

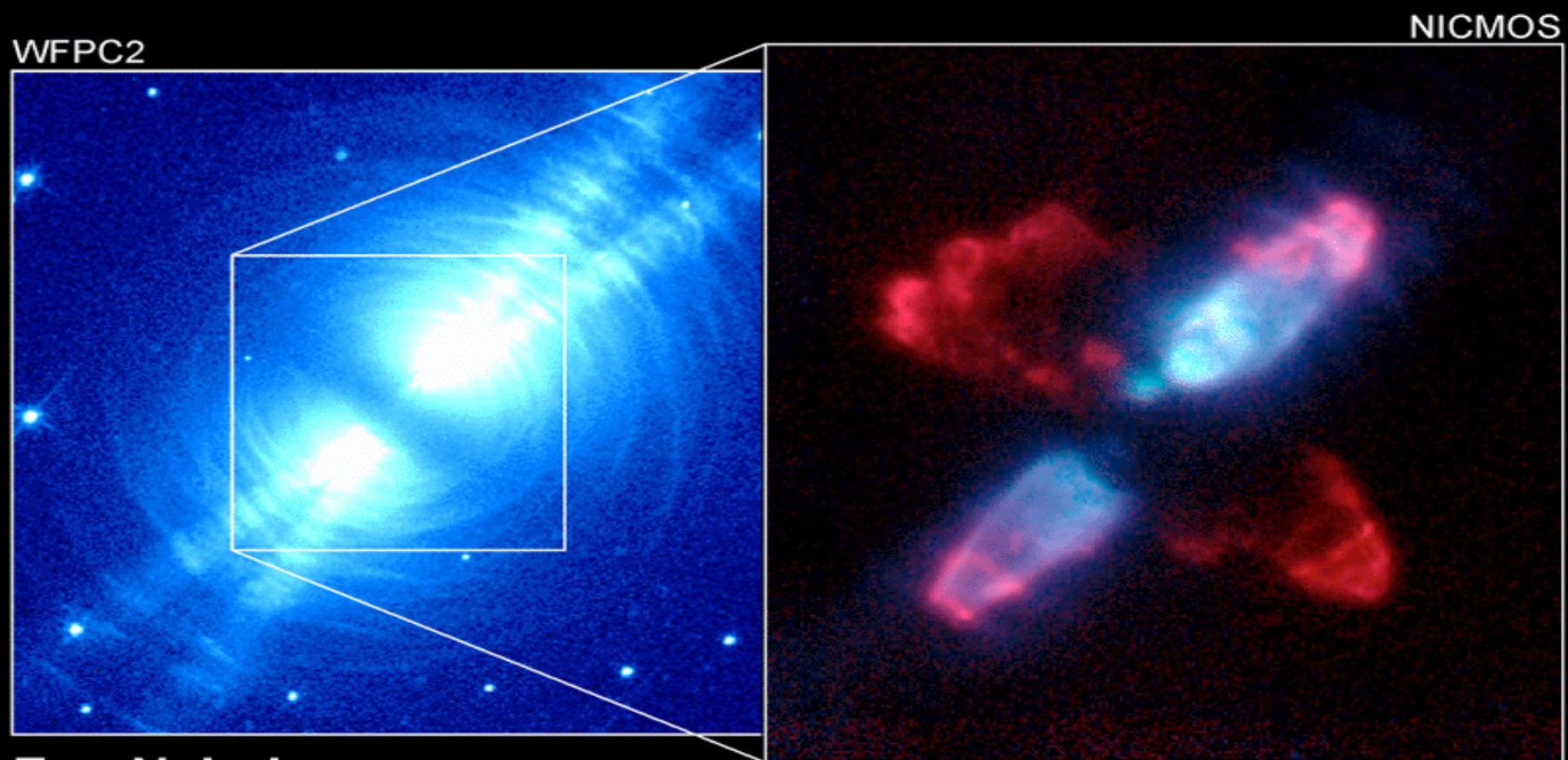
Evolução Estelar

Tópicos aula 11

Silvia Lorenz Martins 2017
OV/UFRJ



Evolução Estelar



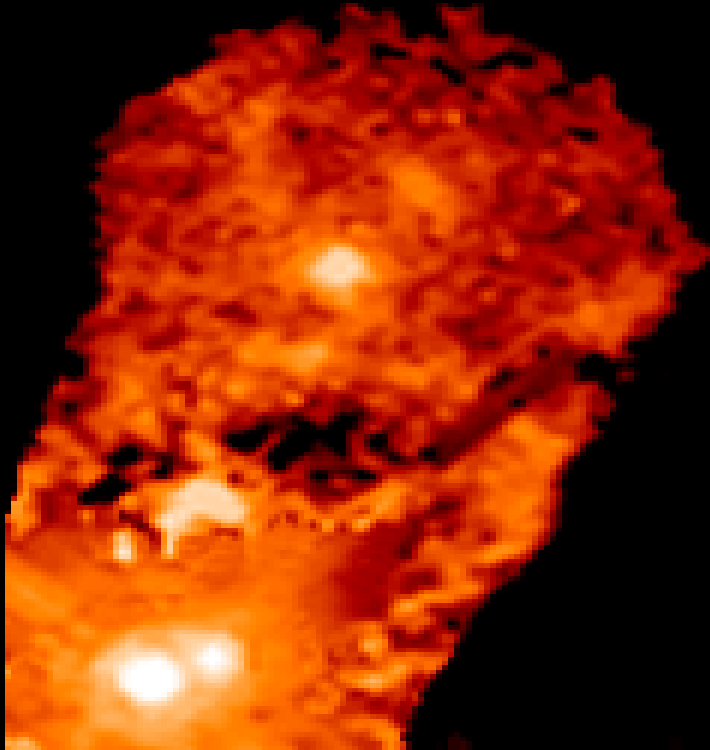
Egg Nebula

Hubble Space Telescope

PRC97-11 • ST Sci OPO • May 12, 1997

R. Thompson (Univ. Arizona), D. Hines (Univ. Arizona), R. Sahai (JPL) and NASA

Estrelas: ciclo de vida



- Esferas auto-gravitantes de gás ionizado
- Fontes de energia:
reações
termonucleares
 - Definem a formação de uma estrela

