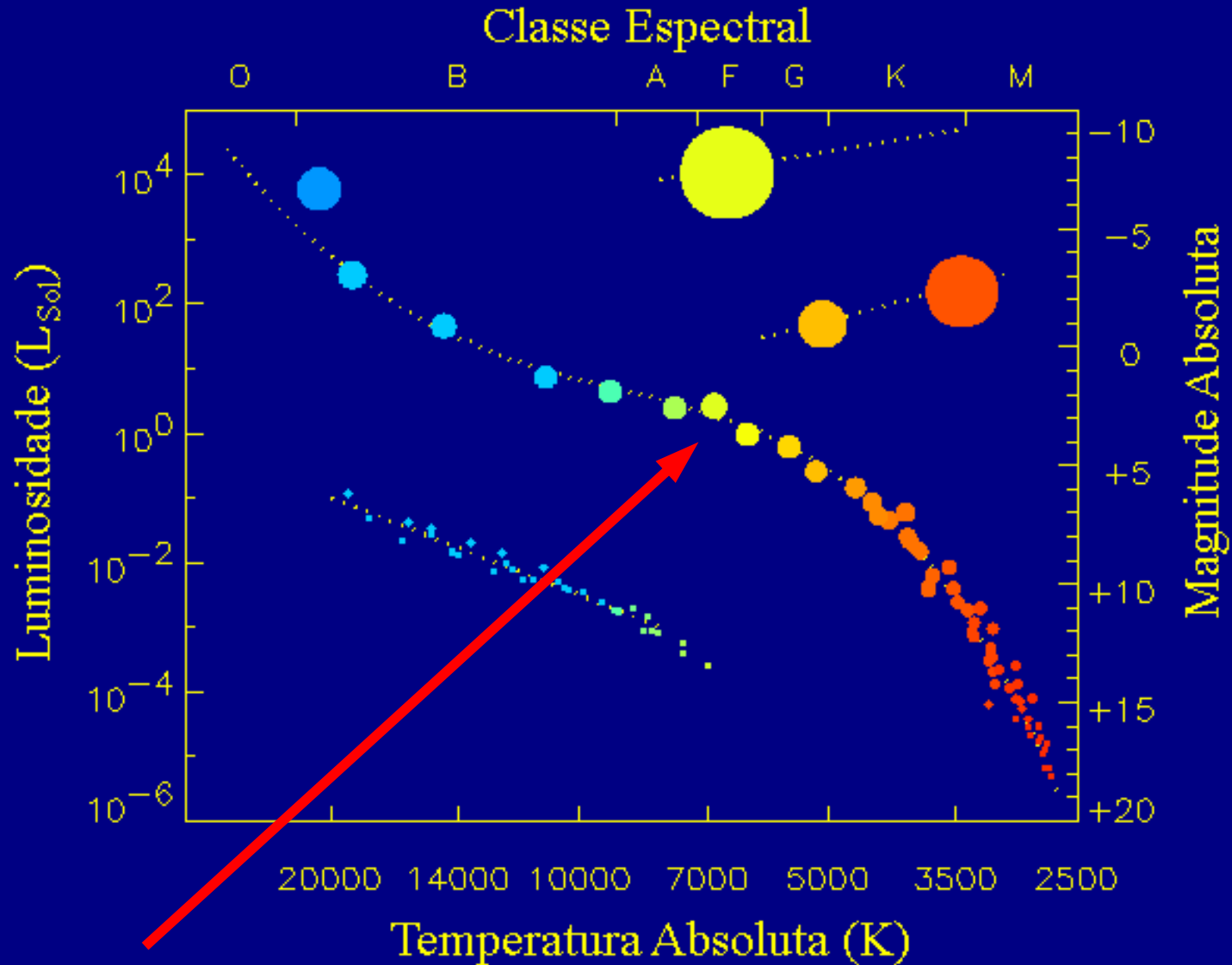


Evolução de estrelas de massa alta e baixa

Roberto Ortiz
EACH - USP

O Diagrama Hertzsprung-Russell (ou HR)



Sequência Principal

As estrelas permanecem na sequência principal enquanto tiverem H em seu núcleo, i.e. durante cerca de 90% do tempo de sua evolução.

Estudos teóricos mostram que a posição da estrela na sequência principal é determinada pela massa da estrela

Estrelas mais massivas possuem maior reserva de energia, porém sua luminosidade é muito maior, logo elas gastam sua energia mais rapidamente.

Massas na sequência principal
(valores em M_*/M_{Sol})

O8V – 23

B0V – 13

A0V – 2,4

F0V – 1,6

G0V – 1,1

K0V – 0,8

M0V – 0,5

Estrelas de alta massa (tipos *O5* → *B2*)

Tempo de permanência na sequência principal

(massa em valores solares, tempo em anos, Schaller et al., 1992, A&AS, 96, 269)

$$120 - 2,5 \times 10^6$$

$$85 - 2,8 \times 10^6$$

$$60 - 3,4 \times 10^6$$

$$40 - 4,3 \times 10^6$$

$$25 - 6,4 \times 10^6$$

$$20 - 8,1 \times 10^6$$

$$15 - 1,1 \times 10^7$$

$$12 - 1,6 \times 10^7$$

$$9 - 2,6 \times 10^7$$

Tempo de permanência na sequência principal

(massa em valores solares, tipos espectrais, e tempo em anos

Schaller et al., 1992, A&AS, 96, 269)

$$7,0 (B3) - 4,3 \times 10^7$$

$$5,0 (B5) - 9,4 \times 10^7$$

$$4,0 (B6) - 1,6 \times 10^8$$

$$3,0 (B7) - 3,5 \times 10^8$$

$$2,5 (A0) - 5,8 \times 10^8$$

$$2,0 (A4) - 1,1 \times 10^9$$

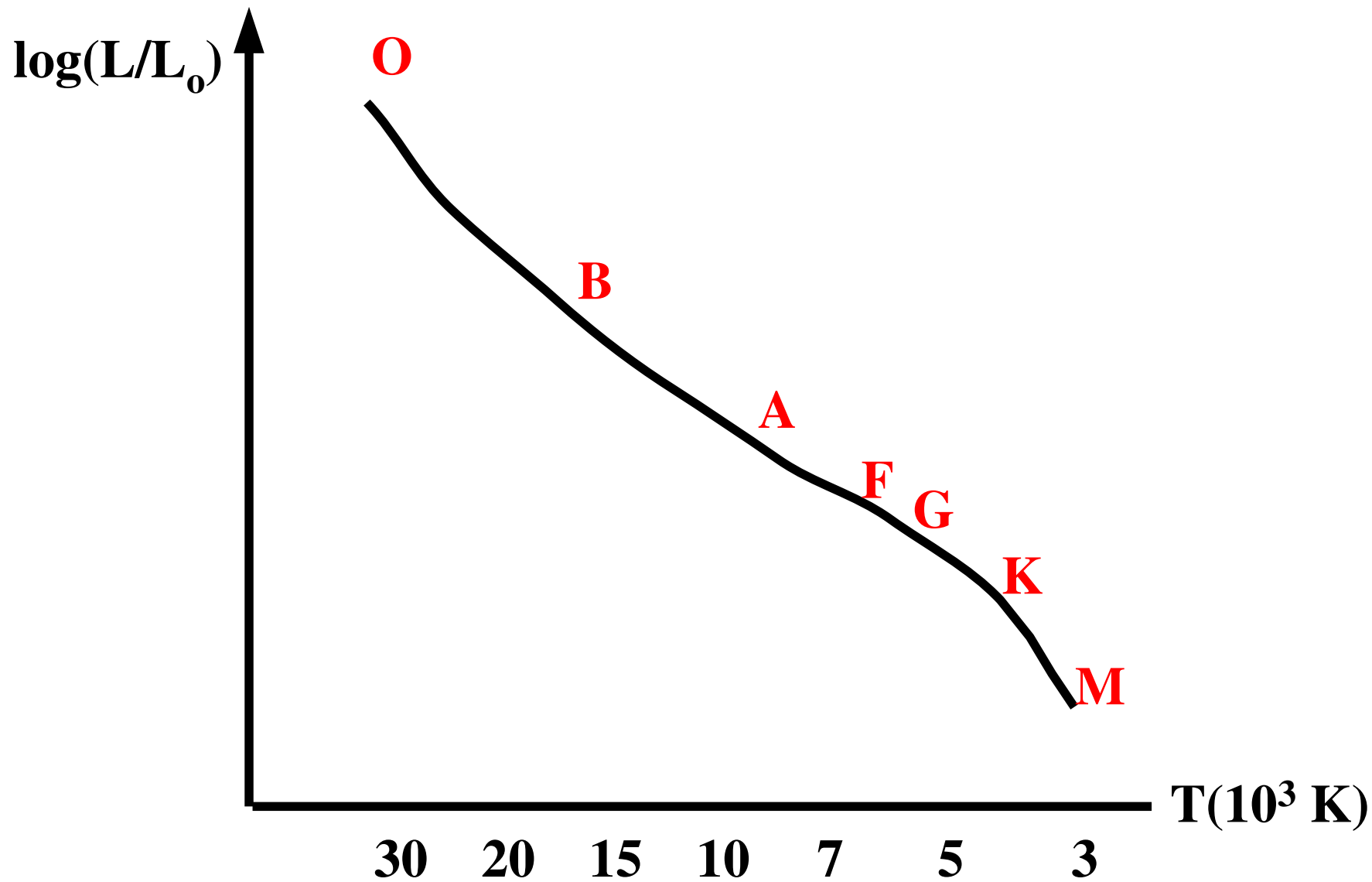
$$1,5 (F1) - 2,7 \times 10^9$$

$$1,25 (F7) - 4,9 \times 10^9$$

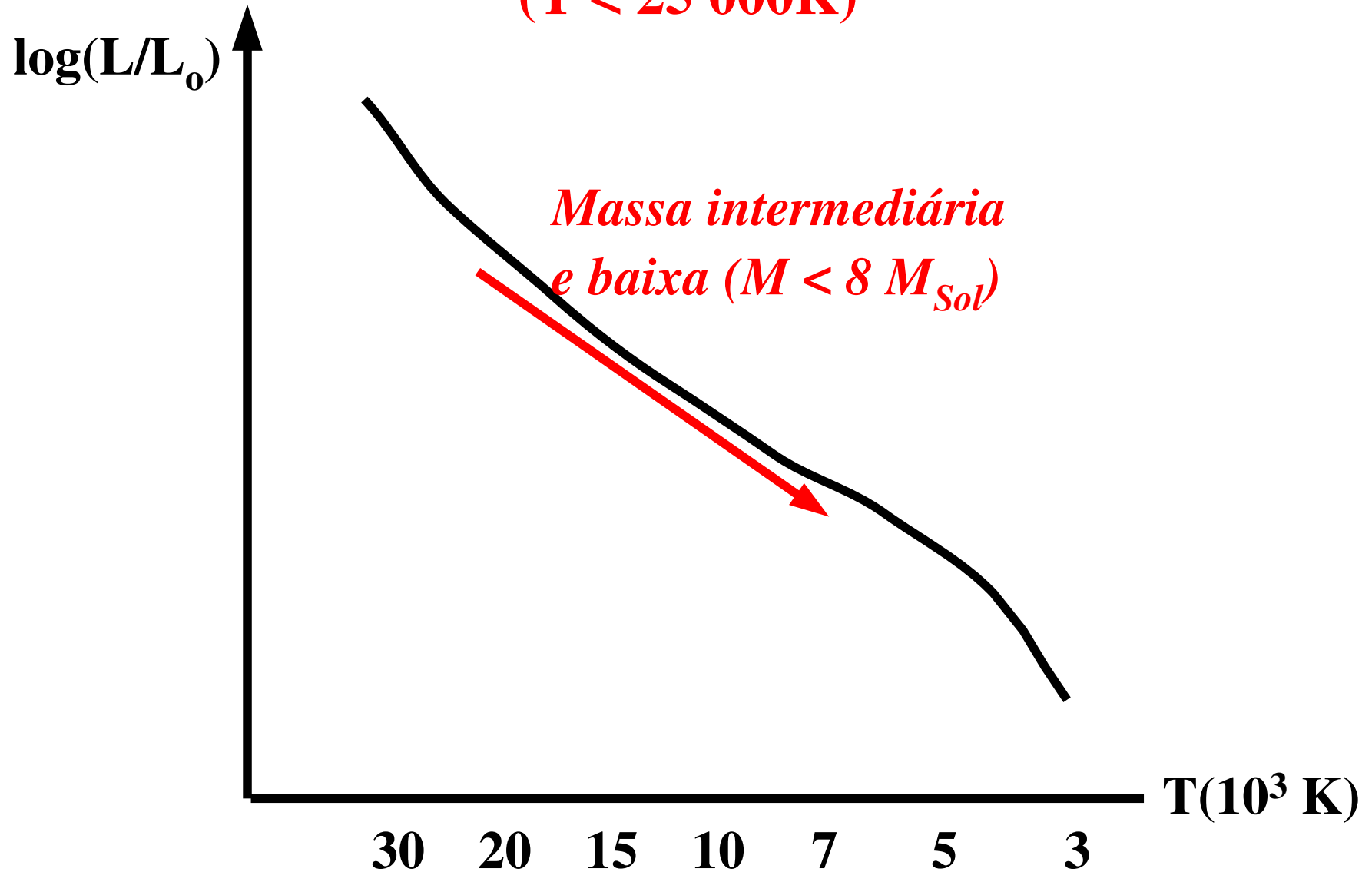
$$1,0 (G2) - 9,8 \times 10^9$$

$$0,9 (G8) - 9,4 \times 10^9$$

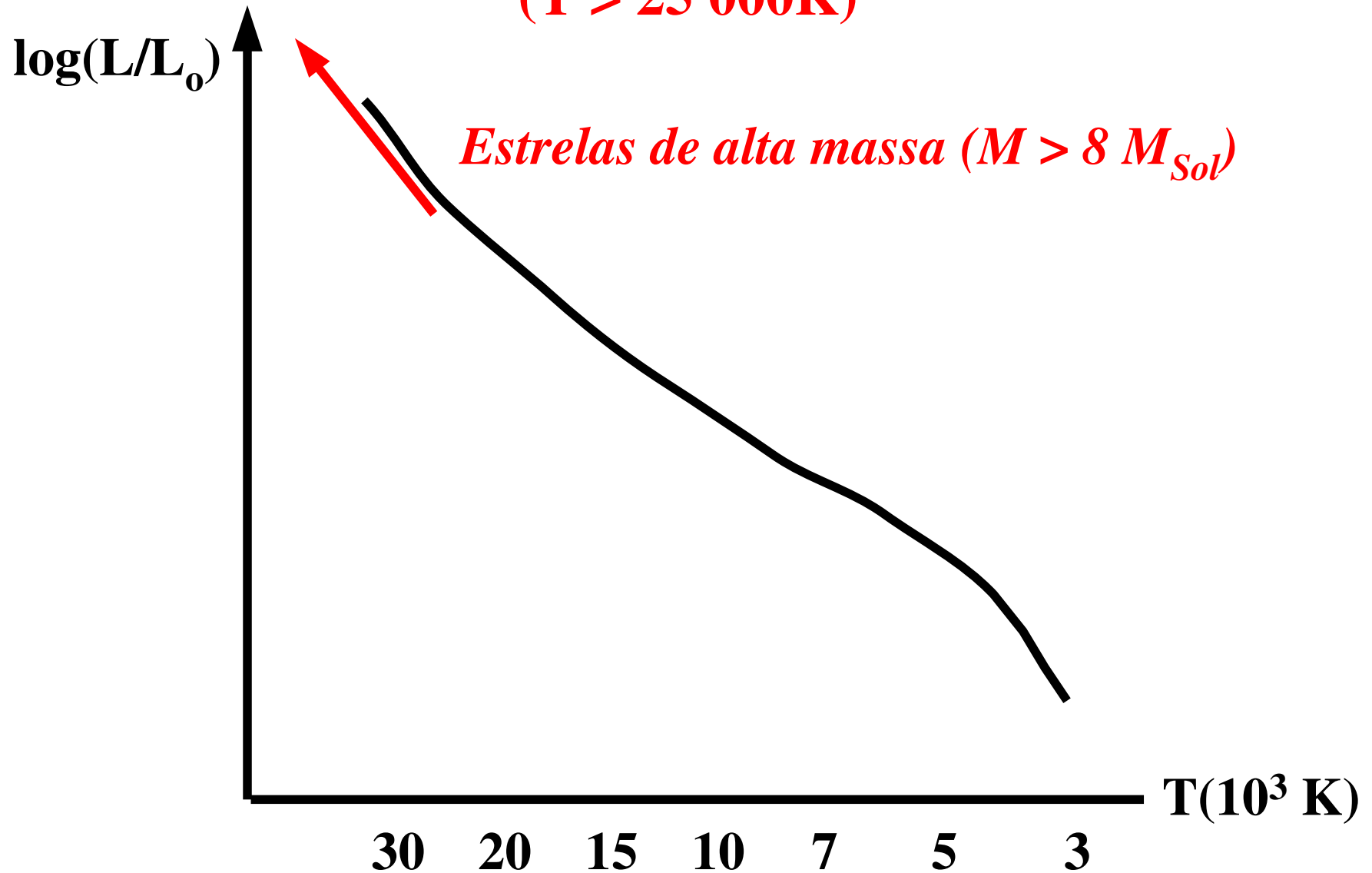
$$0,8 (K1) - 1,5 \times 10^{10}$$



**Estrelas de tipo espectral B2V ou posterior
($T < 25\,000\text{K}$)**



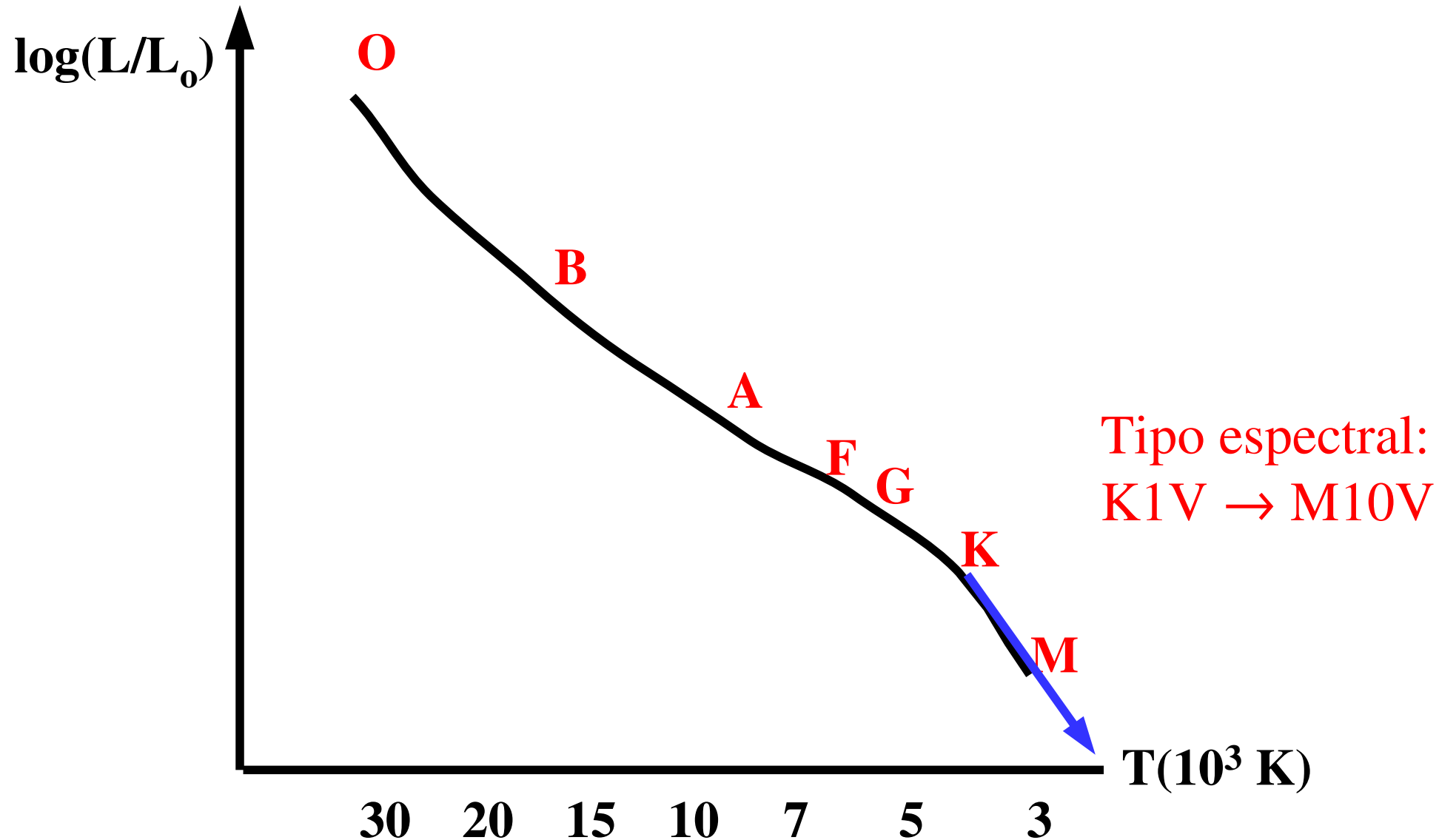
**Estrelas de tipo espectral B2V ou anterior
($T > 25\,000\text{K}$)**



