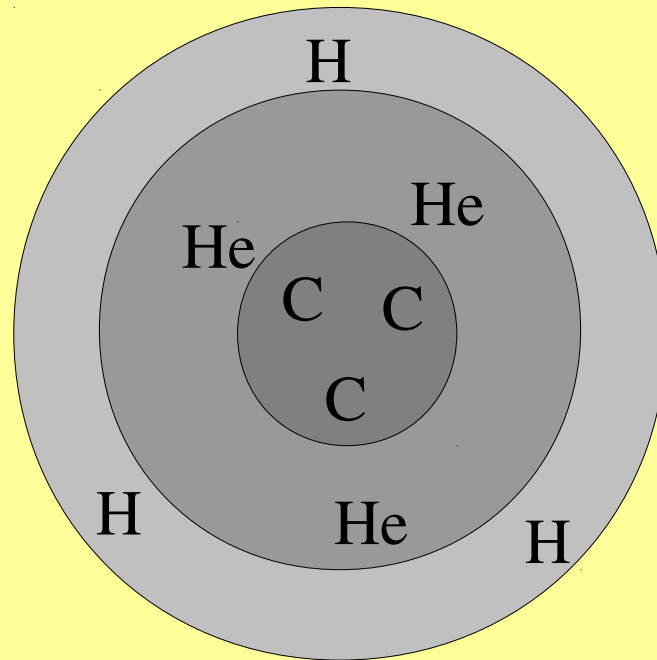
*Após algum tempo, esgota-se o combustível nuclear da estrela (H e He). Resta apenas uma esfera inerte de carbono e oxigênio, circundada por uma fina camada de He e/ou H.*