Importância da Evolução Estelar

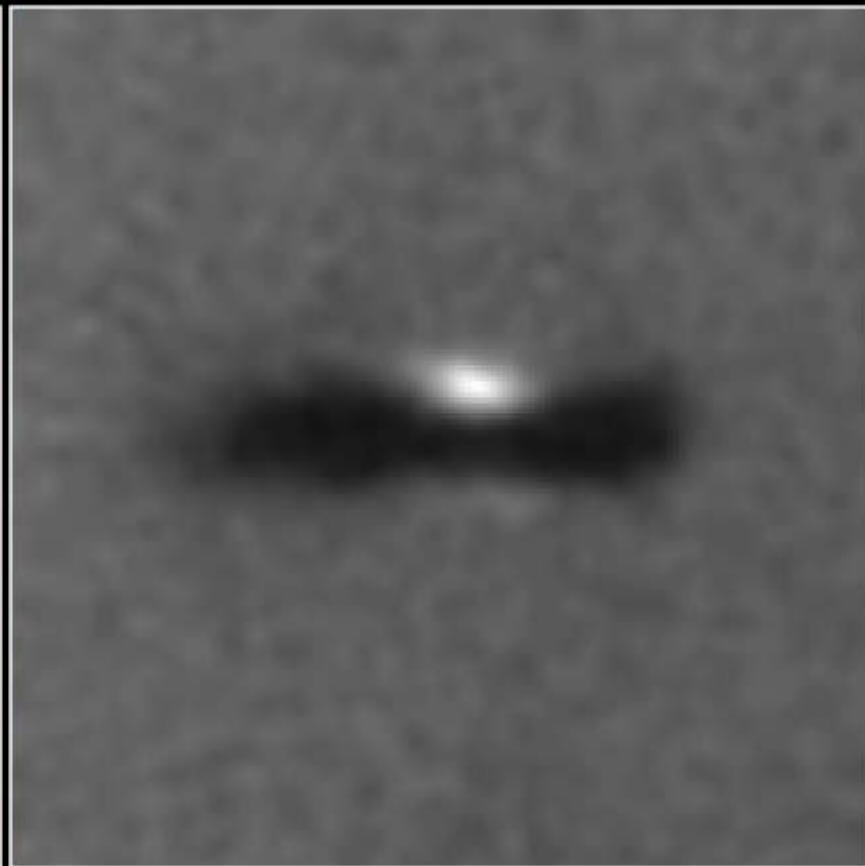
- Enriquecimento do M.I.
 - Processos de Mistura + Perda de Massa

Formação de nova geração de estrelas

Formação de grãos e moléculas complexas

- Sistemas Planetários: vida

Discos proto-planetários



**Edge-On Protoplanetary Disk
Orion Nebula**

HST · WFPC2

PRC95-45c · ST ScI OPO · November 20, 1995

M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

Ciclo de Vida

Estrela: Resiste auto-gravitação

M16 ■ Eagle Nebula

Hubble Space Telescope ■ WFC3/UVIS/IR



Estado Evolutivo: Mudanças na Composição Química



Tempo de Vida

- Massa e composição química iniciais
- Efeitos dinâmicos: rotação, perda de massa, interação com companheira
- Afetam a Evolução Subsequente

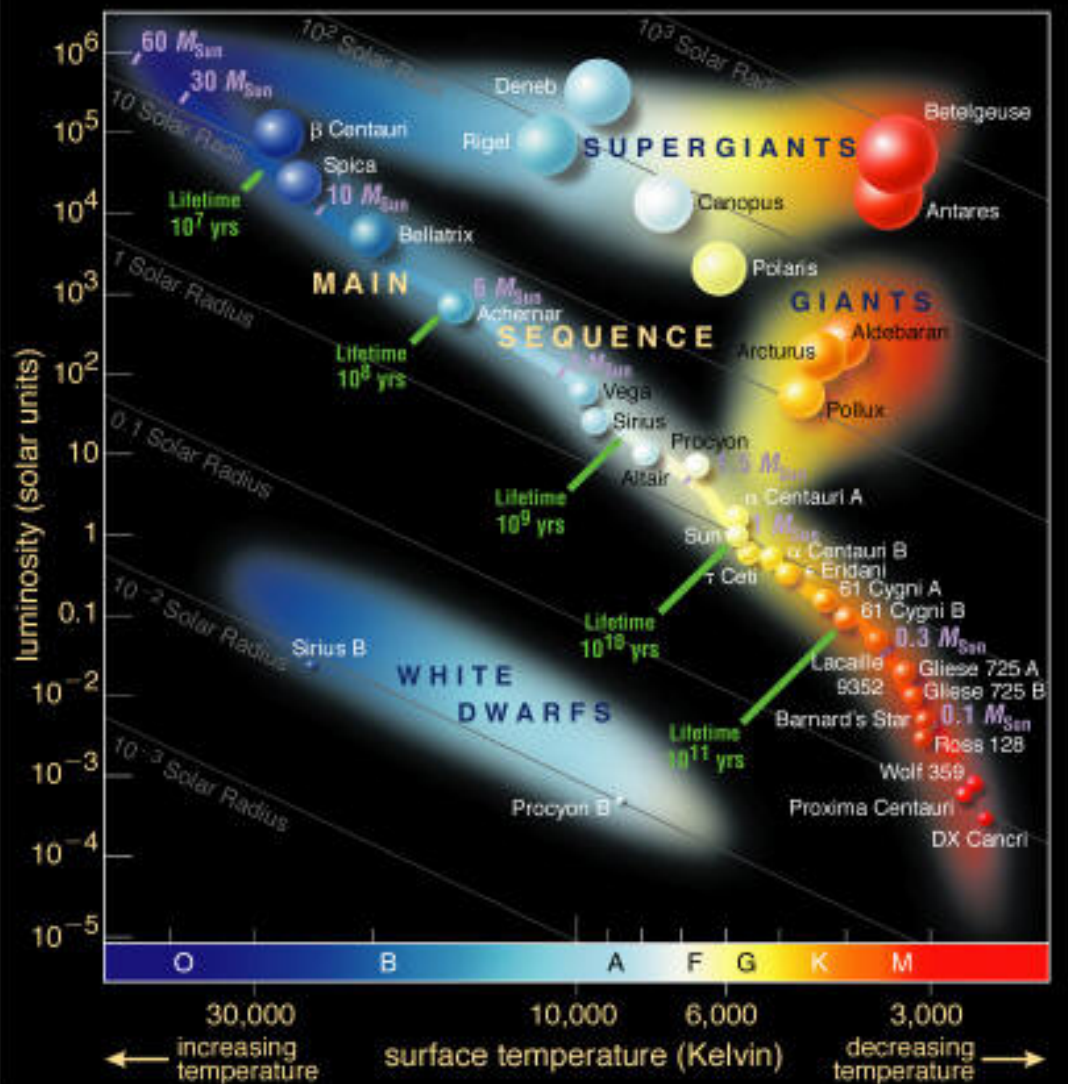
Evolução Estelar

Principal fator que **afeta** a Evolução Estelar:

Natureza do Mecanismo de Produção de Energia

Detalhes das Fases Evolutivas: cálculos complexos

Diagrama de Hertzsprung-Russell (HR)



Relaciona:

Luminosidade vs. Temperatura

Magnitude vs. Tipo Espectral
(diagrama HR “original”)