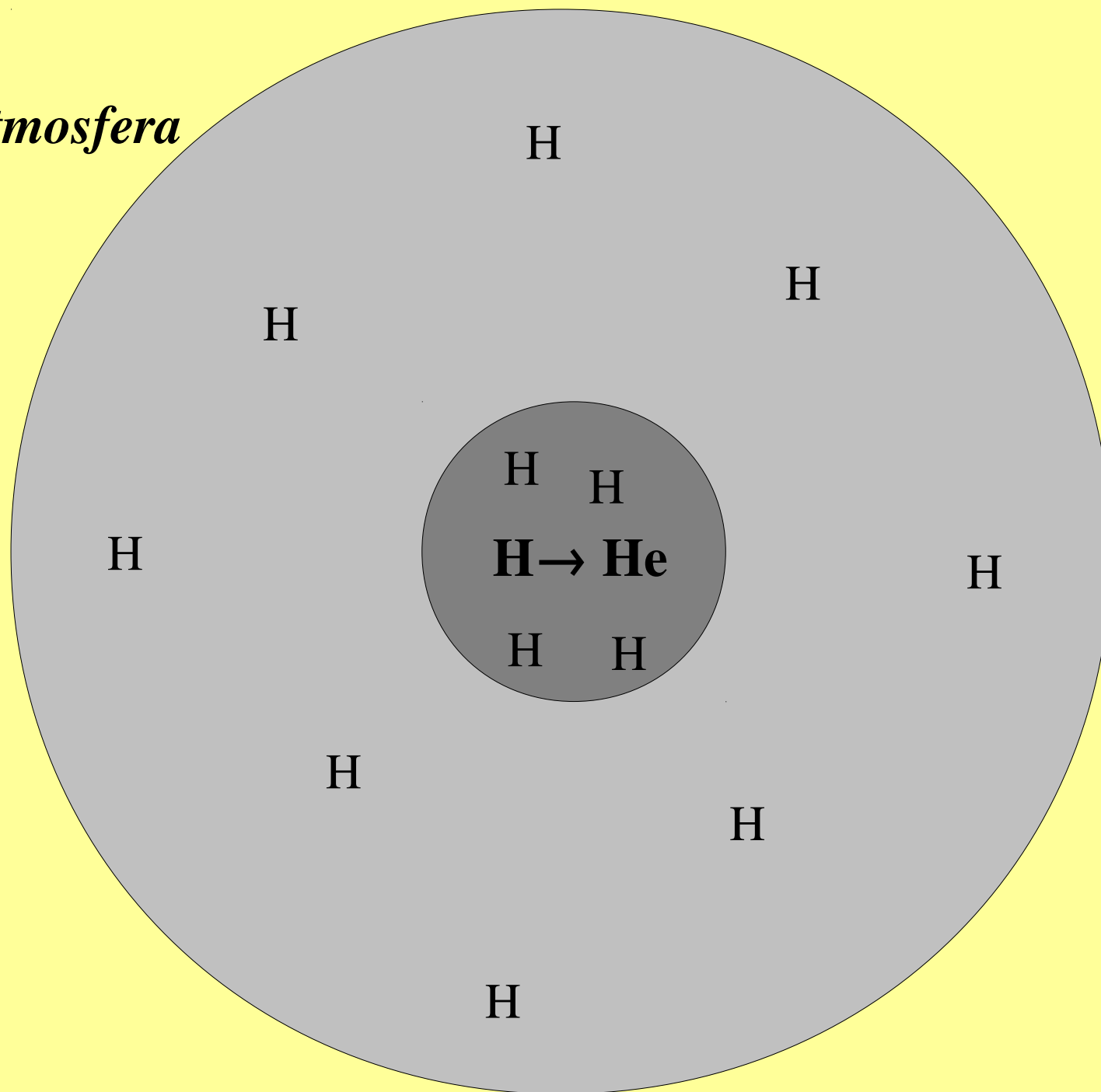
Evolução de estrelas de baixa massa:

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

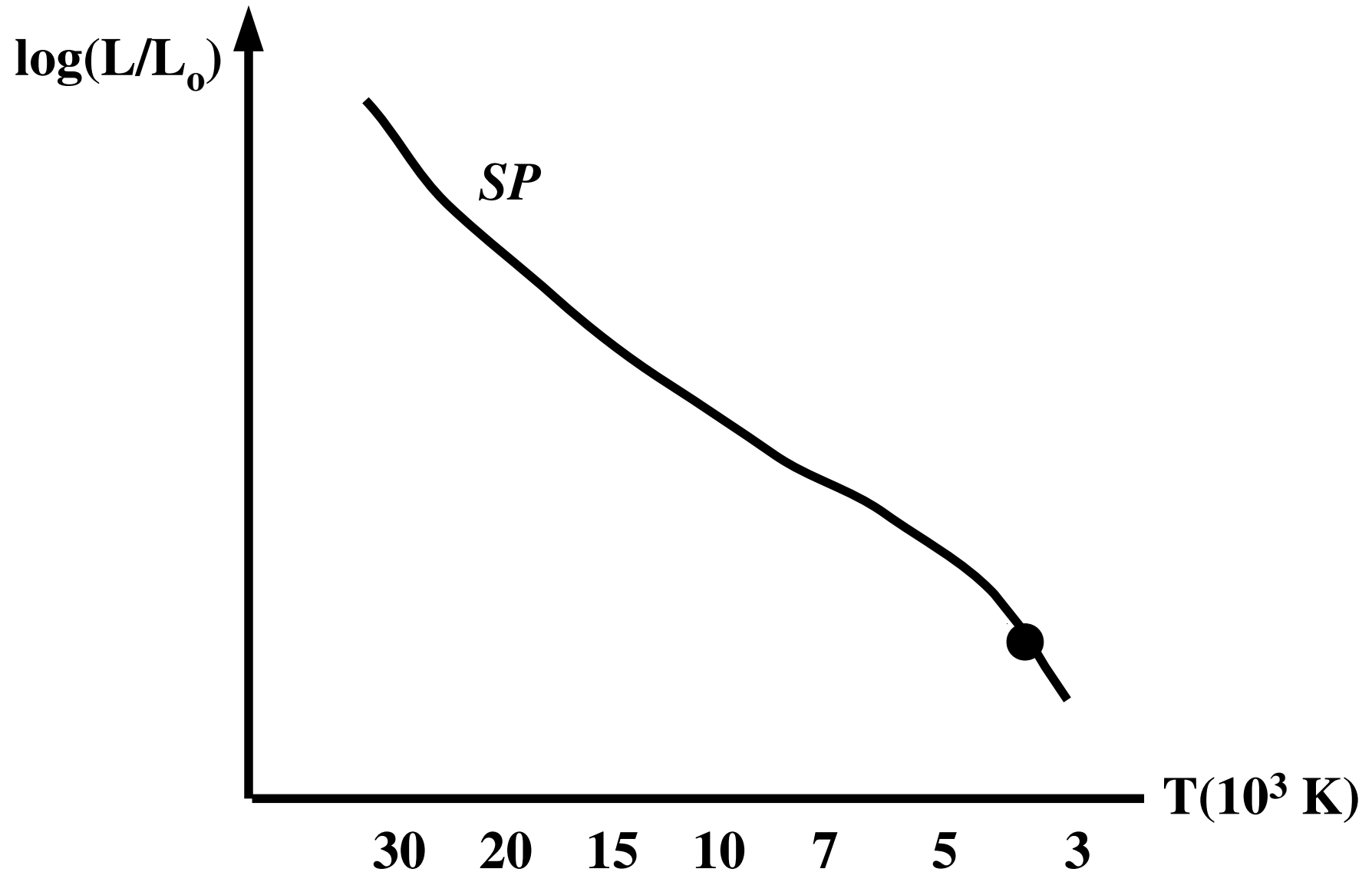
Estrelas de baixa massa na sequência principal