*A nebulosa é dispersa no espaço.*

*O objeto é então chamado de anã-branca.*



# *Estrutura de uma anã-branca*



**Temos portanto a sequência evolutiva:**

**Sequência Principal**

**Gigante Vermelha (1a. ascensão)**

**Ramo Horizontal**

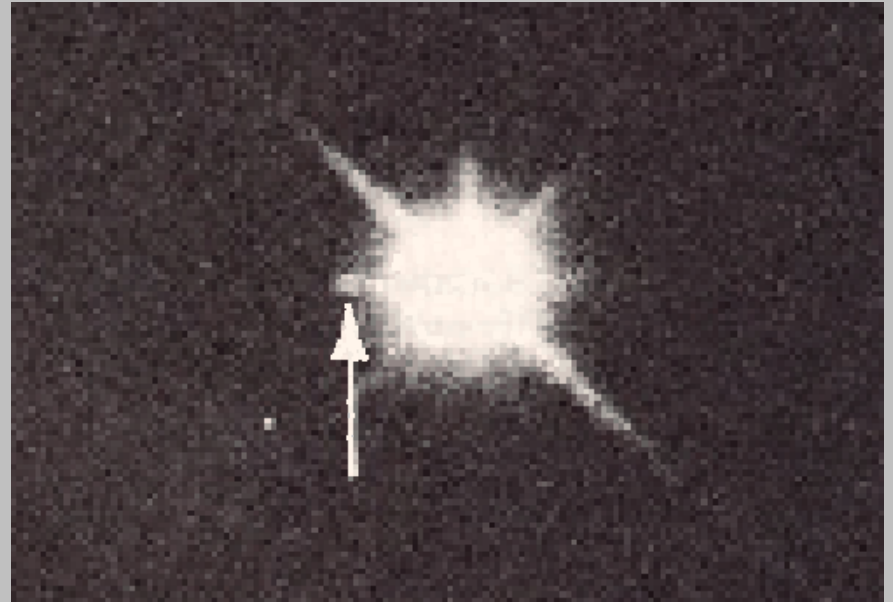
**Gigante Vermelha (2a. ascensão)**

**Ejeção da Nebulosa Planetária**

**Anã-branca**

# *Sirius B:* *a primeira anã-branca descoberta*

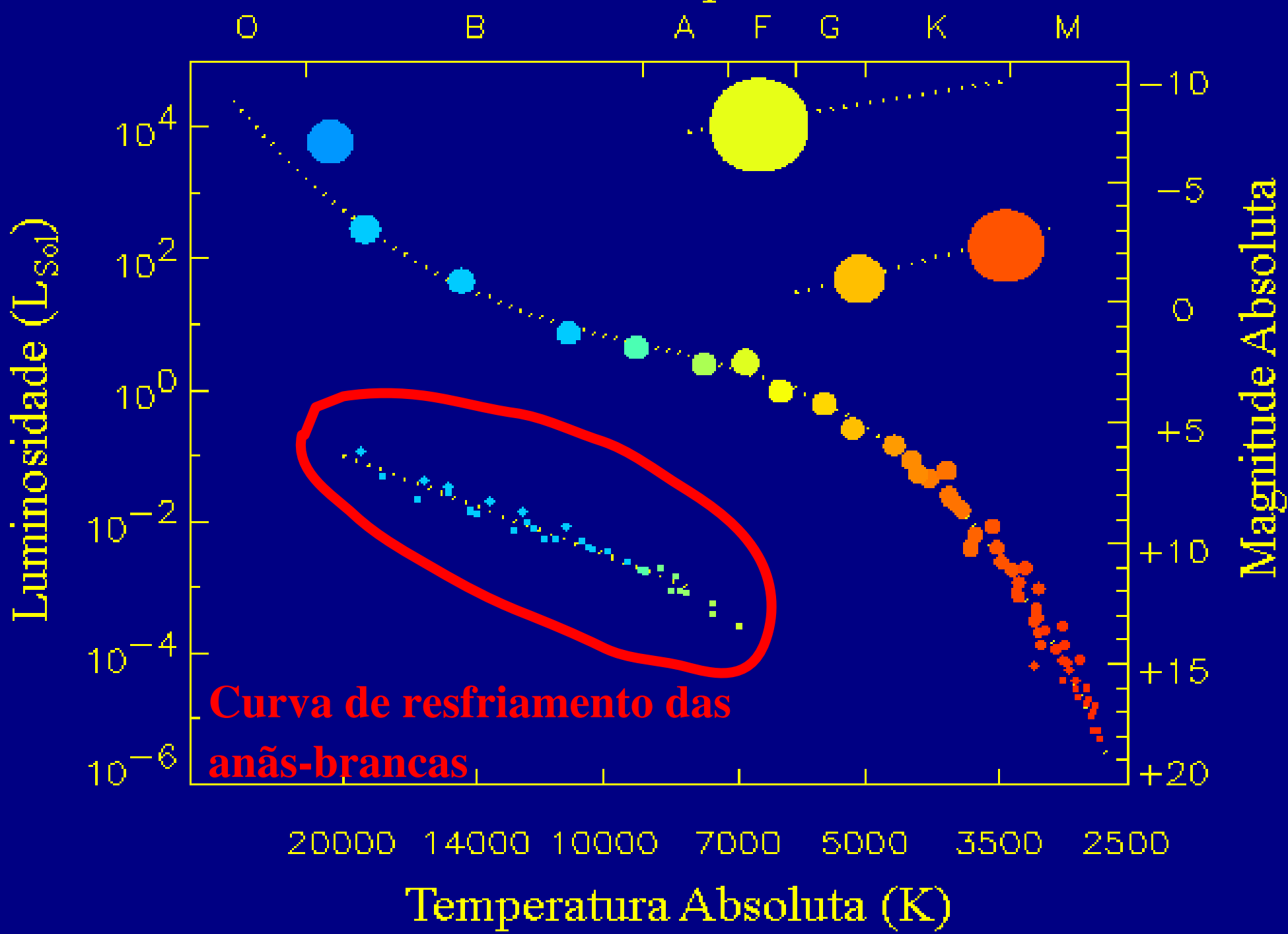
- *Em 1844 Friedrich Bessel observou que Sirius A tinha um movimento anômalo: sistema binário!*
- *Em 1862 Alvan Clark observou pela primeira vez Sirius B com seu telescópio de 45cm de diâmetro e suas observações mostraram que:*
- *$L(\text{Sirius B}) = 0,03 L_{sol}$*
- *$T(\text{Sirius B}) = 27000 K$*



$$L/L_{sol} = (R/R_{sol})^2 (T/T_{sol})^4$$

$$0,03 = (R/R_{sol})^2 (27000/5780)^4 \rightarrow R = 0,008 R_{sol}$$

# Classe Espectral



- *Estrutura*: praticamente todo o volume constitui-se de carbono acrescido de oxigenio, eventualmente recoberto com uma fina camada de H e/ou He
- Toda a energia irradiada provém do resfriamento
- *Raio* =  $5 - 6 \times 10^3$  km (raio da Terra)
- *Temperatura superficial* = 5000 ~80000 K
- *Massa* =  $0,5 - 1,4 M_{sol}$
- *Densidade* =  $3 \text{ ton/cm}^3$  (Sirius B)
- *Atualmente*: cerca de 30 000 anãs-brancas conhecidas

# Para saber mais...

- Texto do site: *Evolução de estrelas de massa baixa e intermediária* (R. Ortiz)
- À luz das estrelas (Lilia Arany-Prado): p.p. 97 – 119
- A Via-Láctea, Nossa ilha no Universo (Jacques Lépine); p.p. 73 – 80
- Astronomia & Astrofísica (Kepler & Saraiva); p.p. 181 – 194