Magnitude vs. Cor (comumente
chamado “diagrama cor-magnitude”)

É uma das principais
ferramentas dos astrônomos
para o diagnóstico de
populações e grupos estelares

HR: Regiões

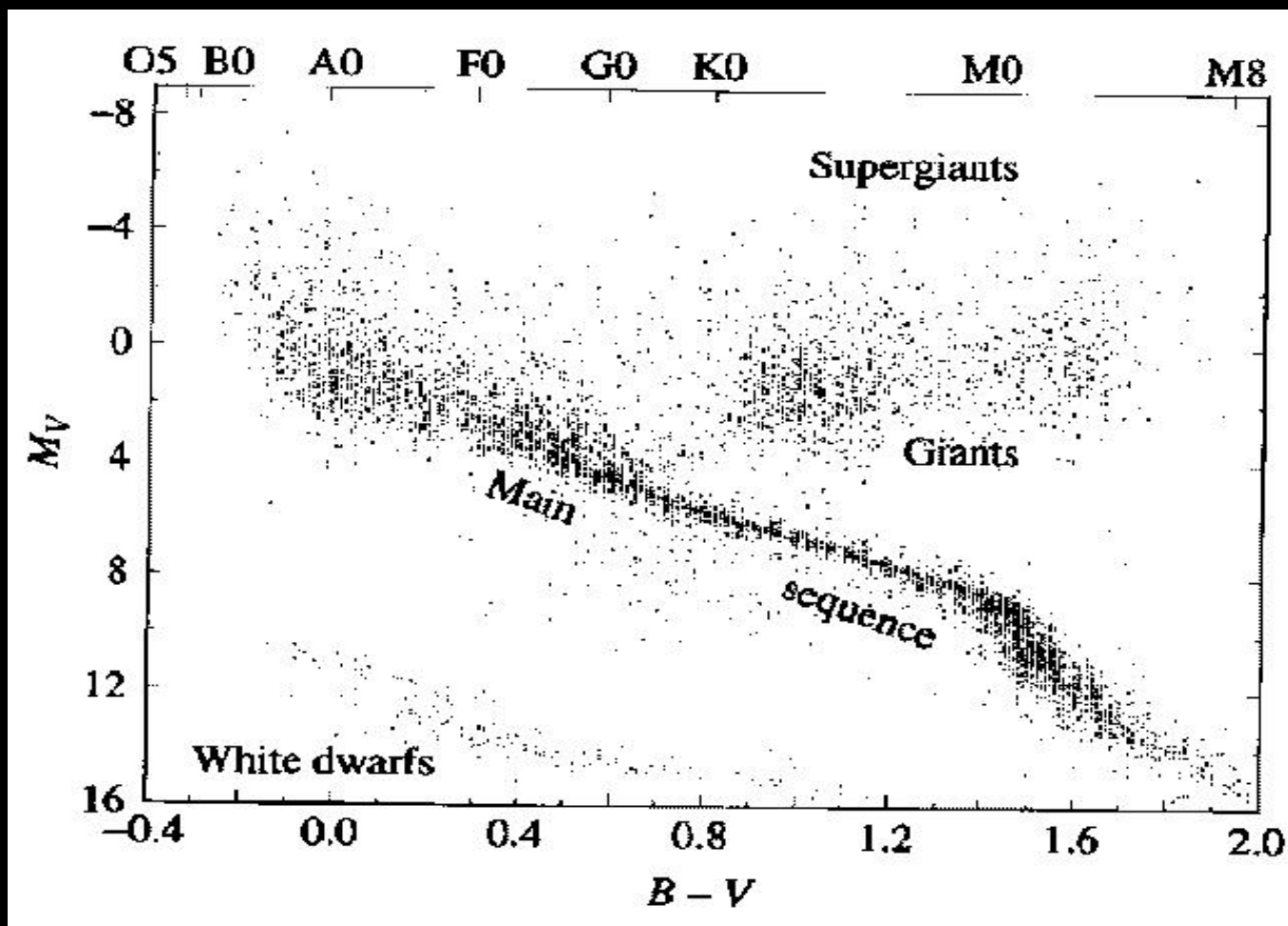
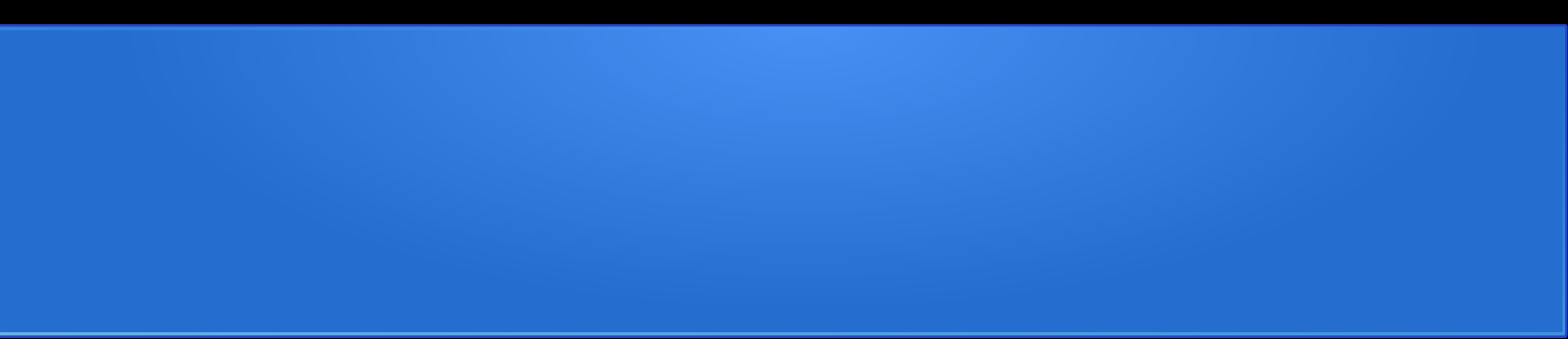


Diagrama HR

Sequência Principal, Ramo das Gigantes Vermelhas, etc...