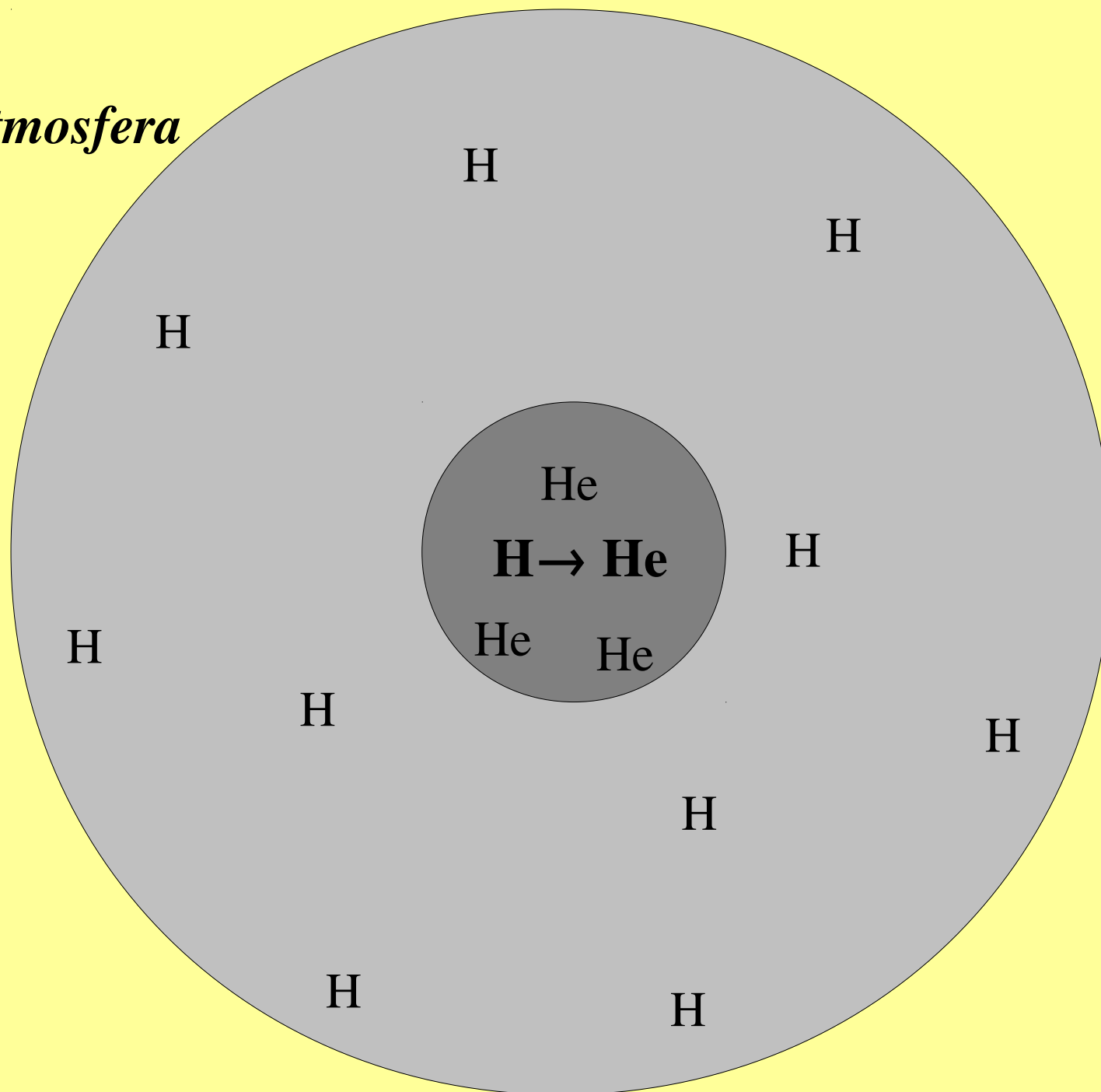
Atmosfera



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

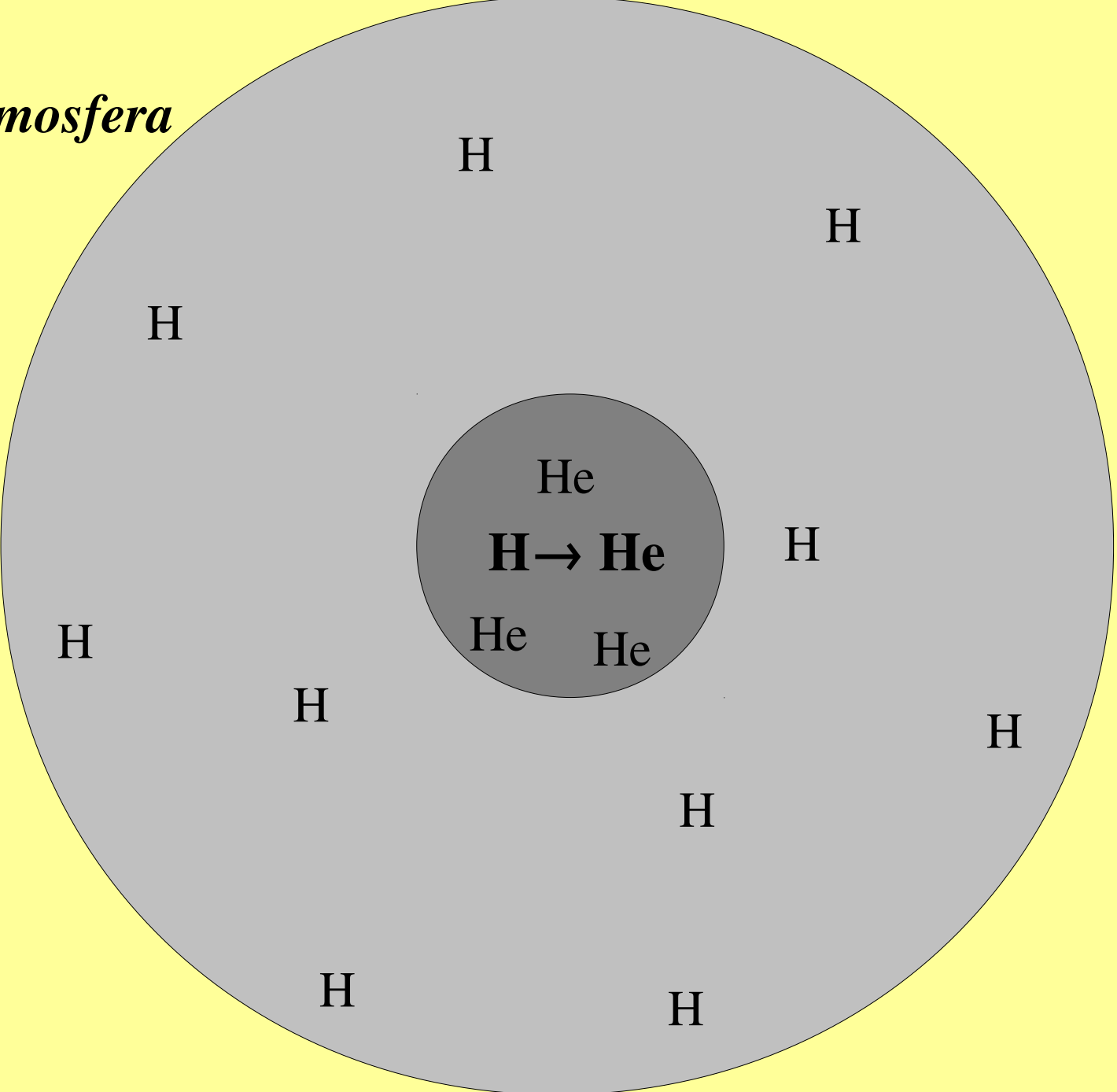
H

H

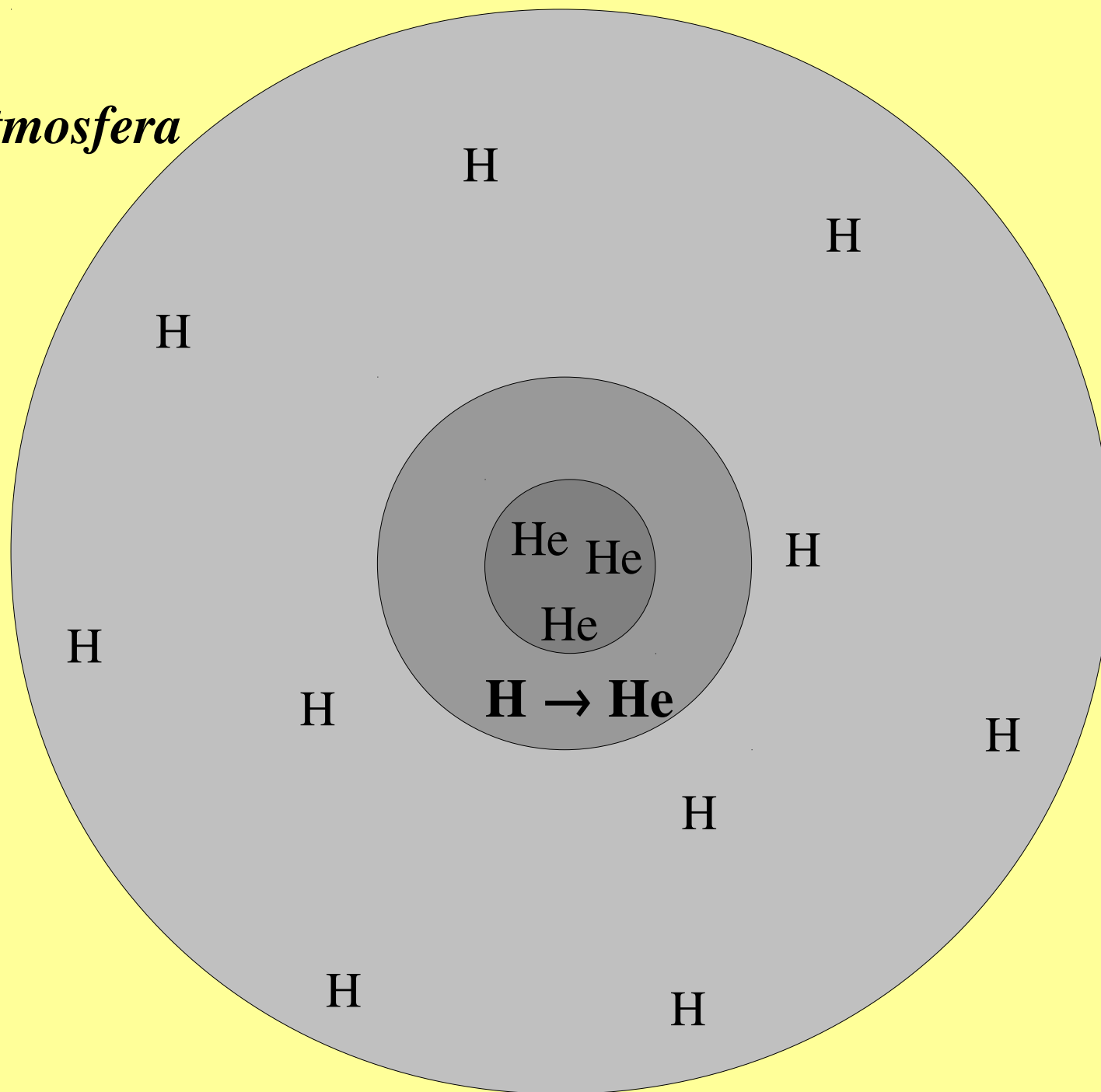
H

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

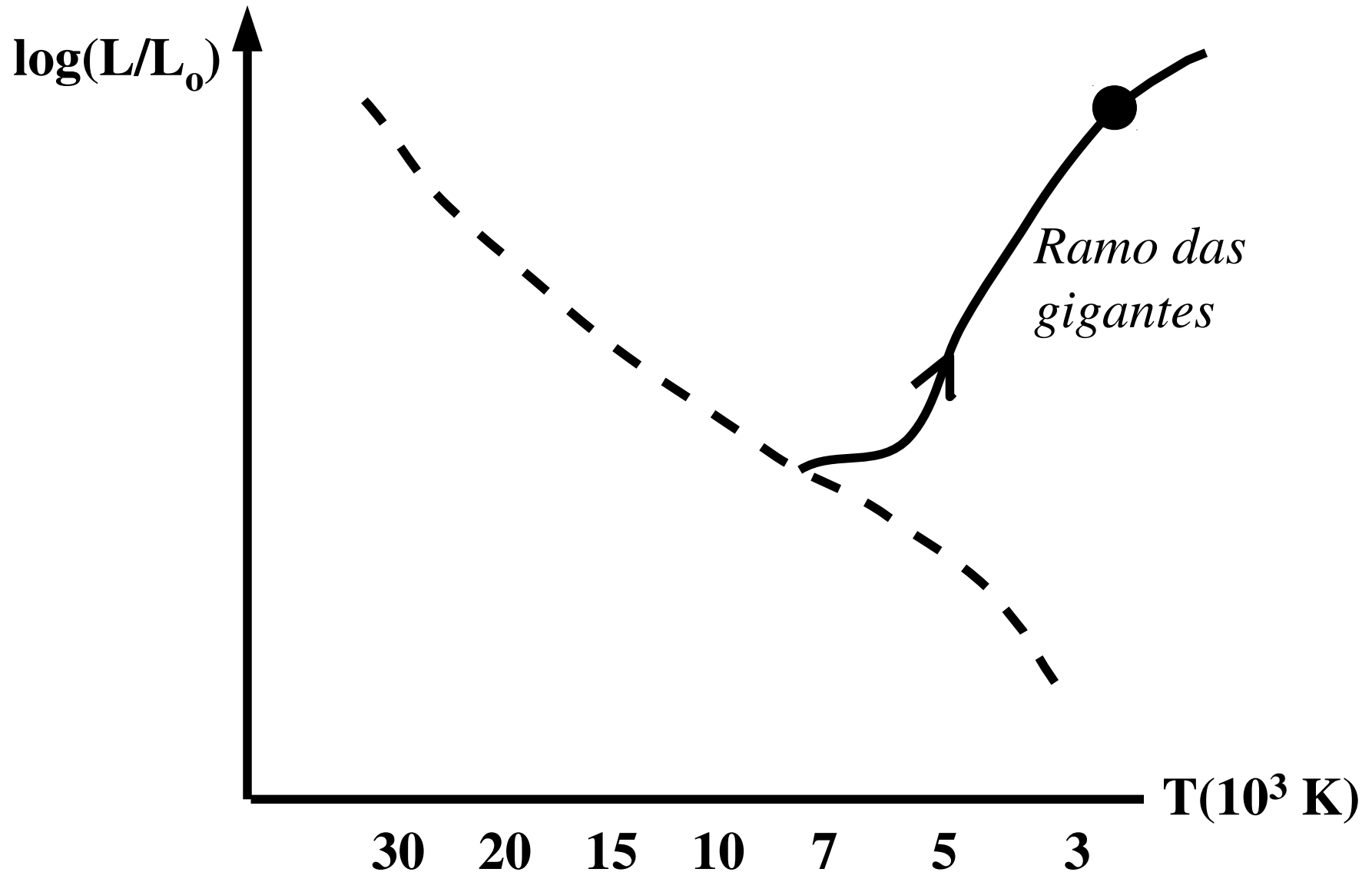
Atmosfera



Atmosfera



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



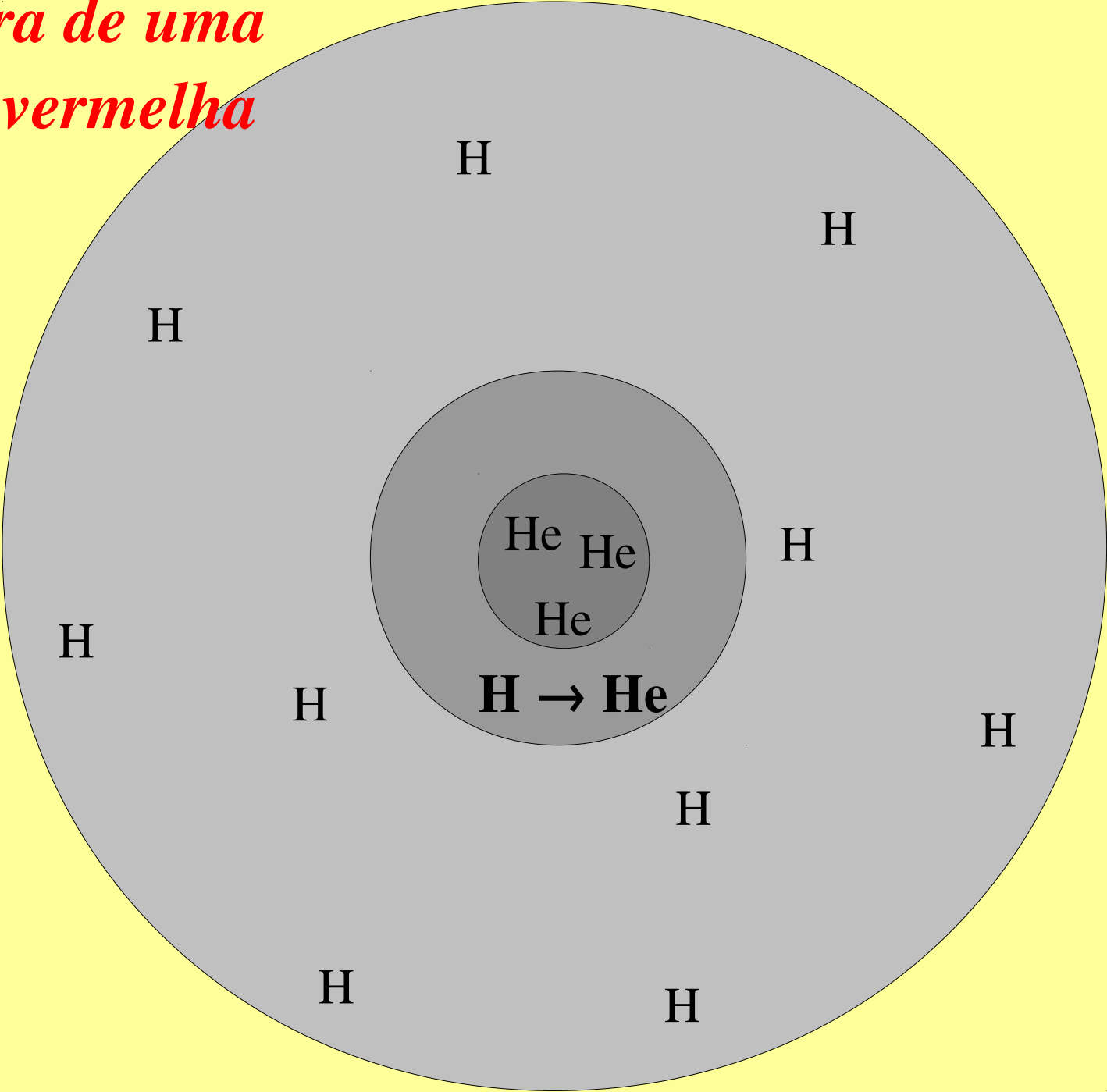
A produção de energia passa a ocorrer numa camada em torno do núcleo, onde Hidrogênio é convertido em Hélio.

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

Estrutura de uma gigante vermelha

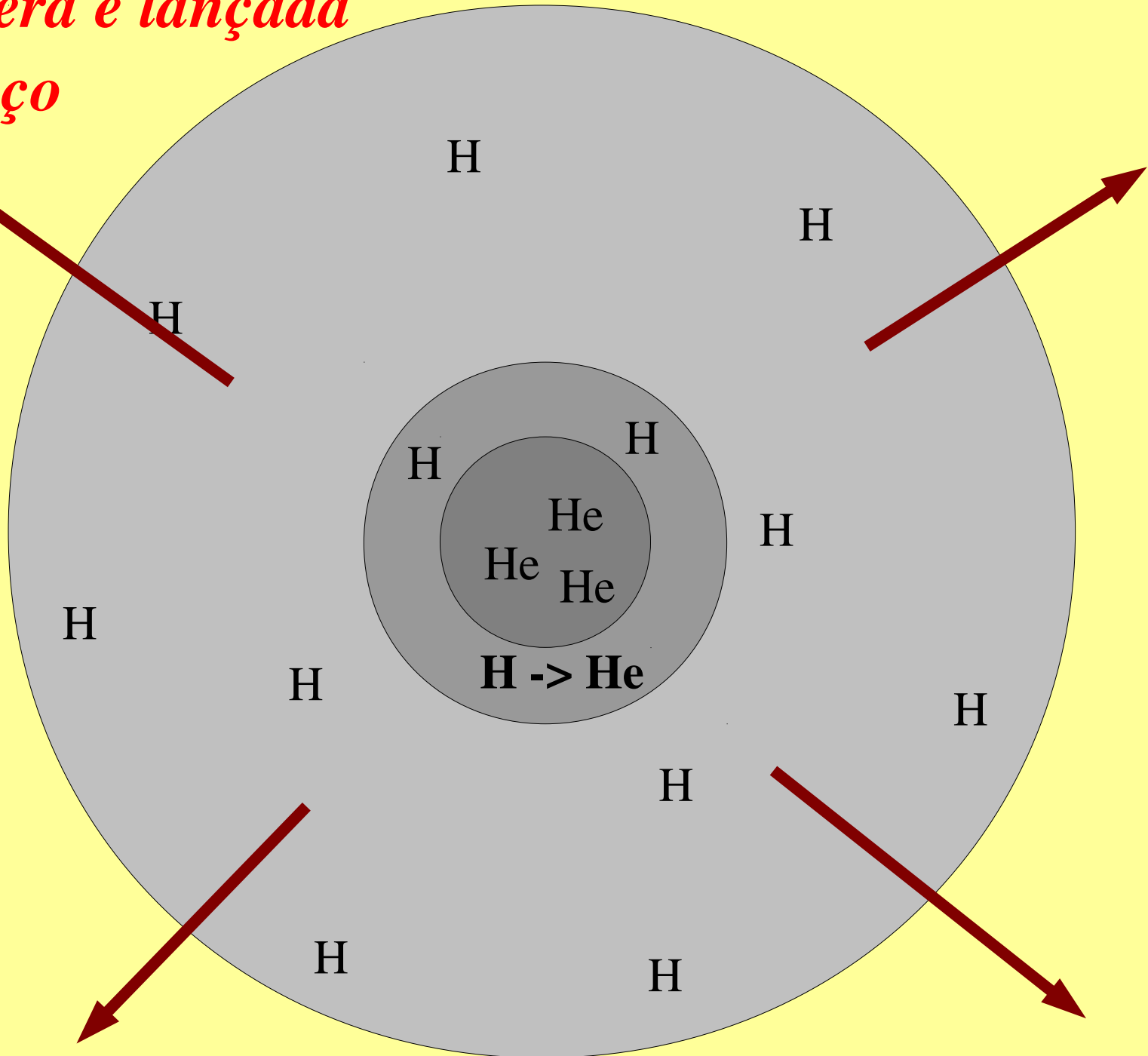


O aumento da luminosidade e a baixa gravidade na atmosfera da estrela favorecem o aumento da perda de massa.

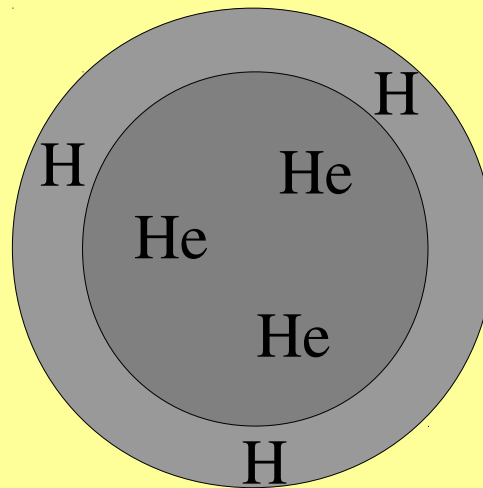
A pressão das camadas exteriores sobre o núcleo da estrela não é suficiente para elevar a temperatura e pressão no núcleo da estrela, necessária para iniciar a fusão do He.

A estrela segue convertendo H em He em uma camada em torno do núcleo até que toda a atmosfera da estrela seja lançada ao espaço.

*Atmosfera é lançada
ao espaço*



Formação de uma anã-branca de Hélio



O tempo de evolução de uma estrela de baixa massa é superior à idade do Universo

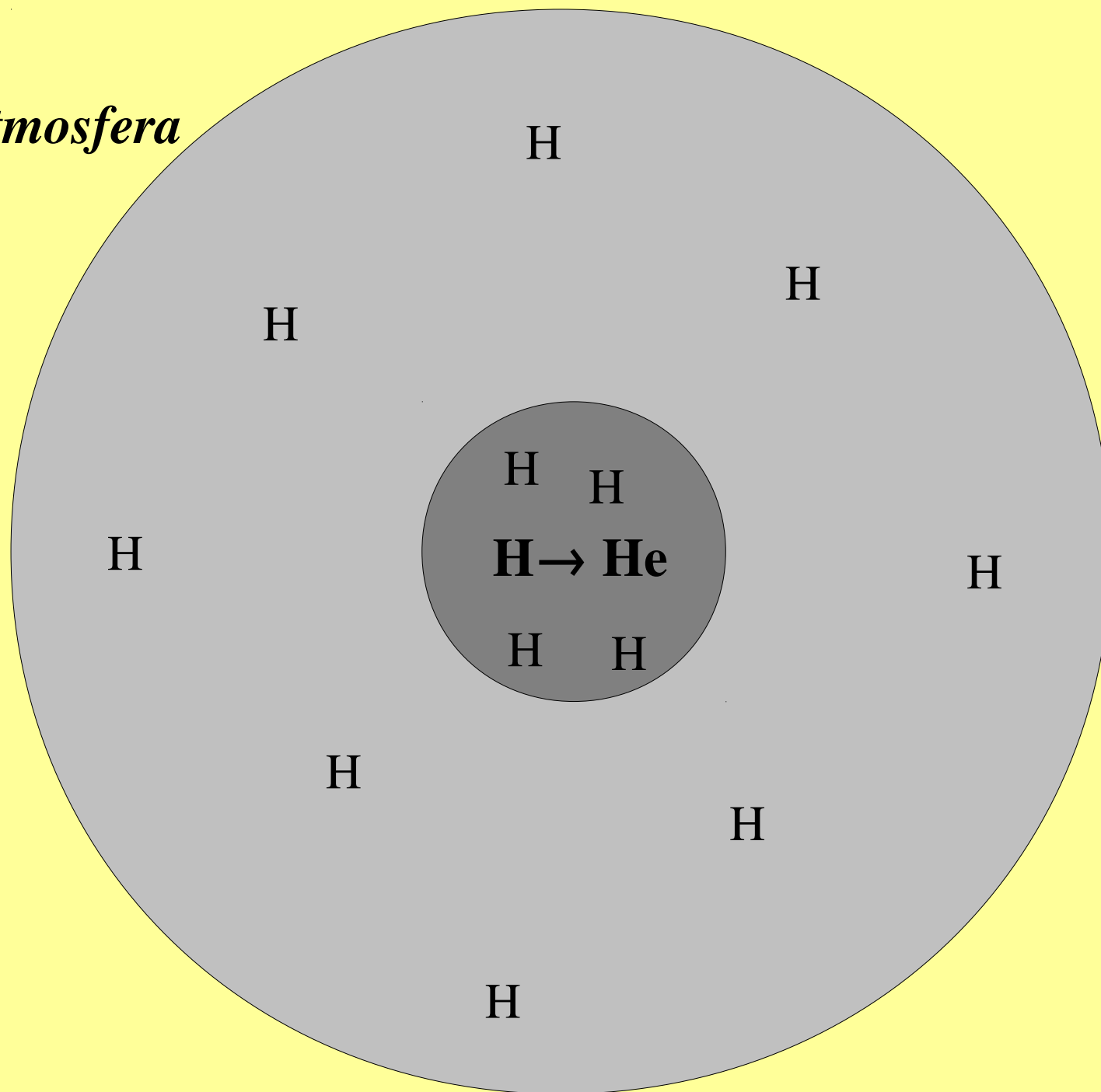
As nebulosas planetárias que são observadas correspondem portanto a estrelas de massa intermediária, i.e. $0,8 < M_/M_{Sol} < 8,0$*

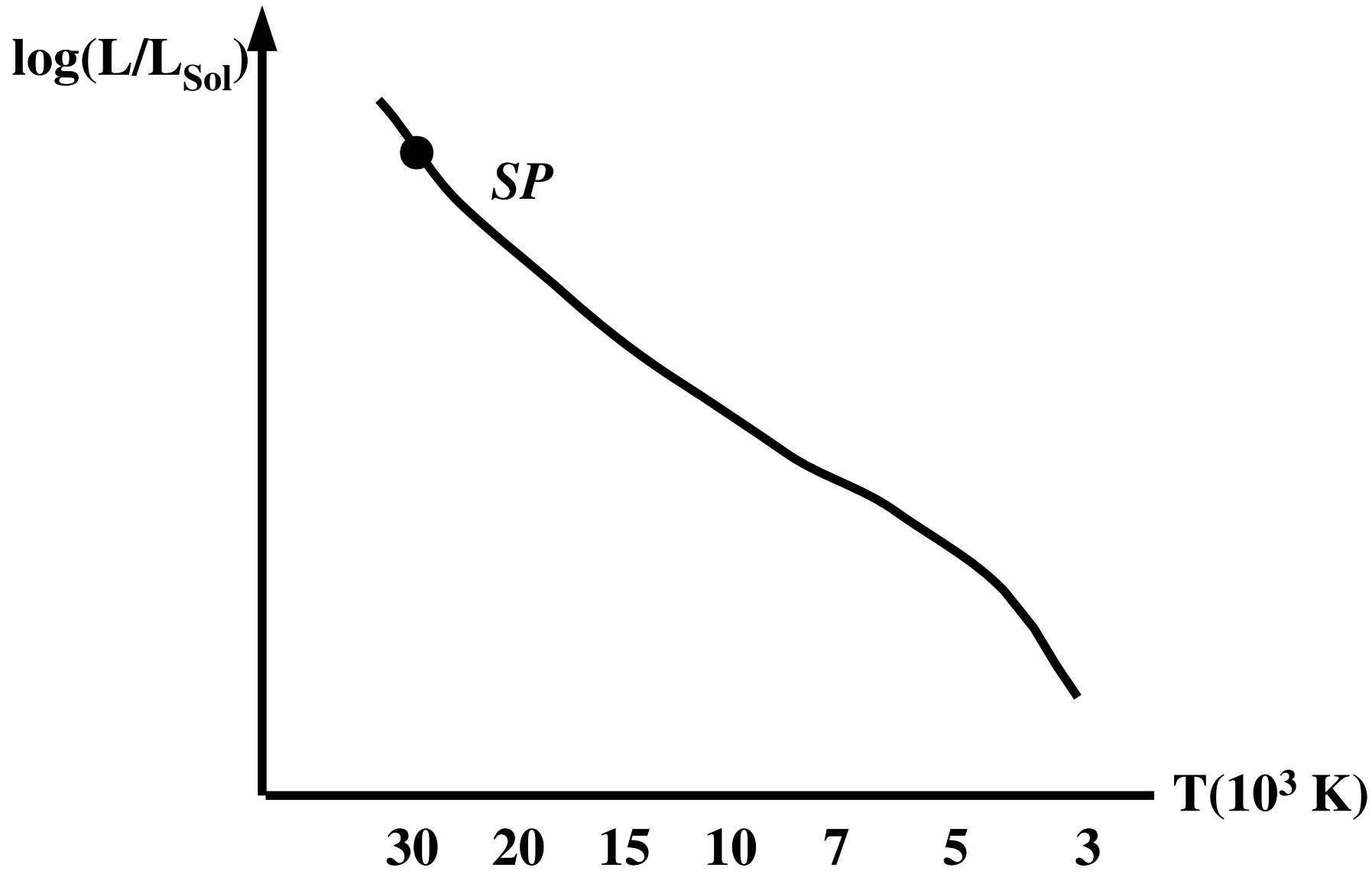
Estrelas de baixa massa possivelmente desenvolverão uma nebulosa ao seu redor, possivelmente mais discreta: menor massa ionizada.