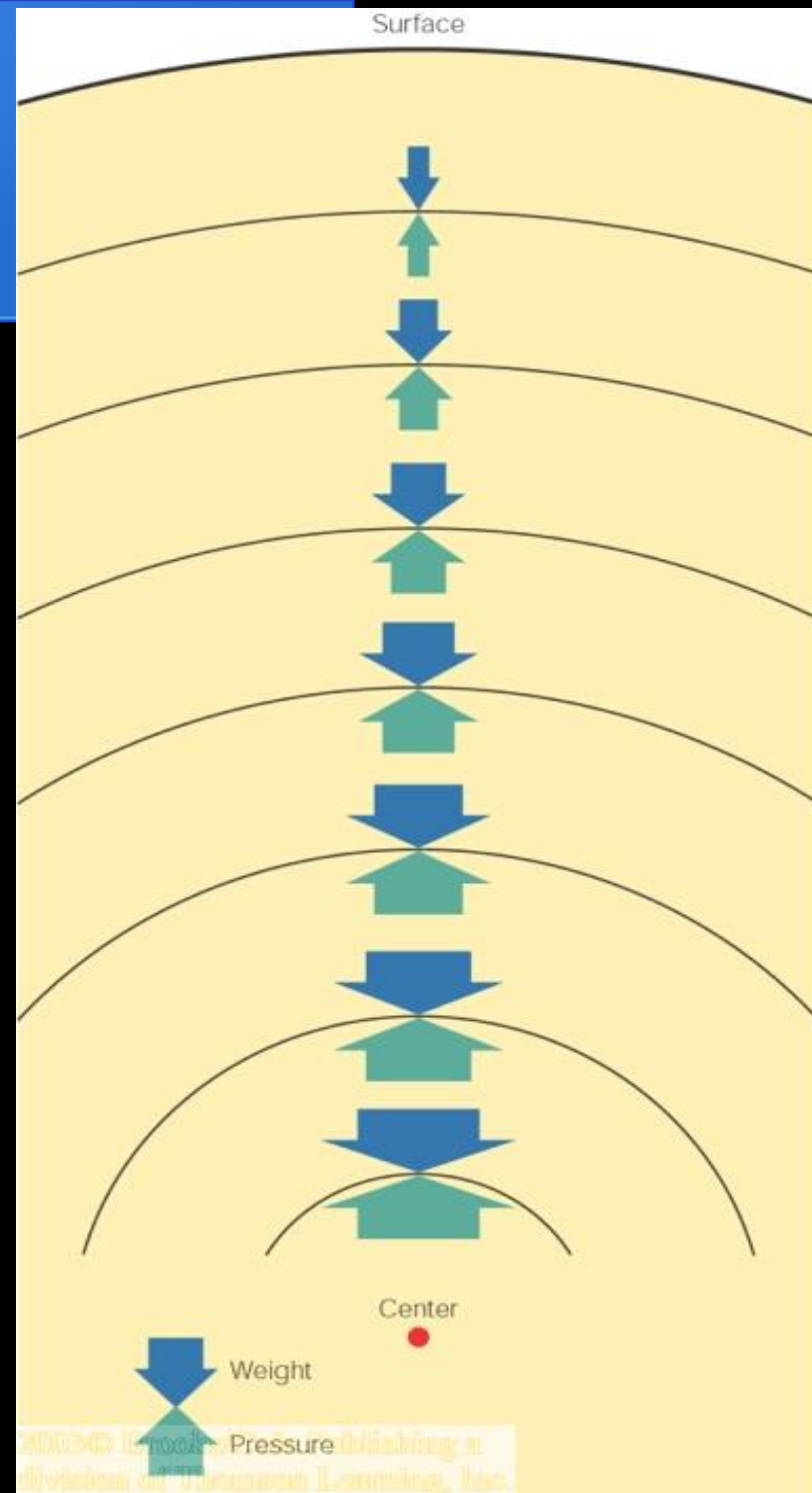
Um fato importante é que ao deixar a Sequência Principal, **TODAS** as estrelas (independente da massa inicial) deixam de ser **QUIMICAMENTE HOMOGÊNEAS**



Por que as estrelas evoluem?

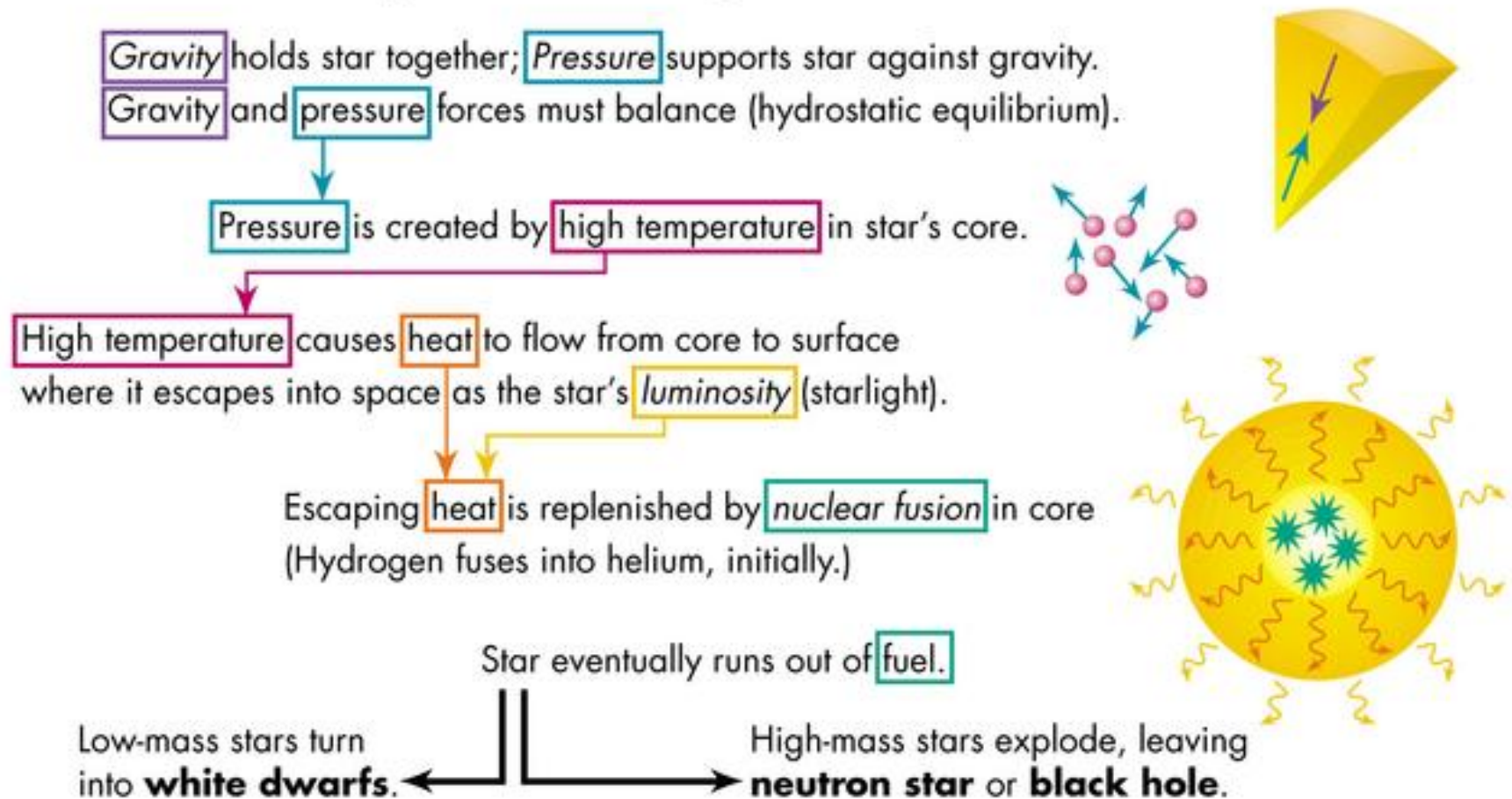
Equilíbrio Hidrostático

- A pressão dos gases quentes no interior da estrela sustém o peso das camadas exteriores da estrela.
- Para a estrela ser estável, a força de pressão deve ser exatamente igual ao peso das camadas externas em um dado ponto da estrela.
- Esta condição determina unicamente a estrutura interior da estrela.
- Essa é uma das razões por que só encontramos estrelas estáveis em faixas estreitas do diagrama HR.



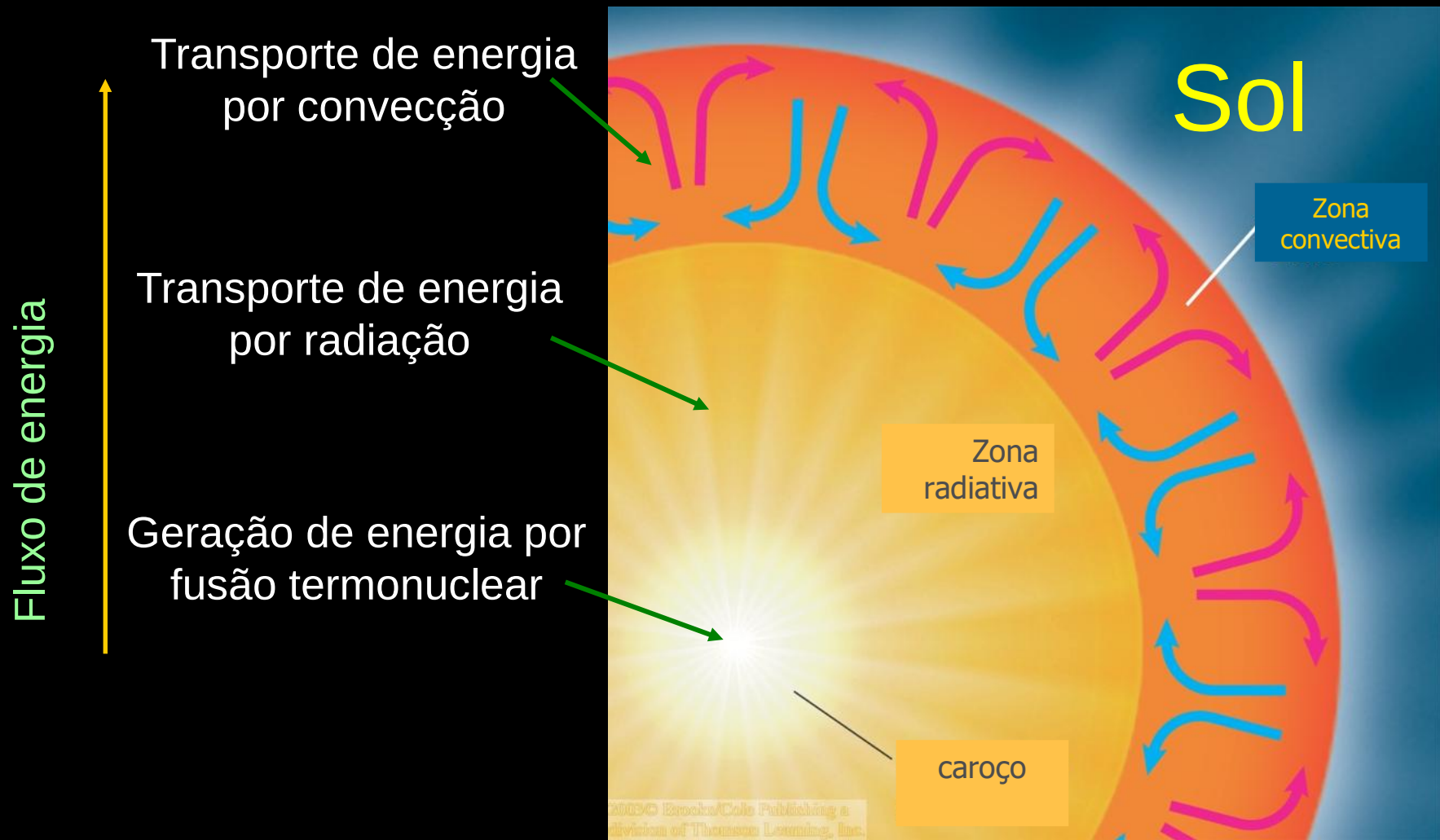
Estrutura estelar

Principles Governing the Structure of a Star



Note: High-mass stars require more pressure to support their greater mass.
Greater pressure is produced by higher temperature.
Higher temperature produces higher luminosity.
Higher luminosity leads to faster fuel usage.
Faster fuel usage means a high-mass star burns out sooner than a low-mass star.