Evolução de estrelas de alta massa:

$$M_*/M_{Sol} > 8,0$$

Atmosfera



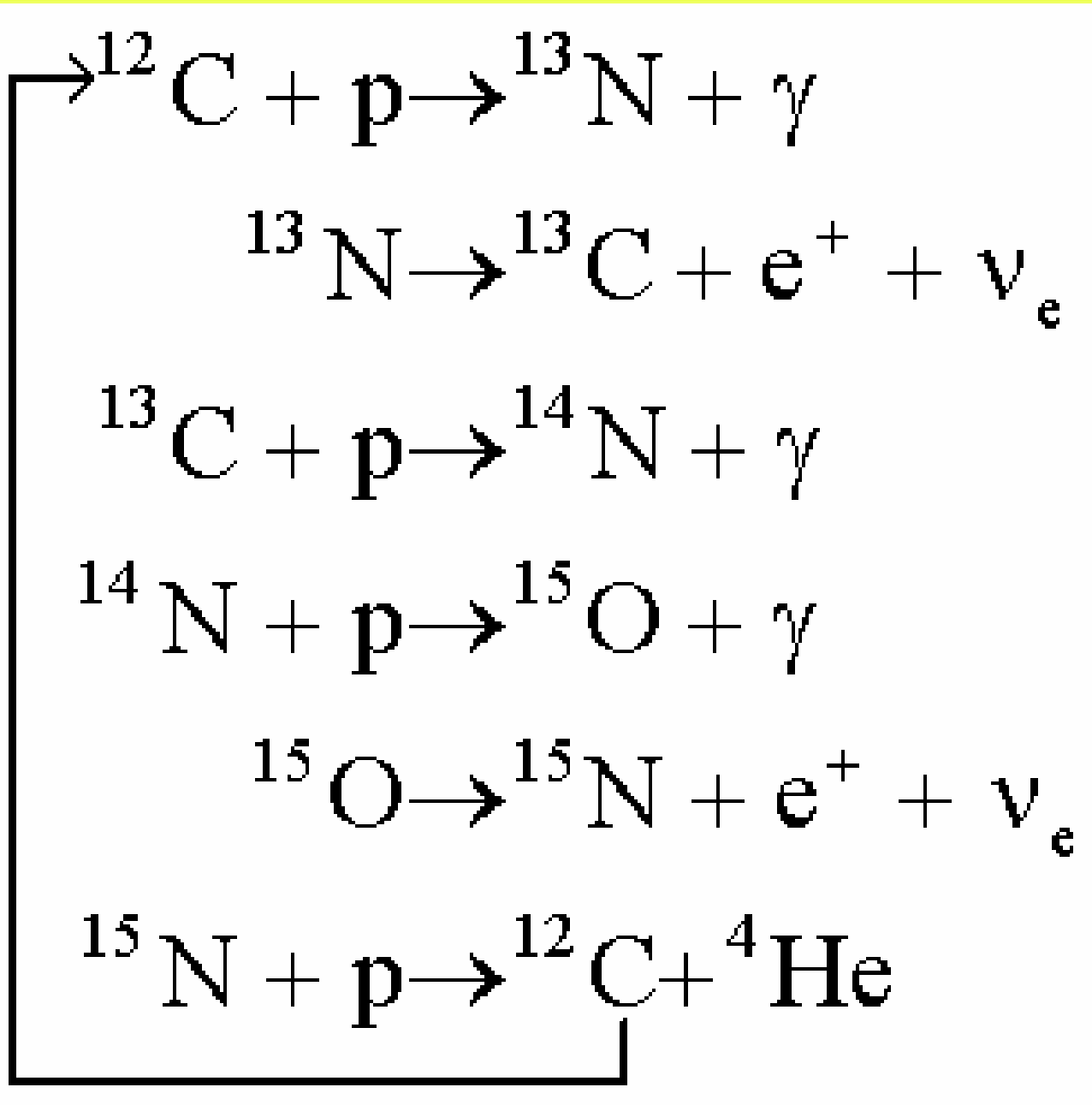
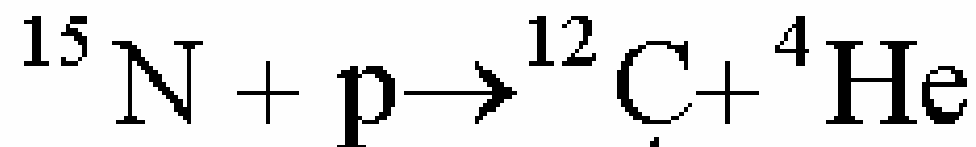
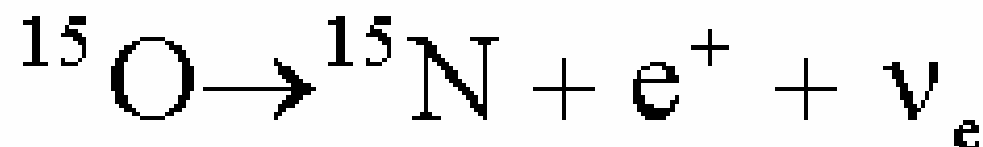
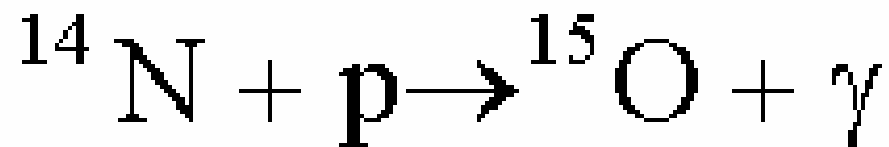
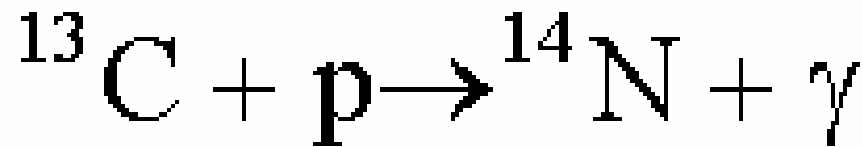
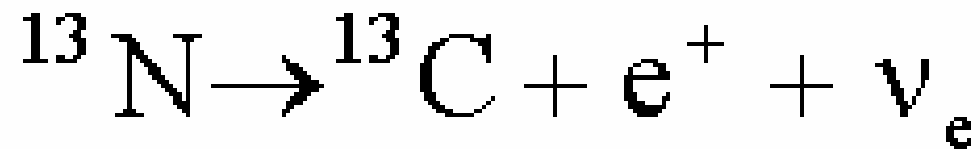


Em estrelas de alta massa a temperatura do núcleo é mais alta: cerca de 40 milhões de K

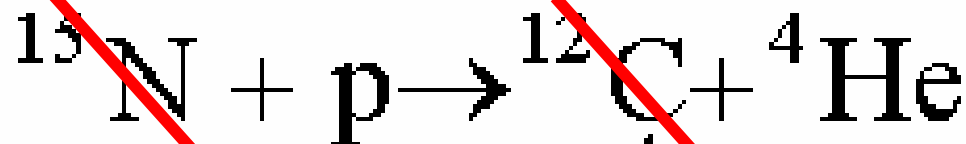
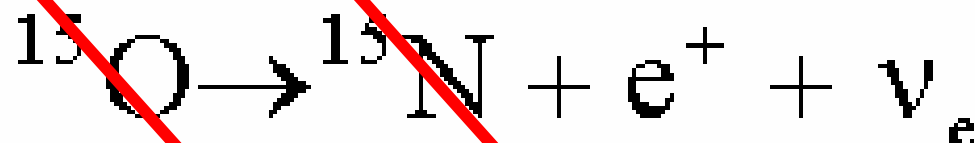
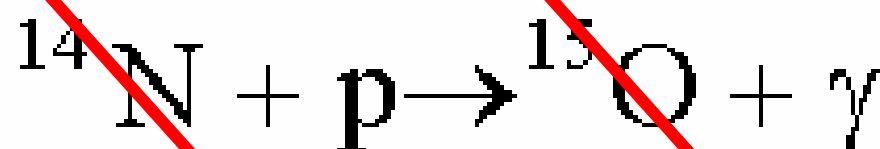
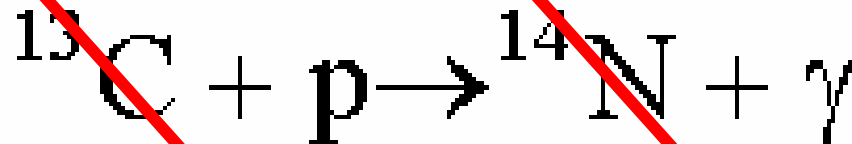
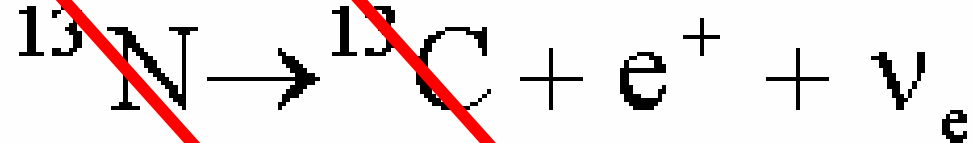
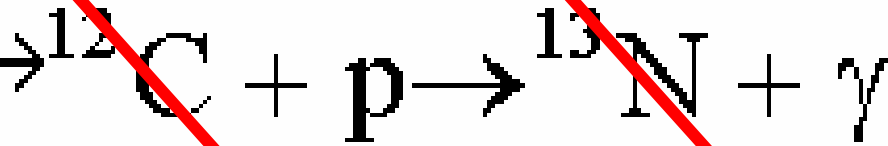
Hidrogênio é convertido em Hélio, mas por meio de outra sequência de reações nucleares, conhecida como ciclo CNO

No ciclo CNO, 4 p^+ são convertidos em ${}^4\text{He}^{2+}$, mas por meio de outra sequência de reações, diferente do ciclo p-p:

Ciclo CNO



Ciclo CNO



O ciclo CNO predomina sobre o p-p em estrelas com mais de $2 M_{sol}$

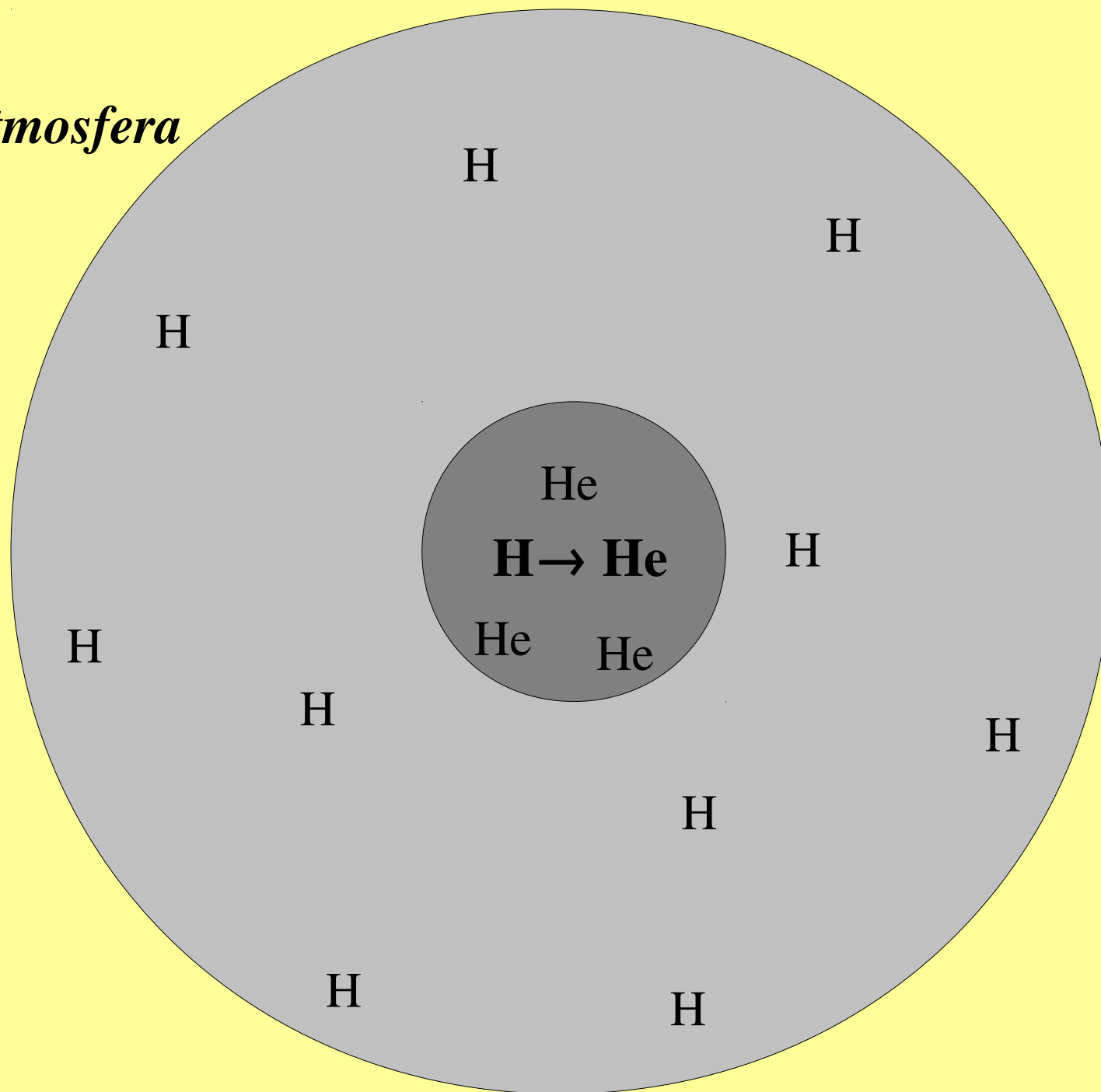
O ciclo CNO é uma sequência de diversas reações nucleares envolvendo os elementos C, N e O

C, N e O não são produzidos nessas reações; eles já existiam previamente na estrela, em pequenas quantidades.

No ciclo CNO temos a seguinte conversão:



Atmosfera



H

H

H

He

H → He

H

H

He

He

H

H

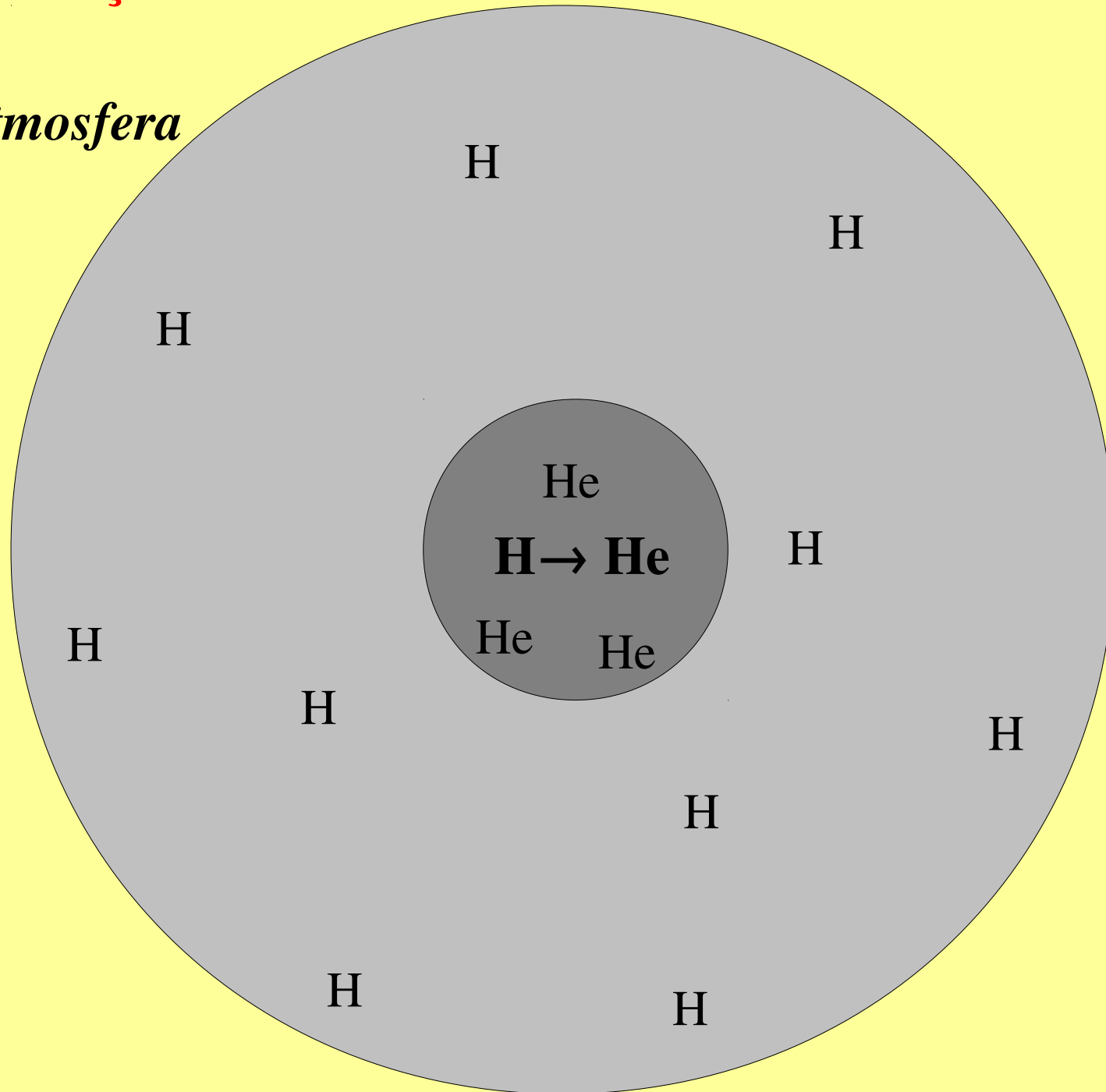
H

H

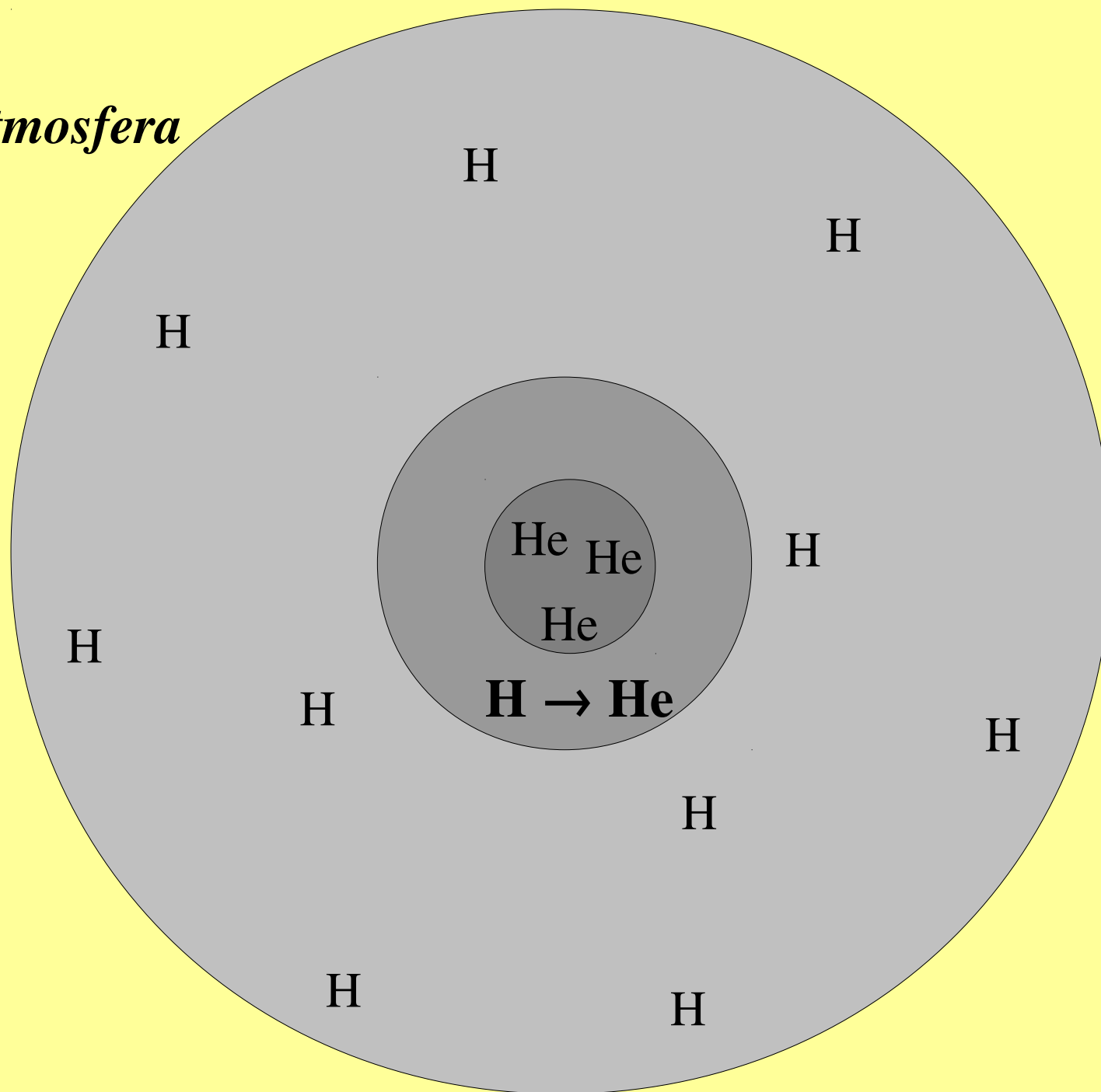
H

COMEÇA A FALTAR H NO NÚCLEO DA ESTRELA !