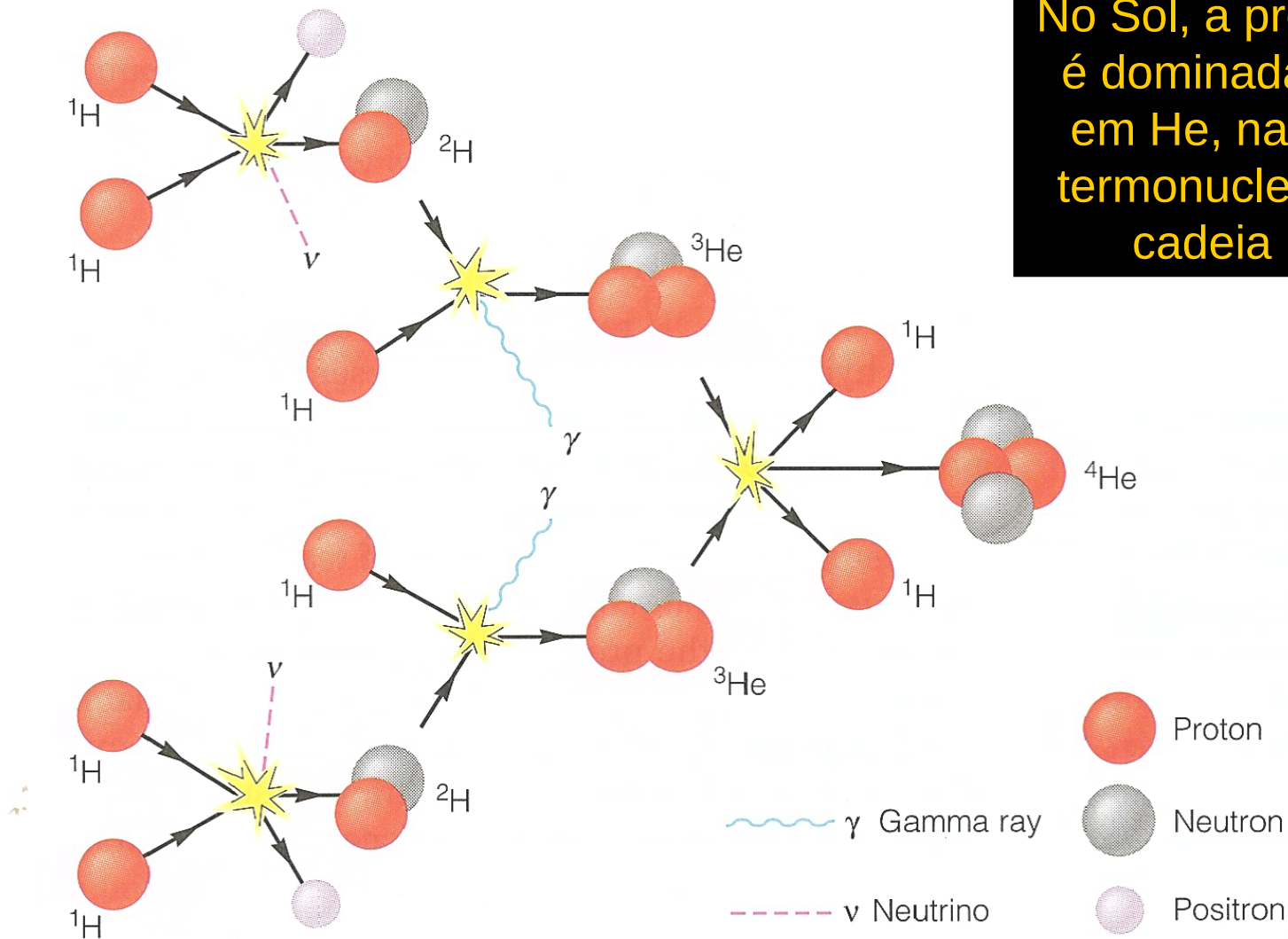
Estrutura de uma estrela solar



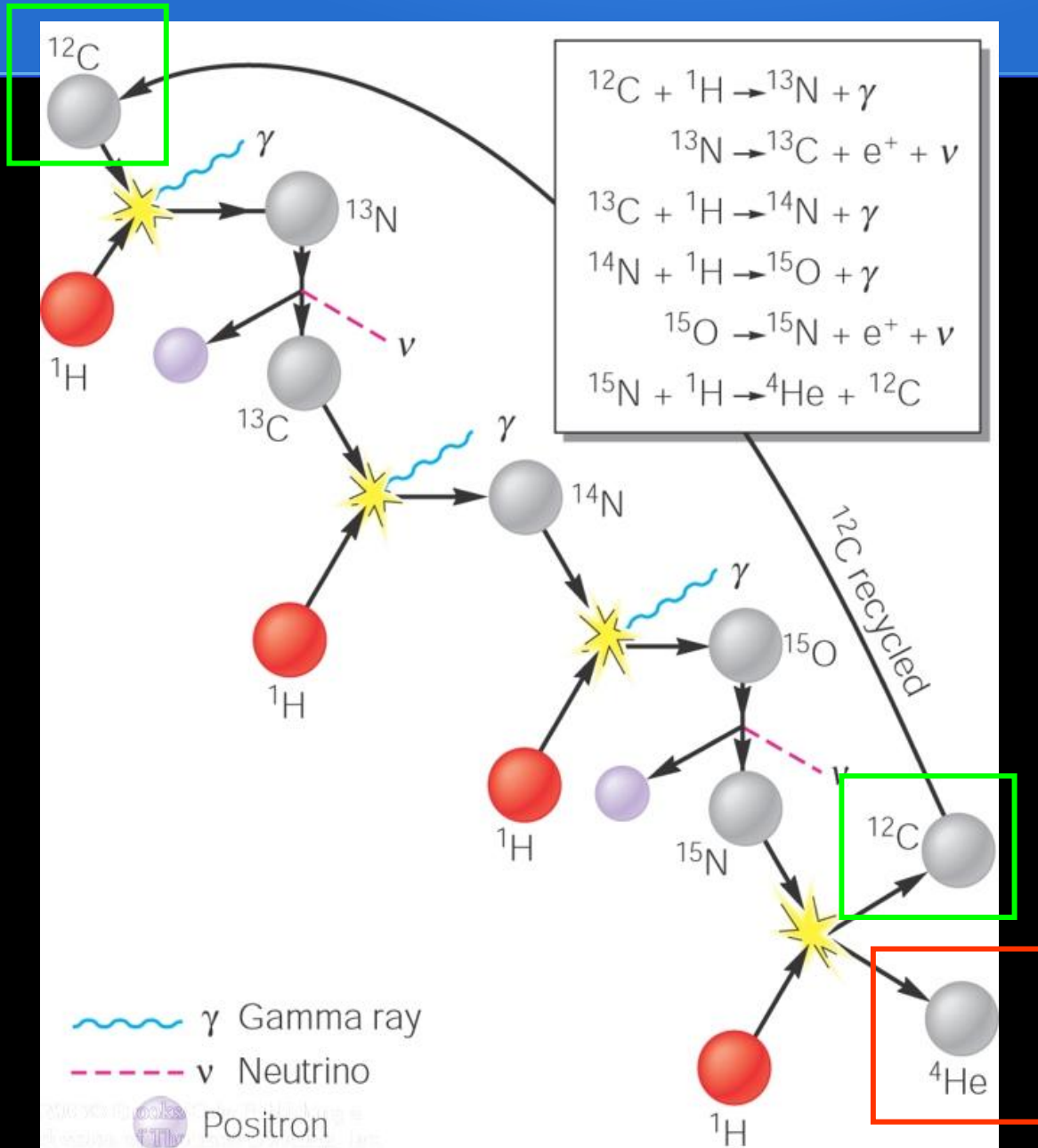
Temperatura, densidade e pressão decrescentes

Cadeia próton-próton

No Sol, a produção de energia é dominada pela fusão do H em He, na rede de reações termonucleares chamada de cadeia próton-próton.

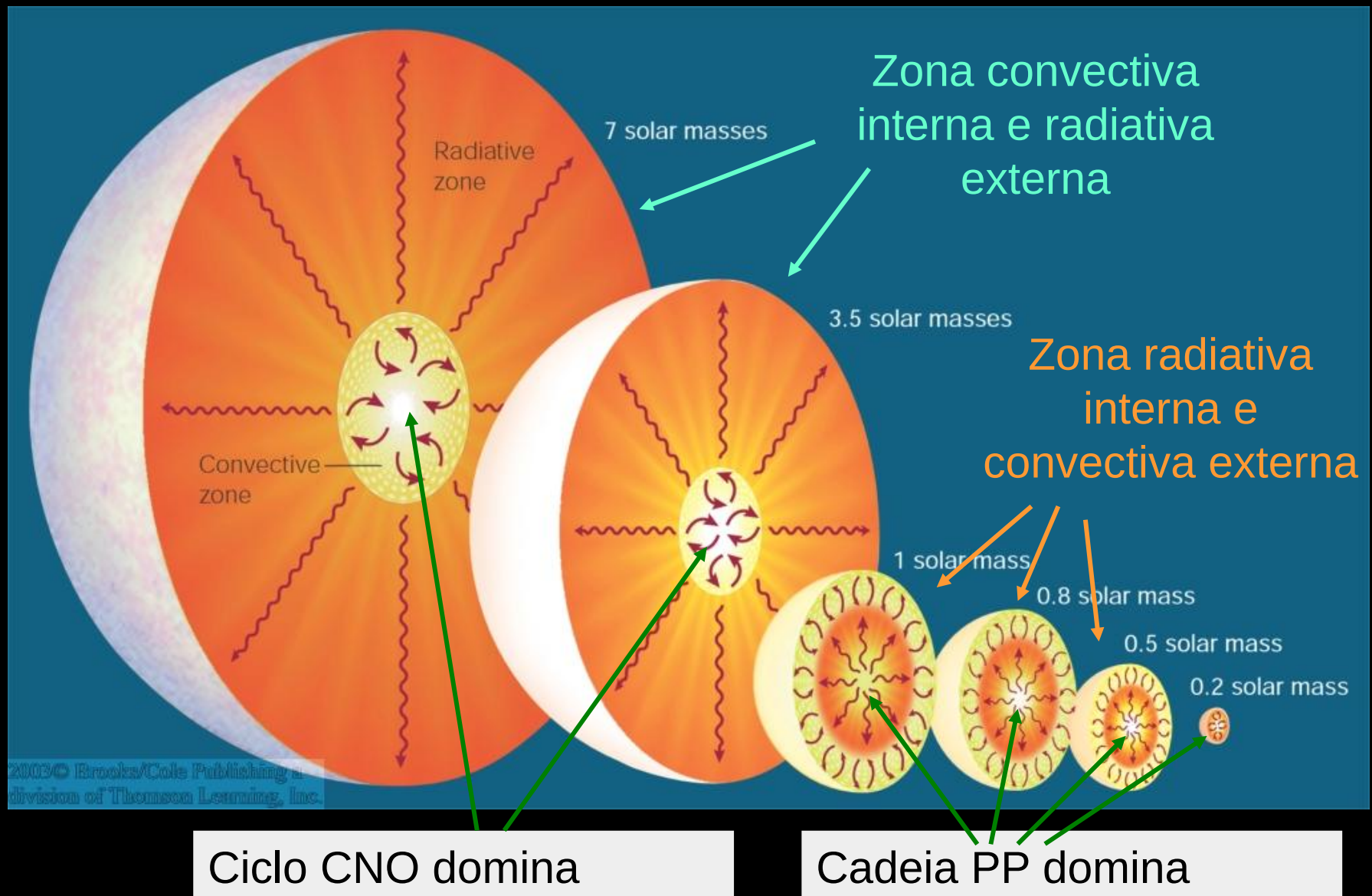


Ciclo CNO



Em estrelas de massa maior que o Sol, a produção de energia é dominada por uma rede de reações mais complexa: o ciclo CNO.

Mudanças estruturais nas estrelas



Evolução de estrela com 1 massa solar

Sol

**PAY
ATTENTION!**

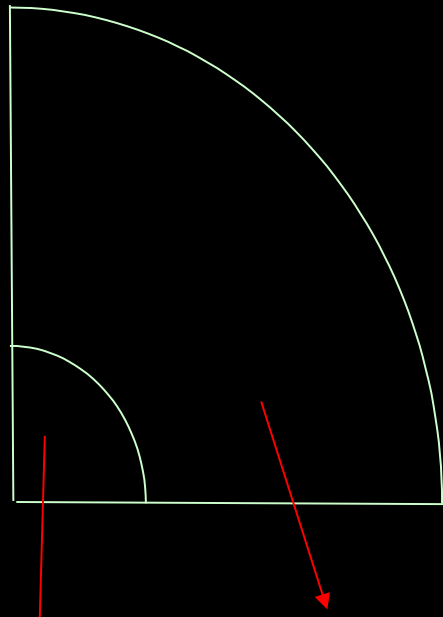


Estrelas solares passam pelas seguintes fases evolutivas:

- Sequência principal
- Ramo das subgigantes
- Ramo das gigantes
- Ramo horizontal
- Ramo assintótico das gigantes
- Nebulosa planetária
- Anã branca