Atmosfera



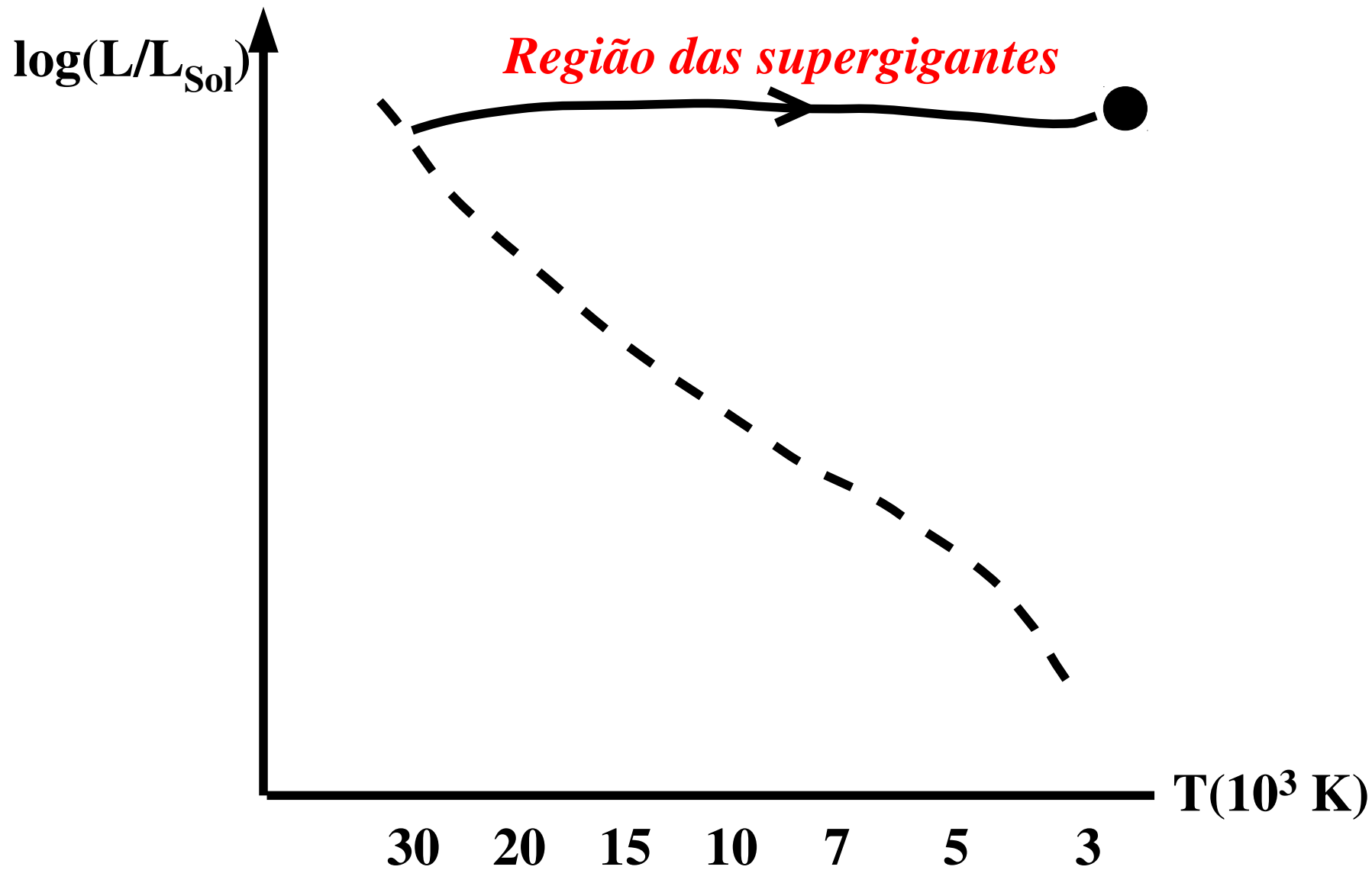
Atmosfera



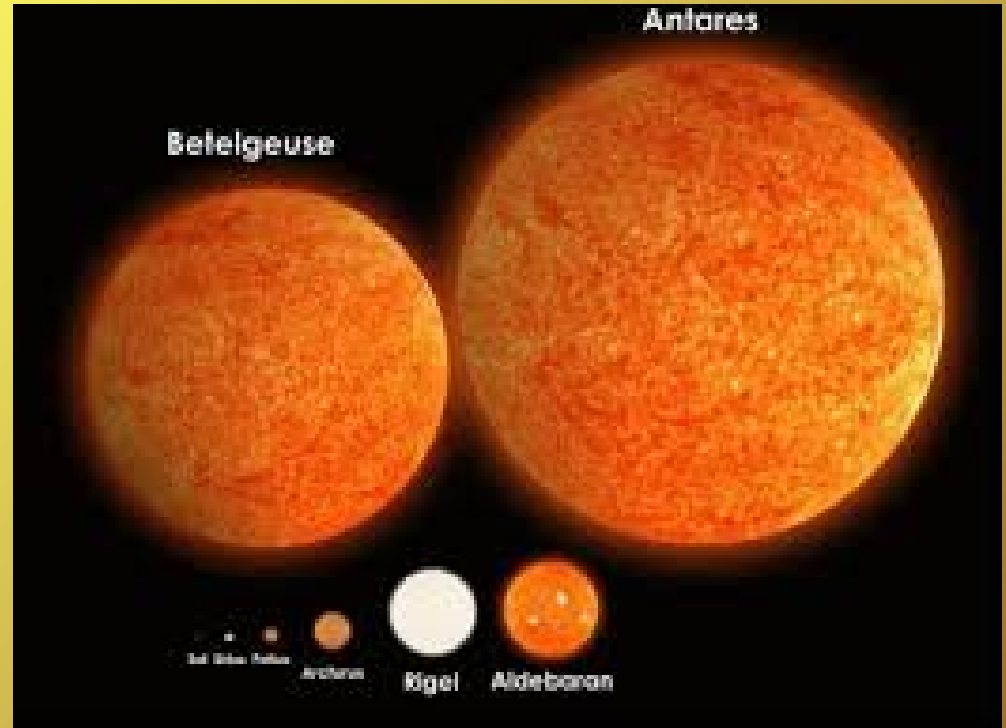
Com o esgotamento do combustível nuclear no núcleo da estrela, esta deixa a sequência principal, seguindo uma trajetória horizontal no diagrama H-R.

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

A estrela torna-se uma supergigante e a temperatura de sua fotosfera diminui.



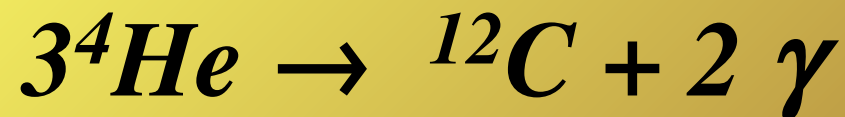
*O diâmetro de uma
supergigante vermelha
pode chegar a cerca de
1000 diâmetros solares!*



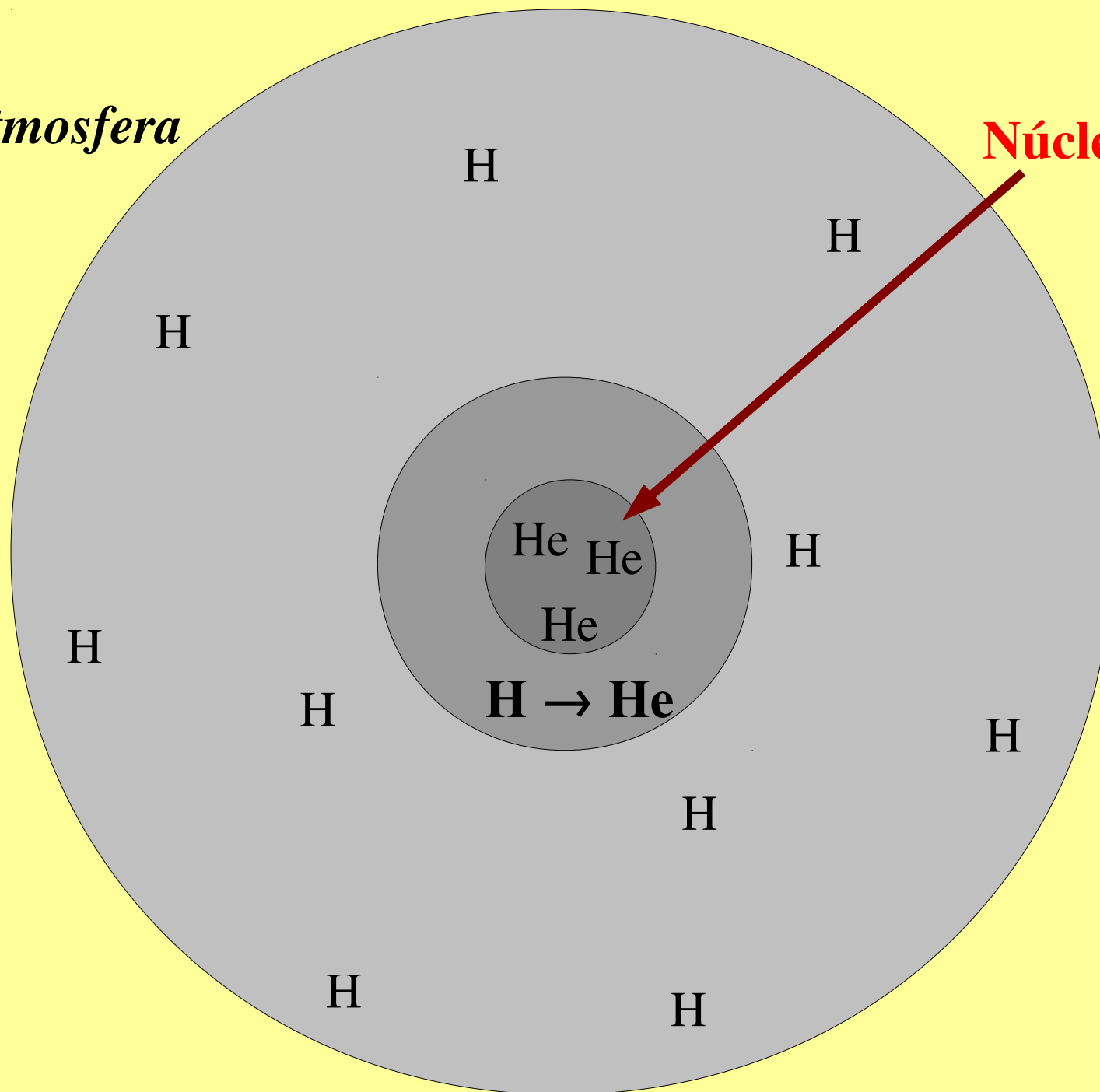
No núcleo da estrela a situação é diferente:
Composto majoritariamente por Hélio, ele cresce à medida que $H \rightarrow He$ na camada acima.

O peso das camadas superiores da estrela exerce enorme pressão sobre o núcleo, que atinge alta temperatura e densidade.

Quando sua temperatura atinge $10^8 K$ inicia-se o processo triplo- α :



Atmosfera



Núcleo crescente

H

H

H

He He

H

He

H

$H \rightarrow He$

H

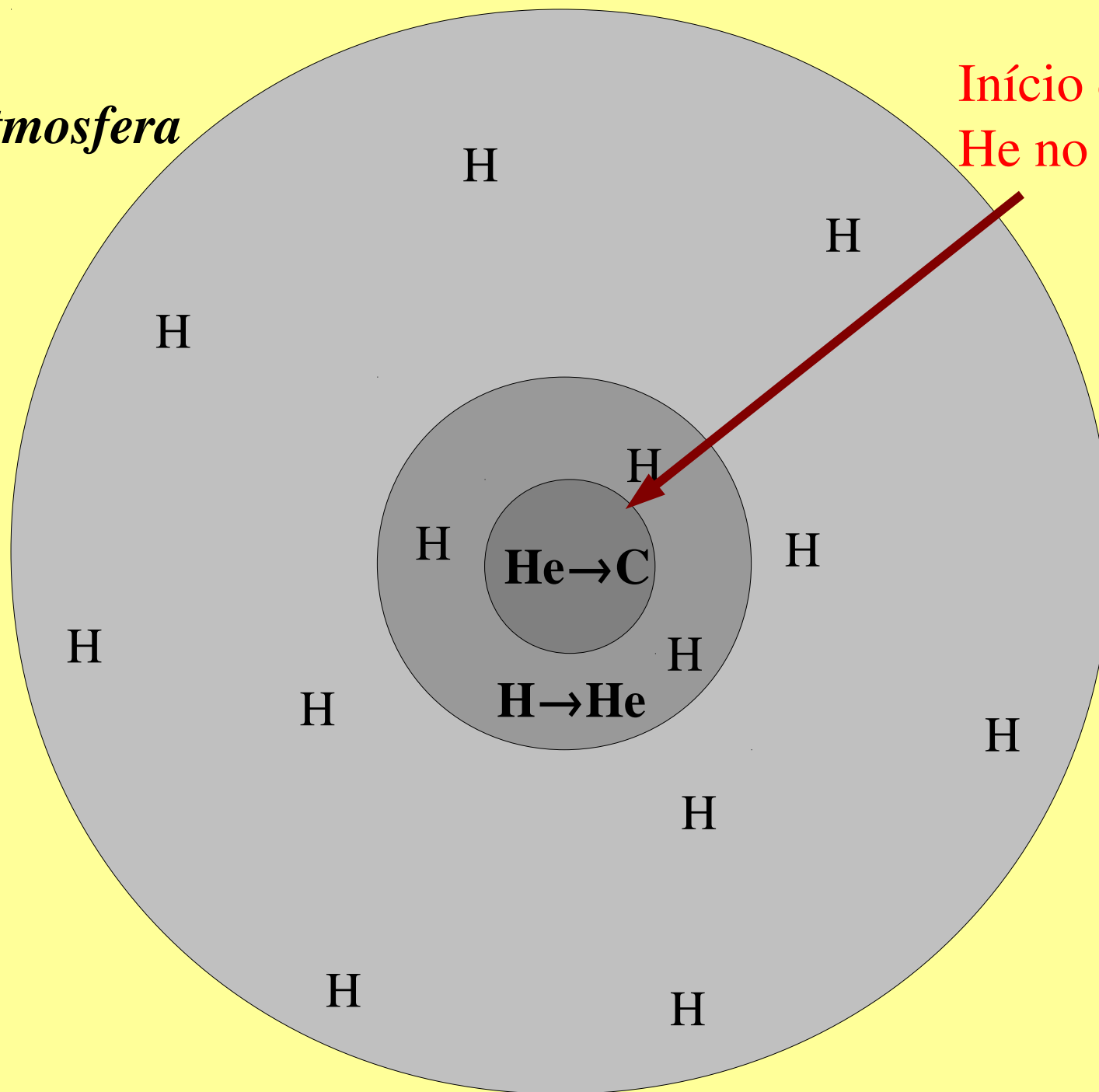
H

H

H

H

Atmosfera



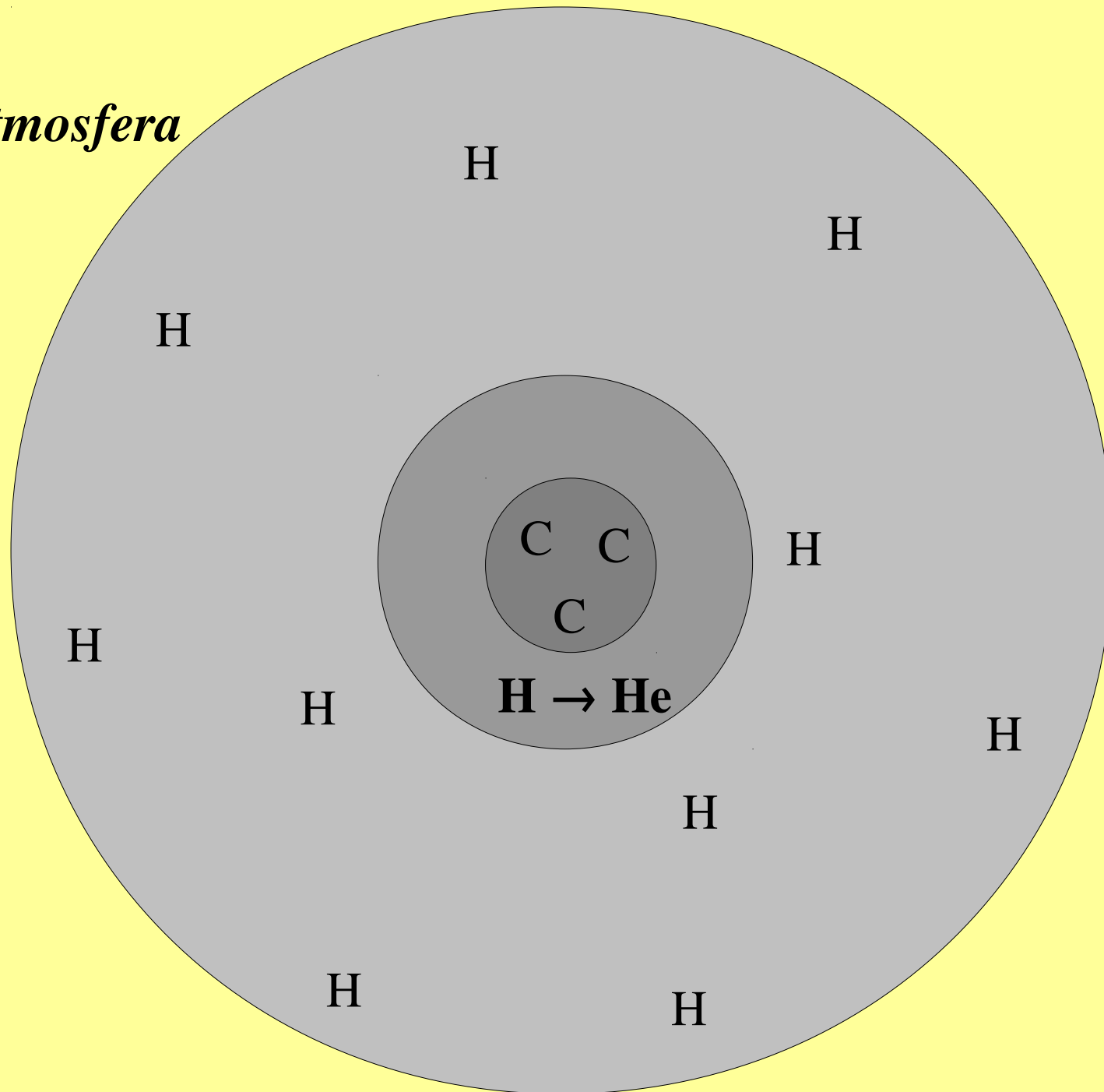
Início da queima de He no núcleo

No núcleo da estrela, Hélio é convertido em Carbono através da relação triplo- α :



O núcleo da estrela vai ficando paulatinamente rico em Carbono.

Atmosfera



H

H

H

C C

H

C

H

H → He

H

H

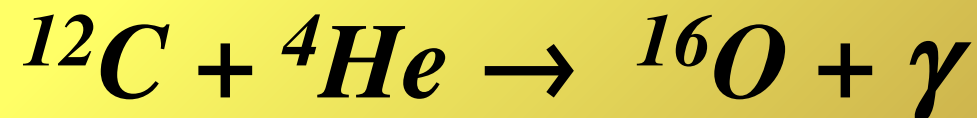
H

H

H

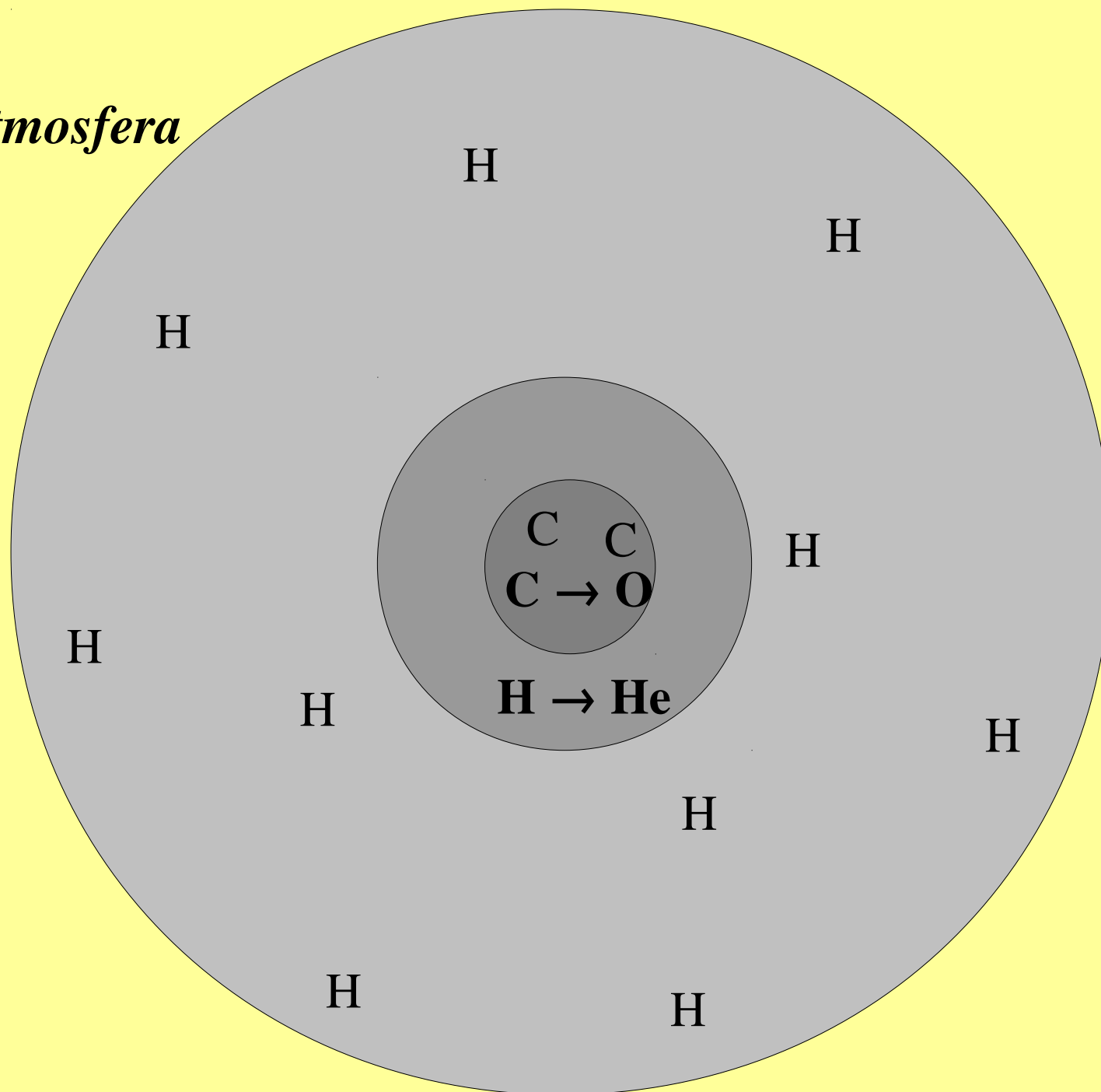
Sem gerar energia e sob a ação do peso das camadas exteriores, o núcleo da estrela, rico em Carbono cresce em densidade e temperatura.

Quando a temperatura atinge $T = 10^9\text{K}$, inicia-se a “queima” de Carbono, que é transformado em Oxigênio através da reação:



Reações desse tipo são chamadas de reações *alfa* (*adição de uma partícula α ao núcleo*)

Atmosfera



H

H

H

C C
C → O

H

H

H

H → He

H

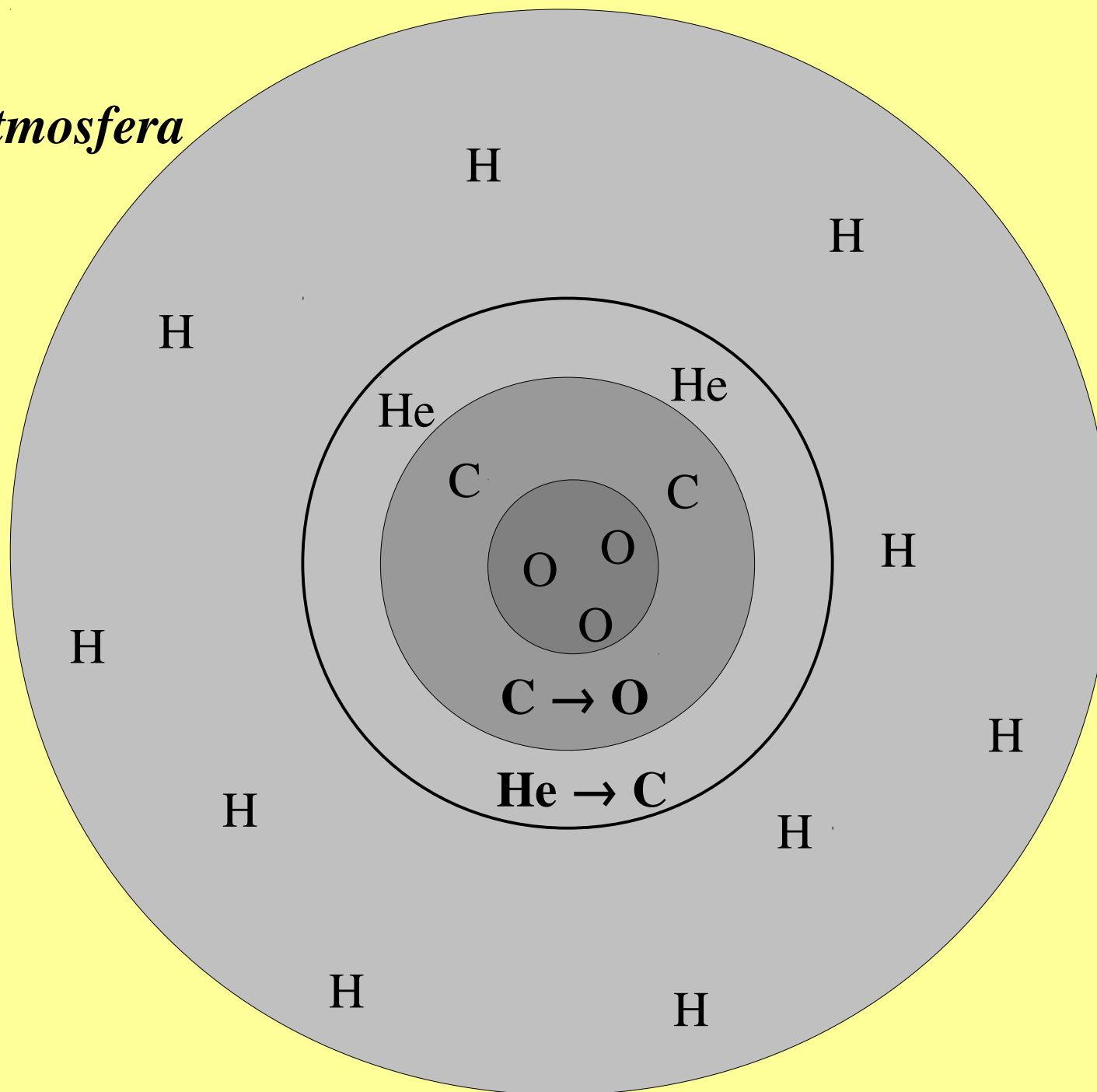
H

H

H

Paulatinamente, o núcleo da estrela vai tornando-se cada vez mais rico em Oxigênio.

Atmosfera



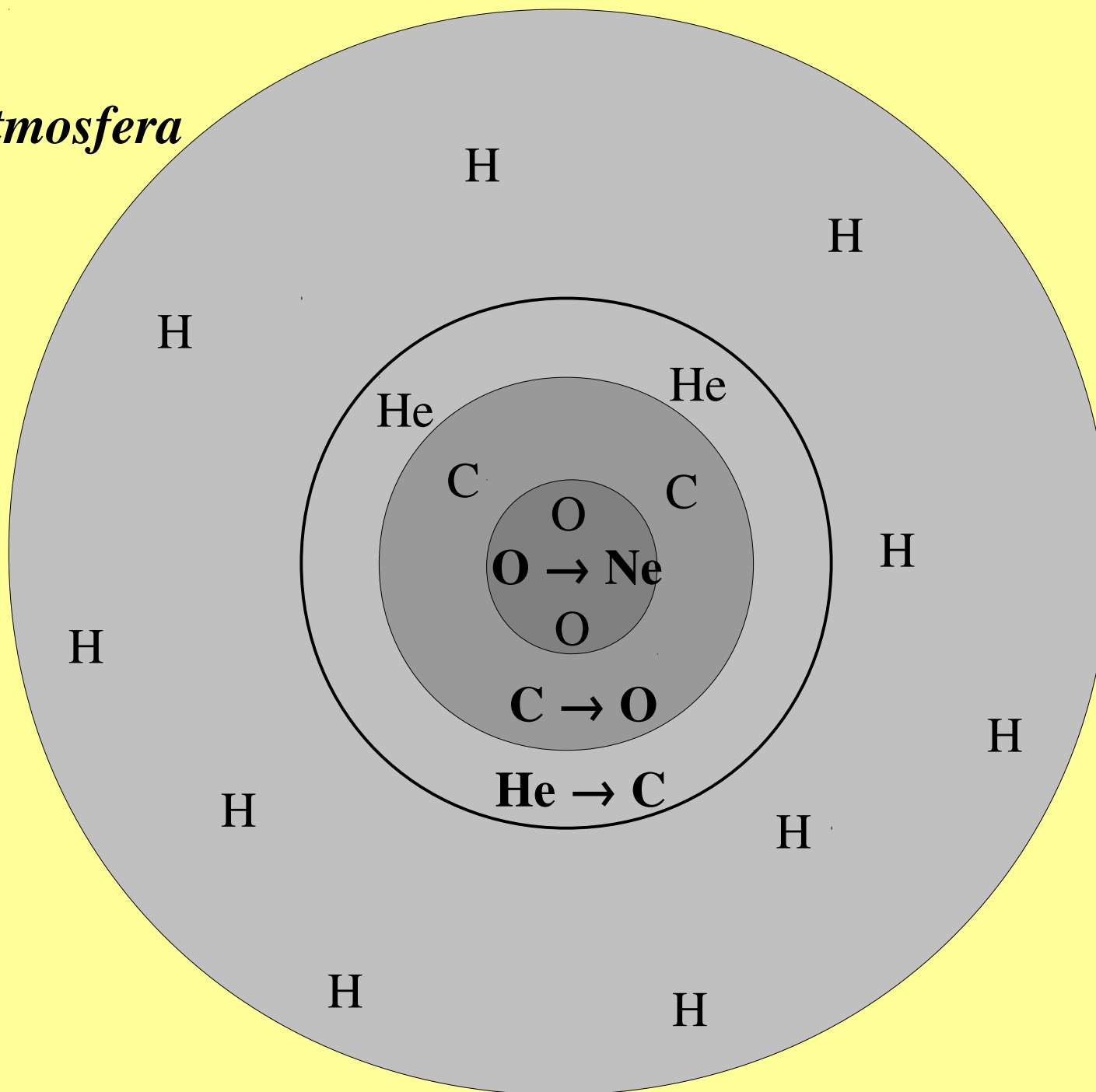
A quantidade de Oxigênio no núcleo da estrela é crescente.

Sem produzir energia, o peso das camadas externas comprime o núcleo, aumentando sua temperatura.

Ao atingir uma massa crítica, a temperatura do núcleo torna-se suficiente para que ocorra a seguinte reação *alfa*:



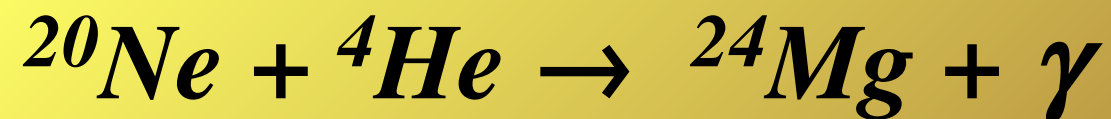
Atmosfera



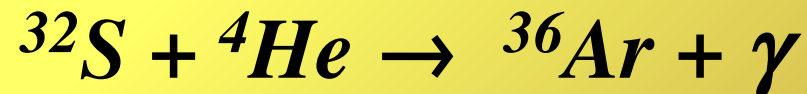
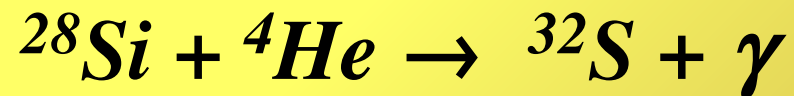
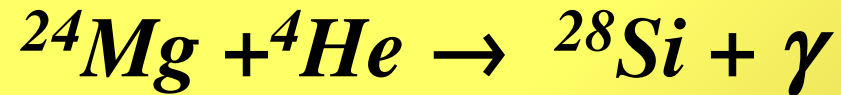
Paulatinamente o núcleo da estrela vai tornando-se rico em Neônio.

Sem produzir energia, o peso das camadas superiores torna o núcleo da estrela cada vez mais denso e quente

Ao atingir uma massa crítica, sua temperatura tornar-se-á alta o suficiente para que ocorra a seguinte reação α :



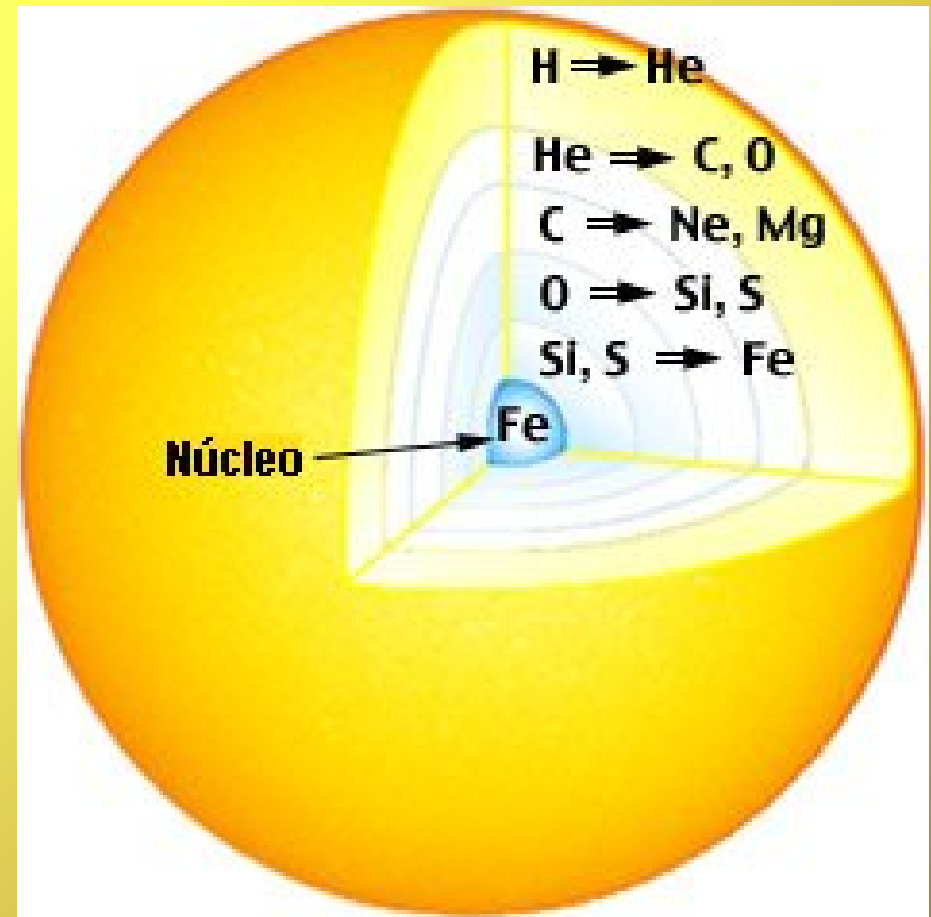
Esse processo continua, envolvendo elementos químicos de número atômico cada vez maior:



...

À medida que cresce o número atômico, são necessárias temperaturas cada vez maiores para que ocorram as reações *alfa* no núcleo da estrela.

- Simultaneamente, nas camadas mais externas ao núcleo, onde a temperatura é mais baixa, ocorrem outras reações nucleares.
- A estrutura da estrela se assemelha a uma casca de cebola, com reações diferentes ocorrendo simultaneamente em diferentes raios.

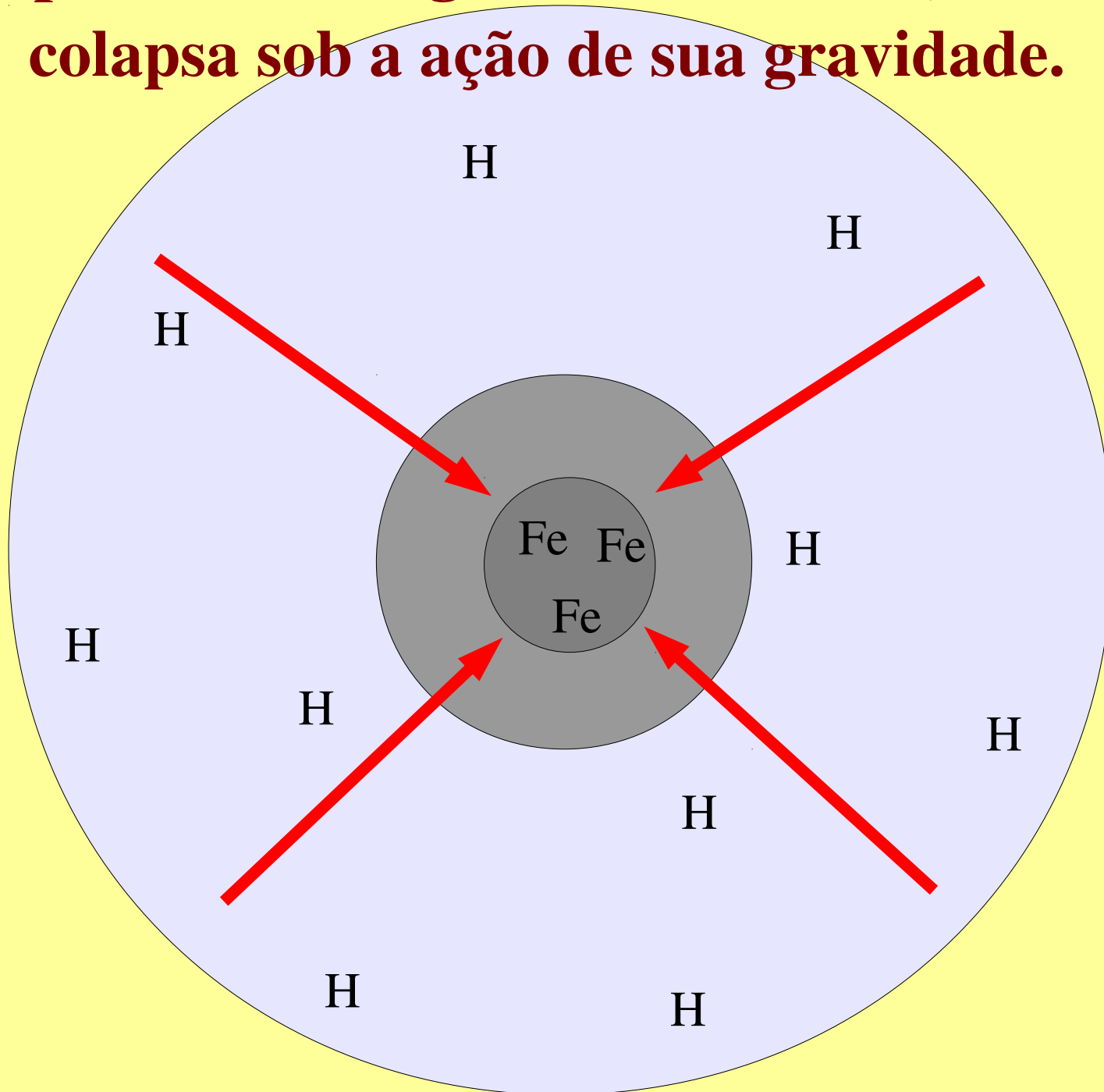


As reações alfa continuam no núcleo da estrela até que este torne-se rico em átomos de Ferro (Fe)



Reações nucleares envolvendo o átomo de Fe são endotérmicas. Portanto o núcleo da estrela não produz energia, mas absorve-a.

Sem produzir energia em seu núcleo, a estrela colapsa sob a ação de sua gravidade.



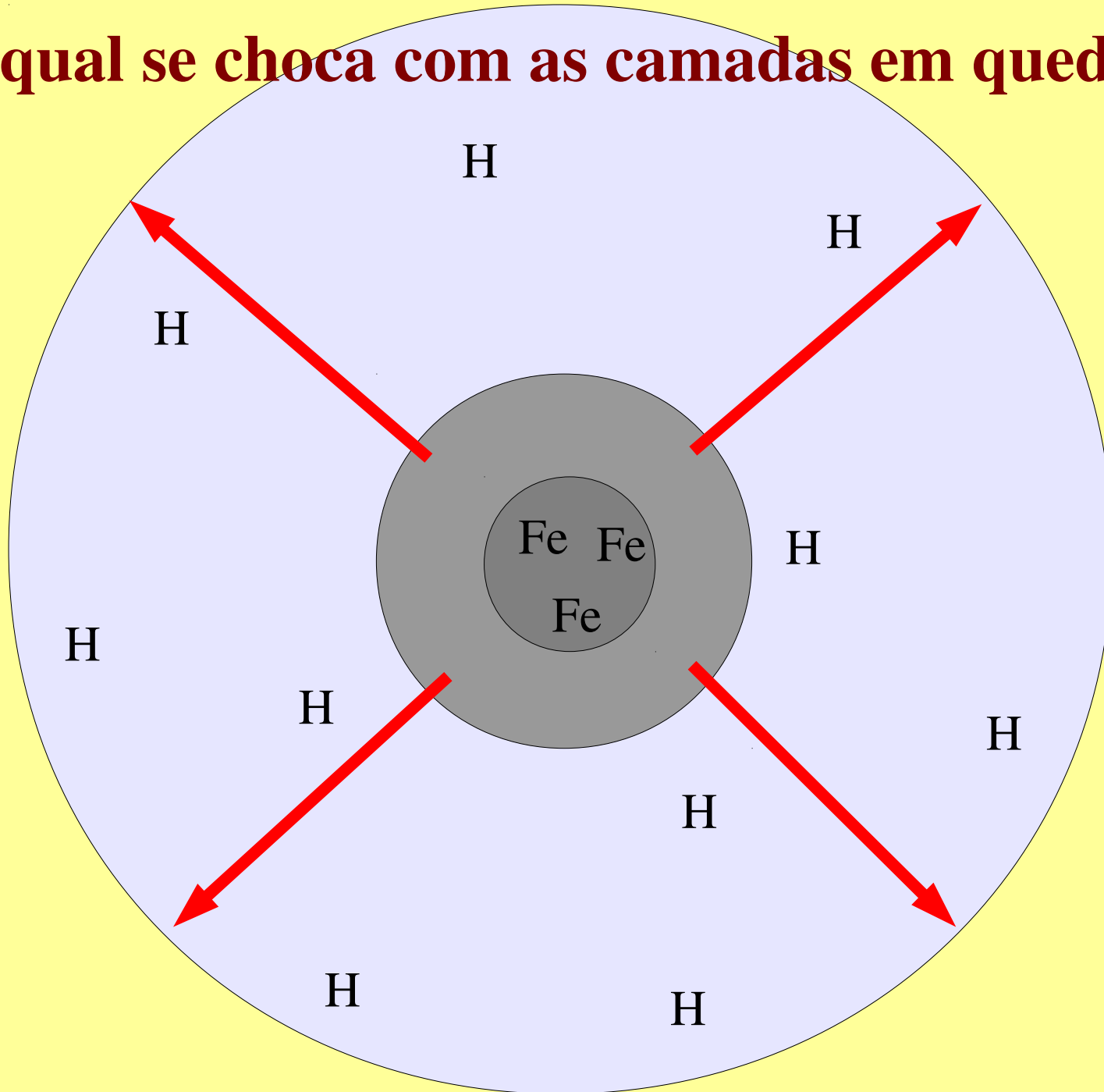
A queda das camadas exteriores da estrela sobre seu núcleo acelera a geração de Fe (pois a reação é endotérmica)

A energia gerada pela queda das camadas exteriores sobre o núcleo supera a energia absorvida para gerar Fe, gerando um grande acúmulo de energia em torno do núcleo.

A temperatura em torno do núcleo se eleva.

Essa camada expande-se bruscamente.

**Expansão brusca da camada em torno do núcleo,
o qual se choca com as camadas em queda.**



A expansão brusca da camada em torno do núcleo
assemelha-se a uma explosão.

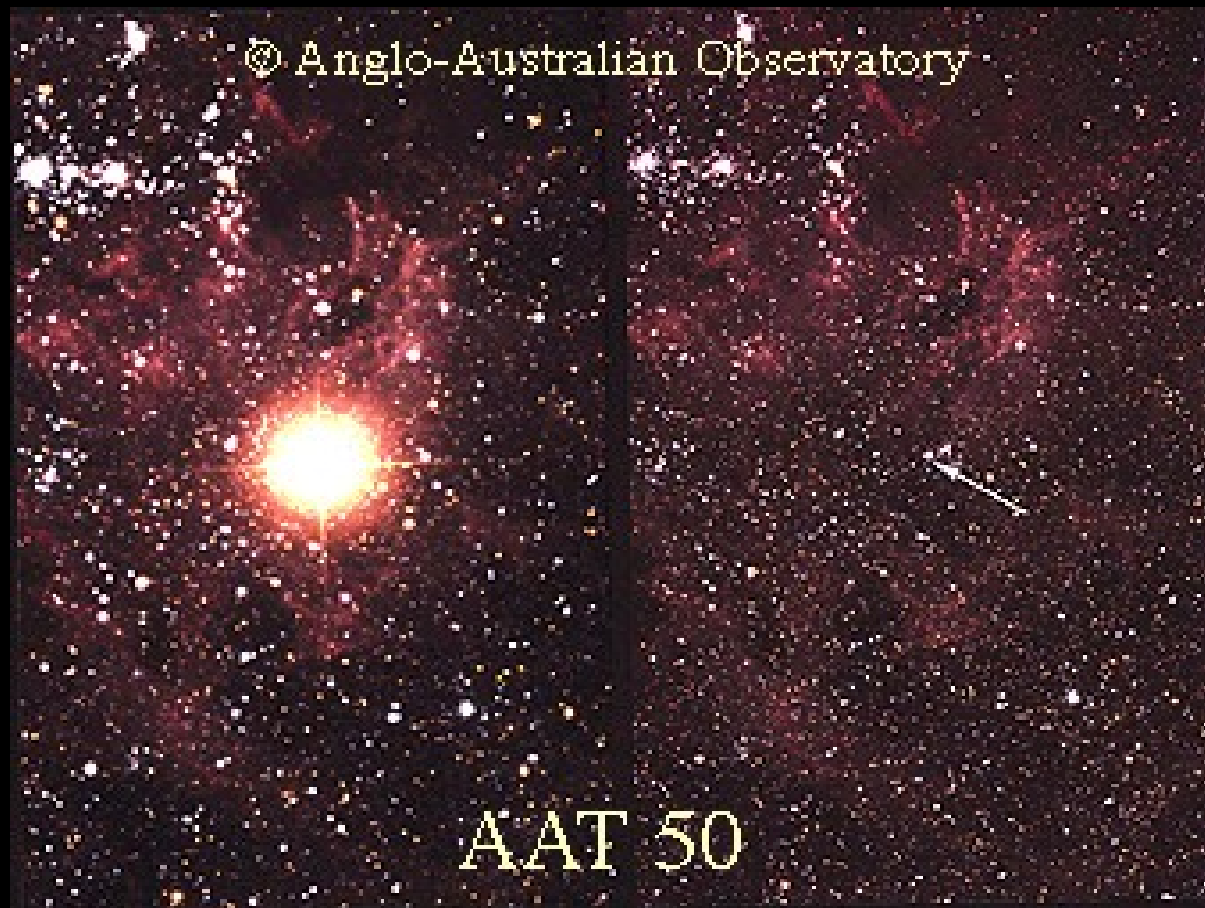
A estrela explode como uma supernova.

Durante a explosão, as camadas exteriores da estrela são lançadas violentamente para o espaço, a uma velocidade de 1500 km/s.

Há a formação de uma nebulosa em torno de um objeto central muito denso.



Remanescente da supernova do ano de 1054 d.C.

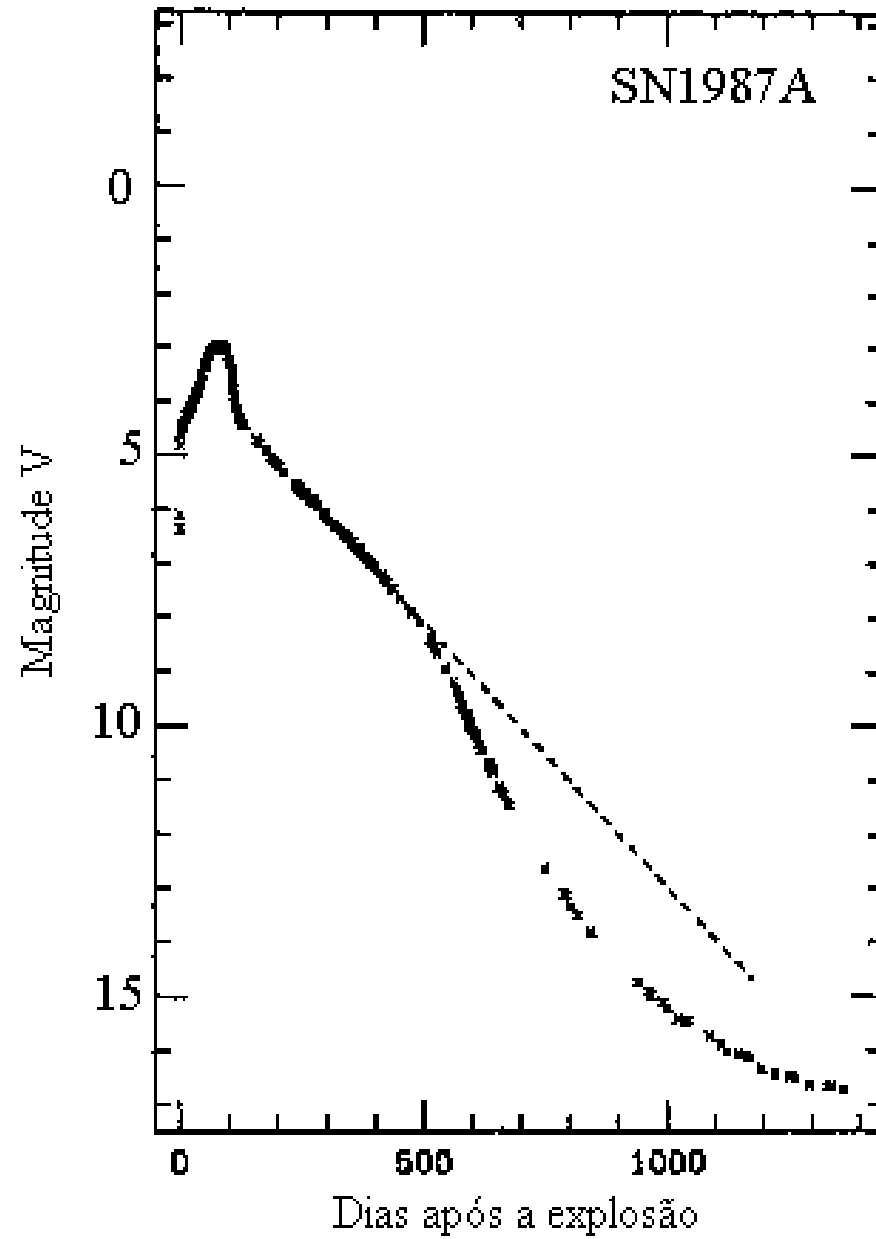


Durante a explosão, a estrela pode brilhar tanto como uma galáxia inteira.

Sua luminosidade equivale a bilhões de vezes à do Sol

Se a explosão ocorrer em nossa Galáxia, a supernova pode ser vista durante o dia.

Curva de luz: SN1987A



Últimas explosões de SN em nossa Galáxia:

SN1006: na constelação de *Lupus*, vista da Europa e Oriente, atingiu $m_V = -7,0$ em seu máximo

SN1054: *do Caranguejo*, observada em *Taurus* por astrônomos chineses e no Oriente Médio

SN1181: na constelação de Cassiopeia, visível a olho nu, atingiu $m_V = 0$ em seu máximo.

SN1572: observada por *Tycho Brahe*

SN1604: observada por *J. Kepler*

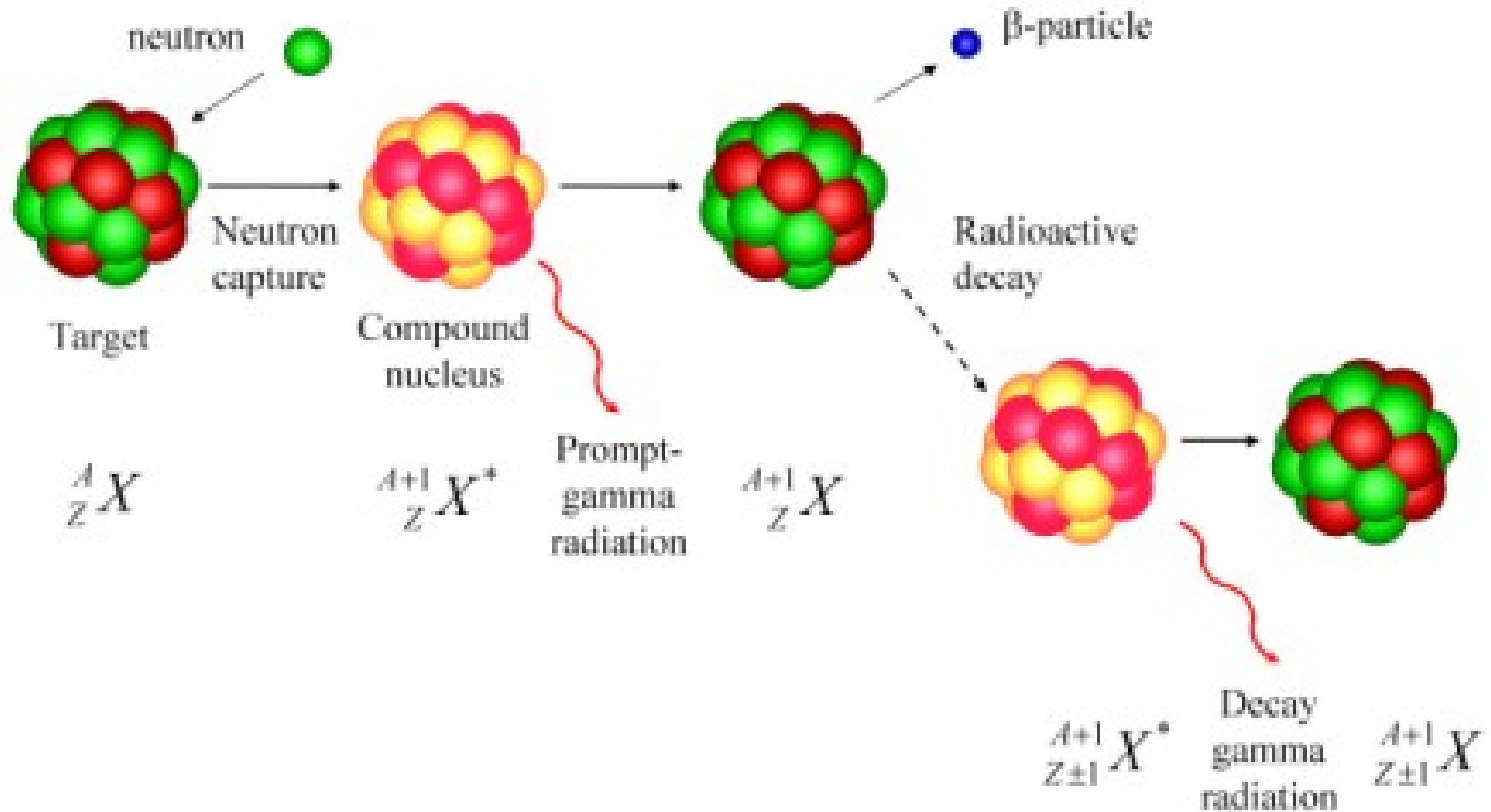
SN1667: *Cassiopeia A*, sem registro histórico

G1.9+0.3 explosão há cerca de 140 anos, sem registro histórico

Outras reações de nucleosíntese: a captura de nêutrons

- Além do ciclo p-p, CNO e reações-alfa, há diversos outros tipos de reações nucleares em estrelas, que geram diferentes elementos químicos
- Os elementos de Z par geralmente são formados por reações tipo α
- A captura de nêutrons é o principal mecanismo de formação de elementos de Z ímpar e trans-Fe.

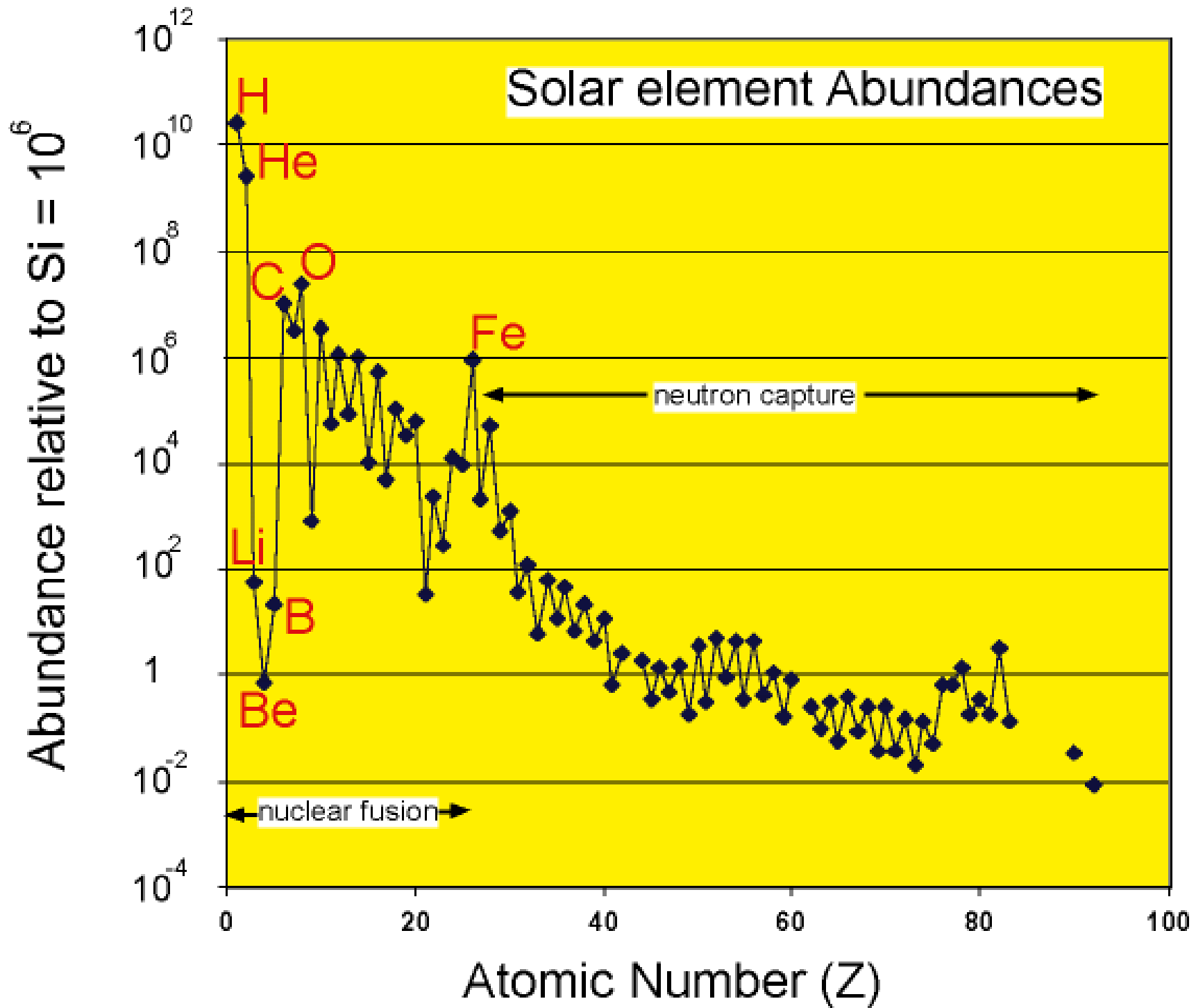
A captura de nêutrons



A captura de nêutrons: “vantagens” de “desvantagens” (para a estrela)

- Não há a repulsão coulombiana a ser vencida → pode ocorrer em temperaturas mais baixas
- Não há muitas fontes de nêutrons disponíveis → fica restrita a fases específicas da evolução estelar.





A grosso modo, as abundâncias dos elementos químicos diminui com o número atômico.

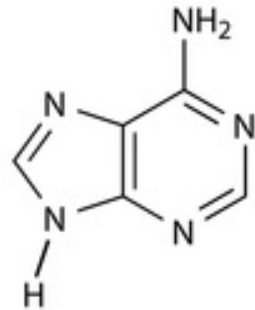
Modelos teóricos indicam que a nucleosíntese primordial (logo após o Big Bang) formou: H, He e traços de Li e Be.

As abundâncias dos elementos químicos de **Z par** é geralmente maior que as de número ímpar. Quase todos os elementos com Z par são formados por processos α e captura de nêutrons.

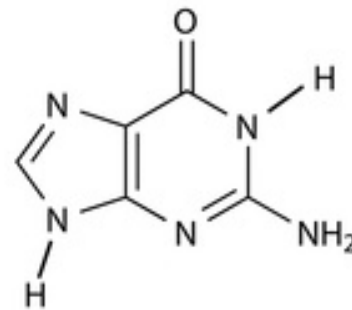
Elementos químicos de **Z ímpar** são geralmente formados por captura de nêutrons

Os elementos químicos mais abundantes no Universo são: H, He, O, C, N (nesta ordem).

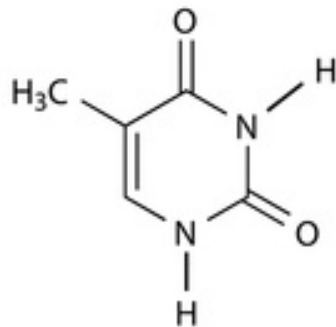
Moléculas da vida contêm principalmente esses elementos. Outros átomos aparecem apenas ocasionalmente.



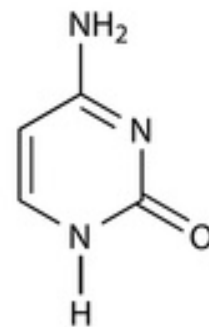
Adenina (A)



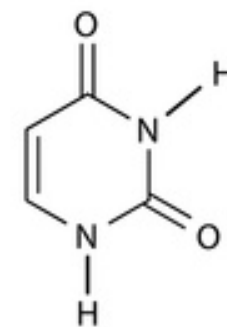
Guanina (G)



Timina (T)



Citosina (C)



Uracila (U)

O que resta do núcleo da estrela?

Duas possibilidades:

1. Se $M_{\text{nucleo}} < 3 M_{\text{Sol}}$

Prótons fundem-se com os elétrons, formando
uma estrela de nêutrons

2. Se $M_{\text{nucleo}} > 3 M_{\text{Sol}}$

A auto-gravidade do objeto é tão forte que o colapso é
inevitável:

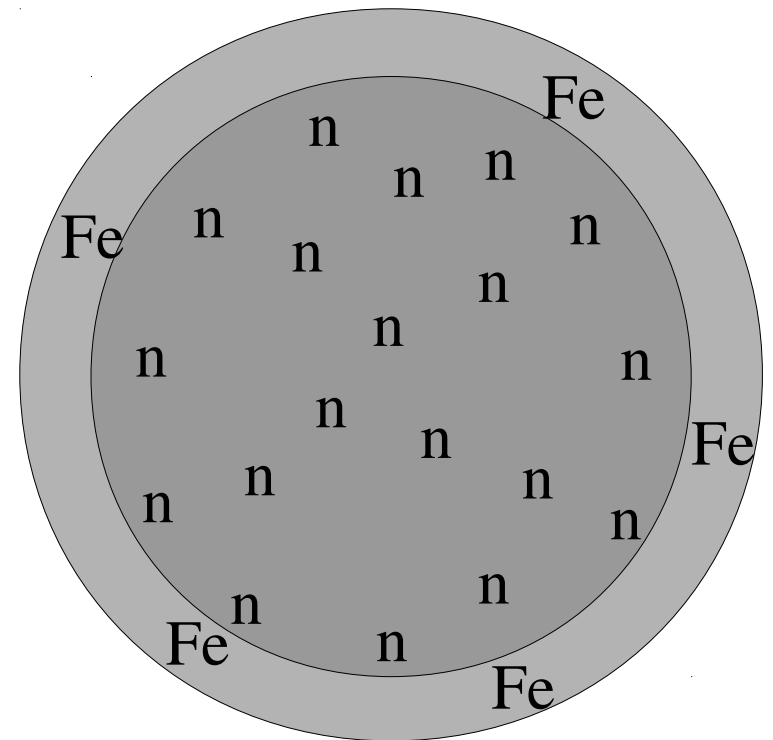
um buraco negro é formado

Estrelas de nêutrons

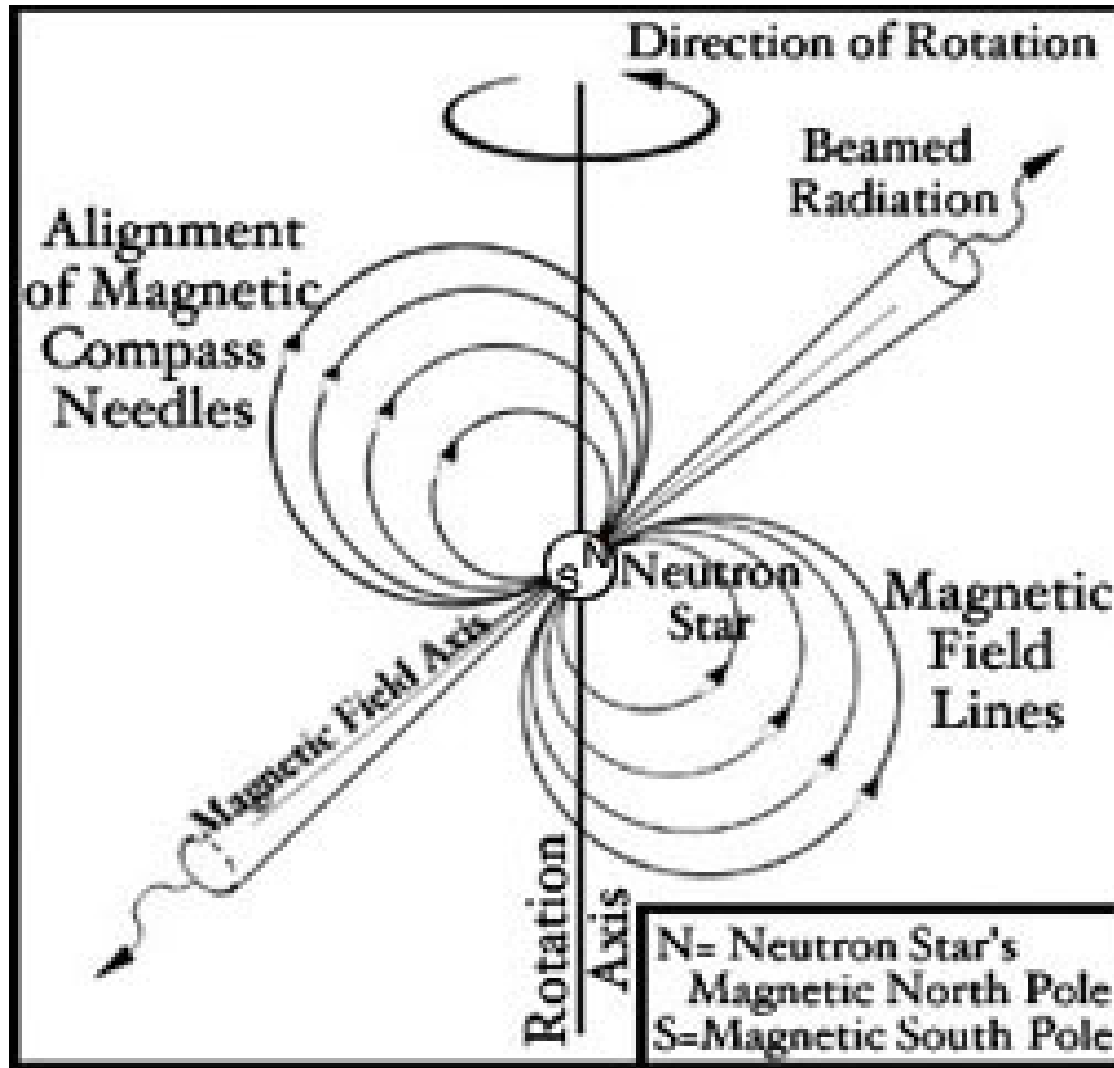
O colapso do núcleo da estrela é interrompido com a fusão de prótons e elétrons em nêutrons.

O objeto é formado principalmente por nêutrons. Não há elementos químicos, com exceção de uma fina camada externa de Fe.

Com o colapso, as linhas do campo magnético tornam-se mais próximas => campo magnético intenso.



Esquema de uma estrela de nêutrons em rotação (pulsar)



Os pólos magnéticos não estão alinhados com o eixo de rotação do pulsar.

Características das “estrelas” de nêutrons:

Raio: cerca de 10 – 12 km

Densidade: 1 quatrilhão g/cm³ (10^{15} g/cm³)

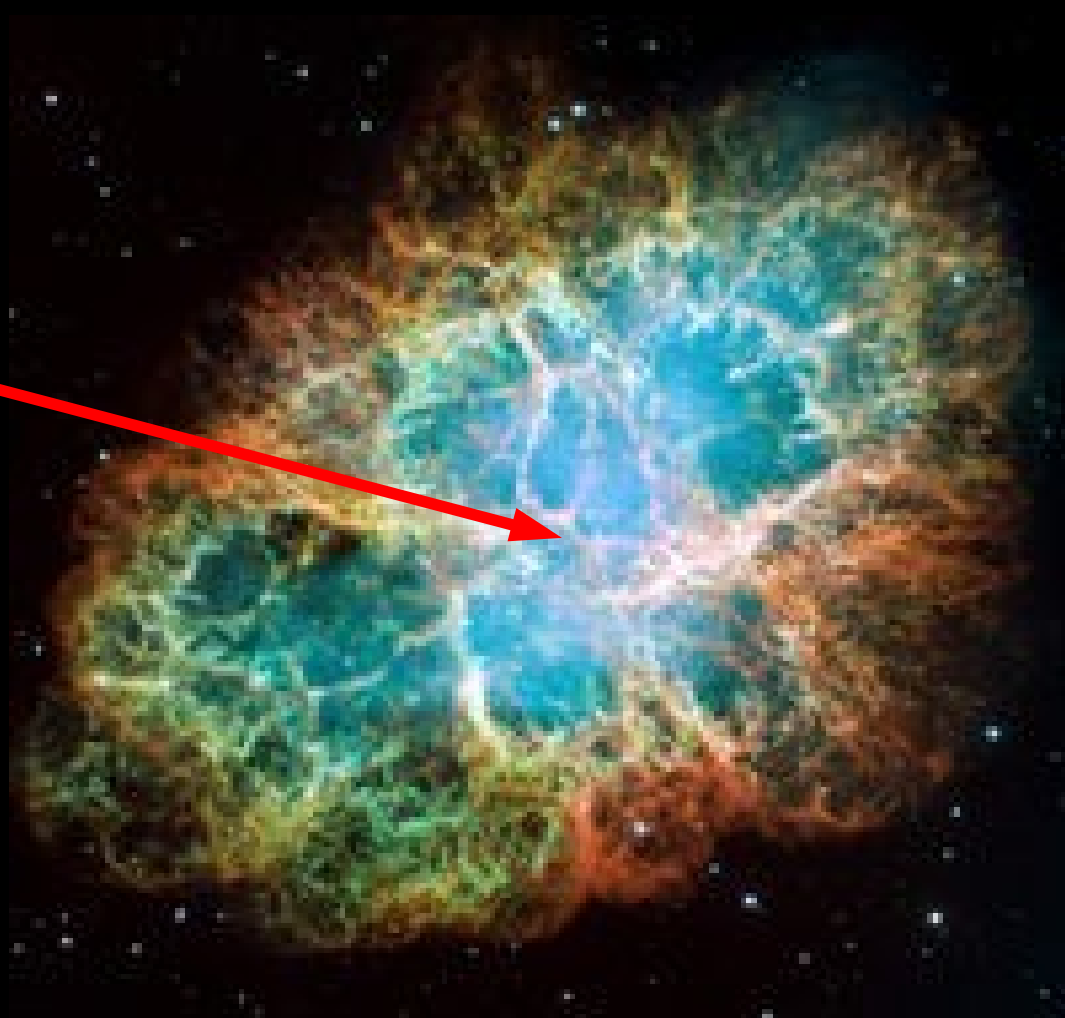
Intensidade do campo magnético: 10^{12} Gauss

Frequência de giro: 1 – 10^3 Hz

Massa: menor que $3 M_{\text{Sol}}$

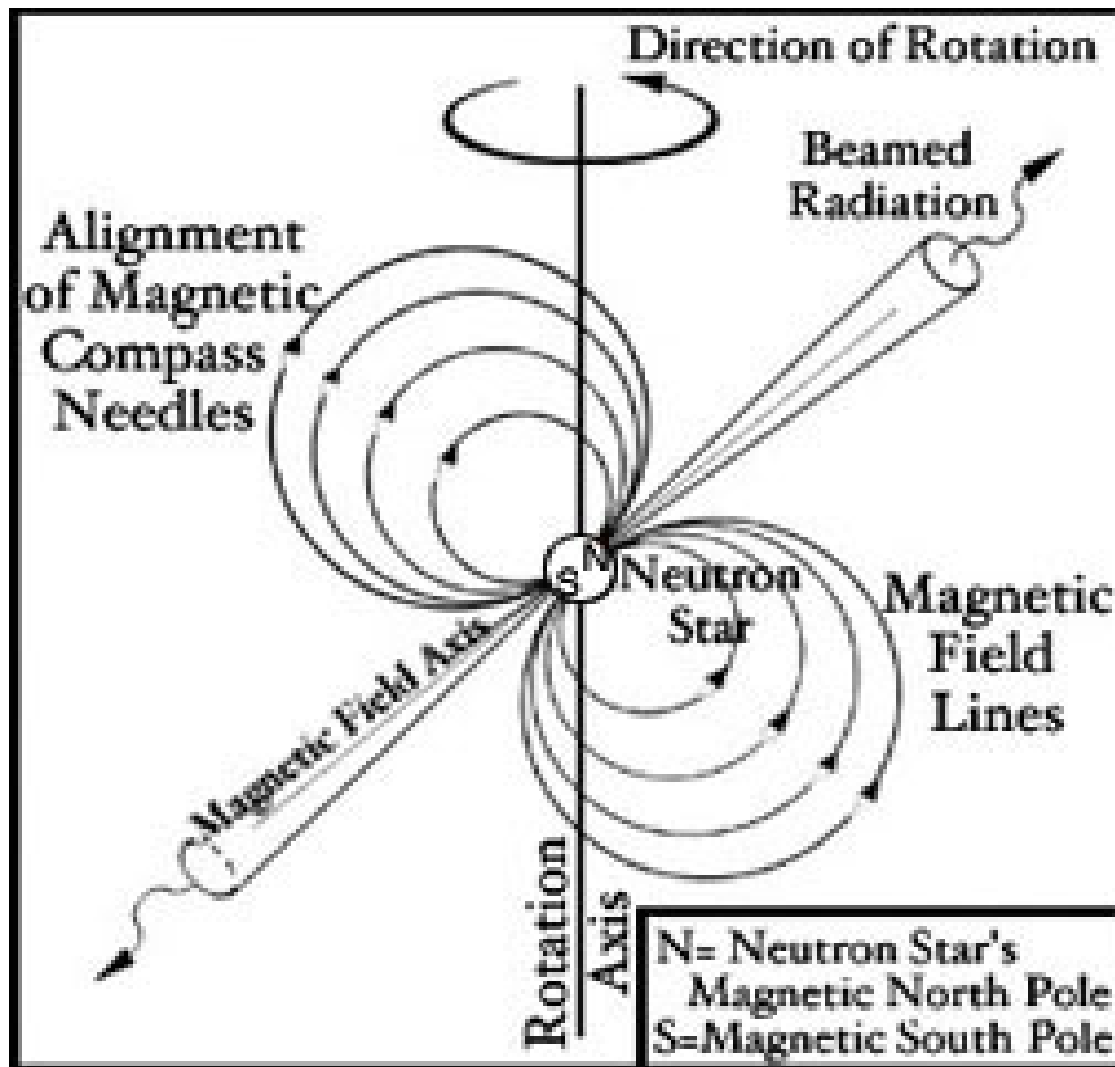
A remanescente da SN1054 tem um pulsar
em seu centro

Pulsar Crab



Pulsar Crab





Remanescente de explosão de SN em Cygnus.



Buracos Negros

Não podem ser observados diretamente, pois a radiação não lhes pode escapar.

Diversos BN têm sido detectados, principalmente em:

1. Em núcleos de outras galáxias

disco de gás quente, que orbita o BN

2. Em sistemas binários

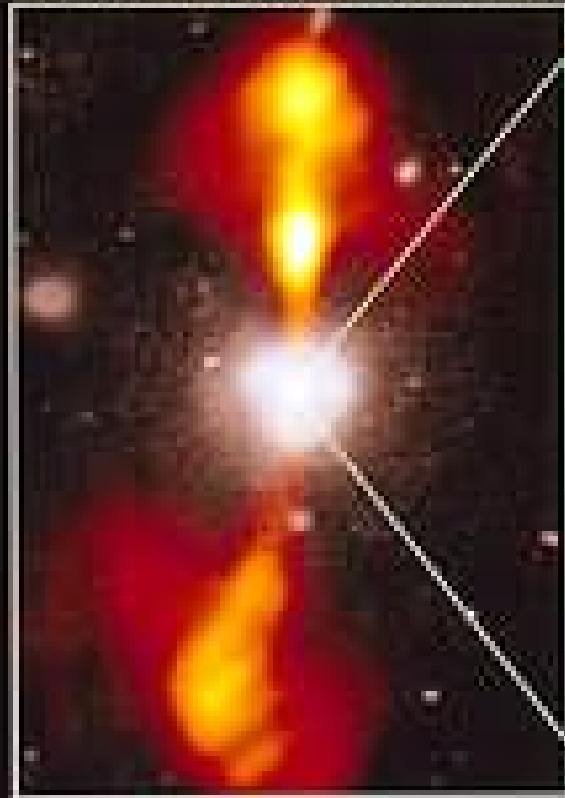
Estrelas com companheiras “invisíveis”, mas massivas.

Exemplo: BN no nucleo da galaxia NGC4261

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



350 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk



17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS

Buraco Negro (concepção artística)

A matéria vizinha ao buraco negro (estrelas) é atraída em sua direção.

Antes de ser “engolida”, a matéria descreve uma órbita em torno do BN, formando um disco de gás.

O gás, ao aproximar-se do BN é comprimido e aquecido. Emite radiação, que observamos através de telescópios.



Exemplo: Cygnus X-1

Sistema binário na constelação de Cygnus, composto por duas componentes: uma estrela supergigante de tipo espectral O9.7Iab e um objeto compacto de $9 M_{\text{Sol}}$ que não brilha como uma estrela, mas é uma potente fonte de raios-X.

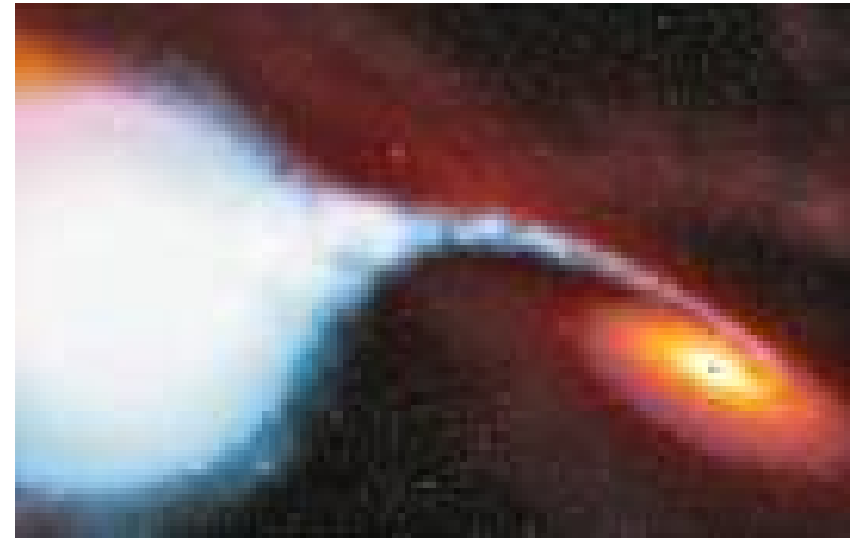
A massa das componentes foi determinada por diversas técnicas, entre elas a 3a. Lei de Kepler.



A estrela HDE226868 (indicada pela seta vermelha) tem $m=8,95$ e dista 2kpc.

A massa da estrela
supergigante é
transferida para o BN.

Um disco de acreção é
formado, cuja
temperatura é de
milhões de Kelvin e
emite em raios-X.



*O sistema binario Cygnus X-1
e seu disco de acreção
(concepção artística)*



Portanto a emissão de raios-X que vemos não provém do BN, mas de seu disco de acreção.

Diversos outros sistemas binários semelhantes têm sido observados.

Para saber mais...

- Texto no site da disciplina:
Evolução de estrelas de alta massa (R. Ortiz)
- À luz das estrelas (Lilia Arany-Prado): pag. 97 – 117