Evolução na SP

Fase anã

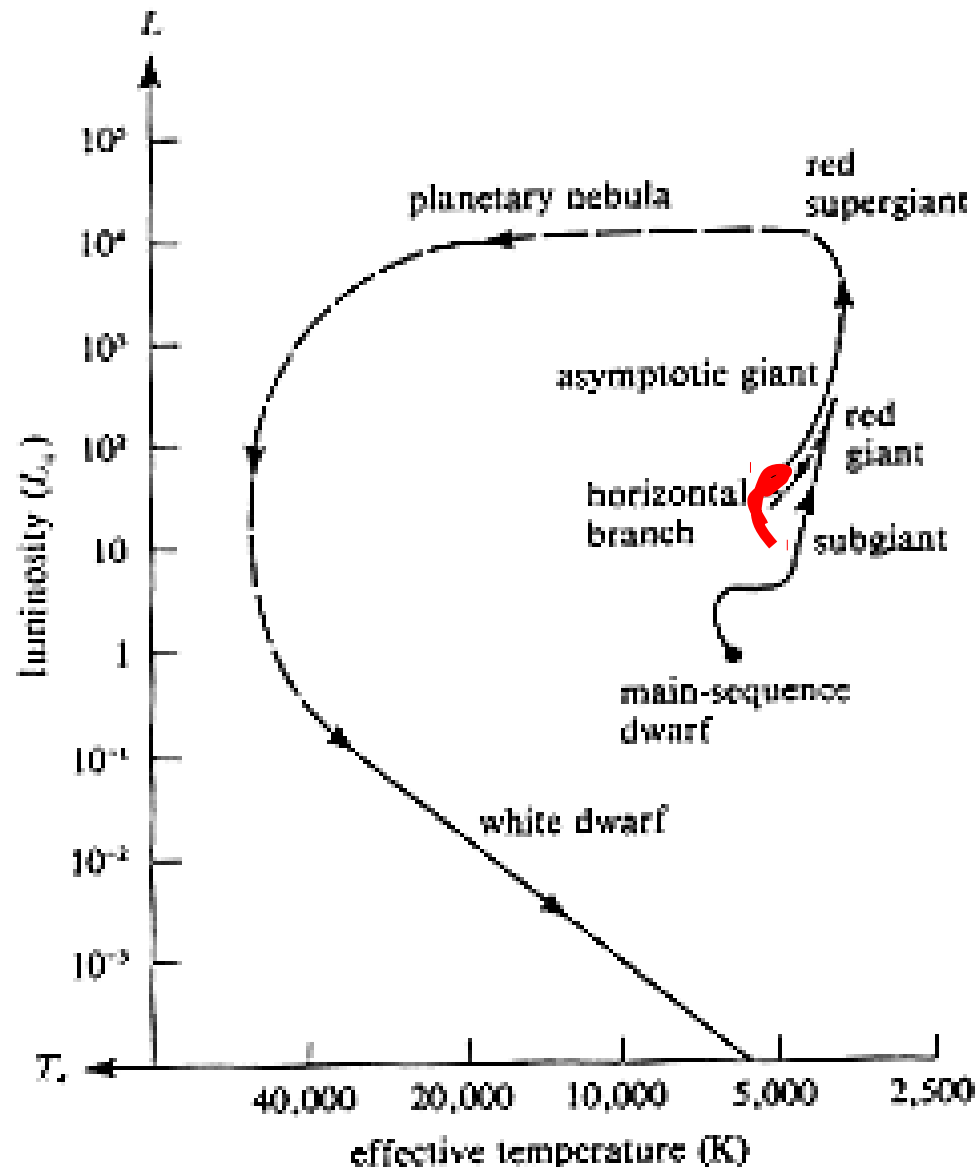


envoltório de H-He

Queima de H em He,
no caroço estelar

- As estrelas iniciam suas vidas na Sequência Principal com, aproximadamente, 75% H e 25% He.
- No caroço, H é convertido em He
 - a fração de He (e o peso molecular médio) aumenta
 - para manter o equilíbrio hidrostático, o caroço contrai-se.
 - a temperatura no caroço aumenta
 - a taxa de produção de energia cresce

Na SP

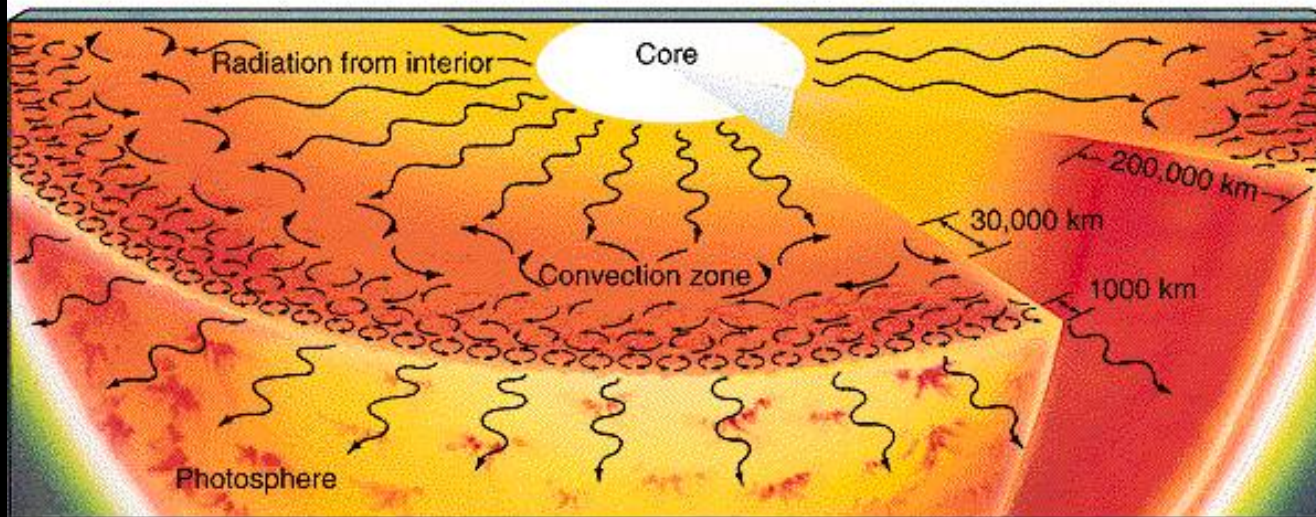


Na superfície:

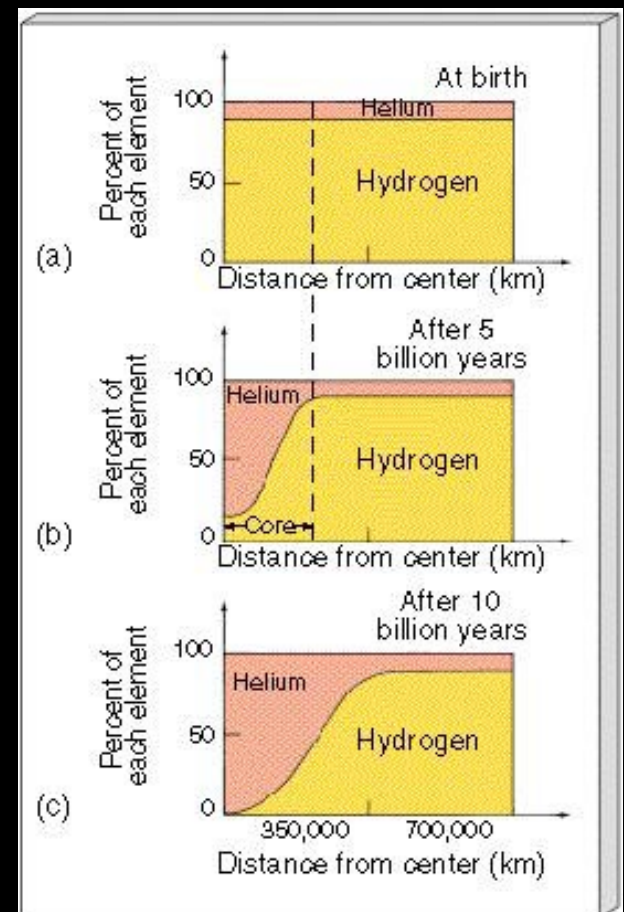
- o aumento na taxa de produção de energia leva a um aumento na luminosidade da estrela.
- O envoltório é aquecido e se expande.

Duração: 10 bilhões de anos para estrelas semelhantes ao Sol.

Estrutura de uma anã solar

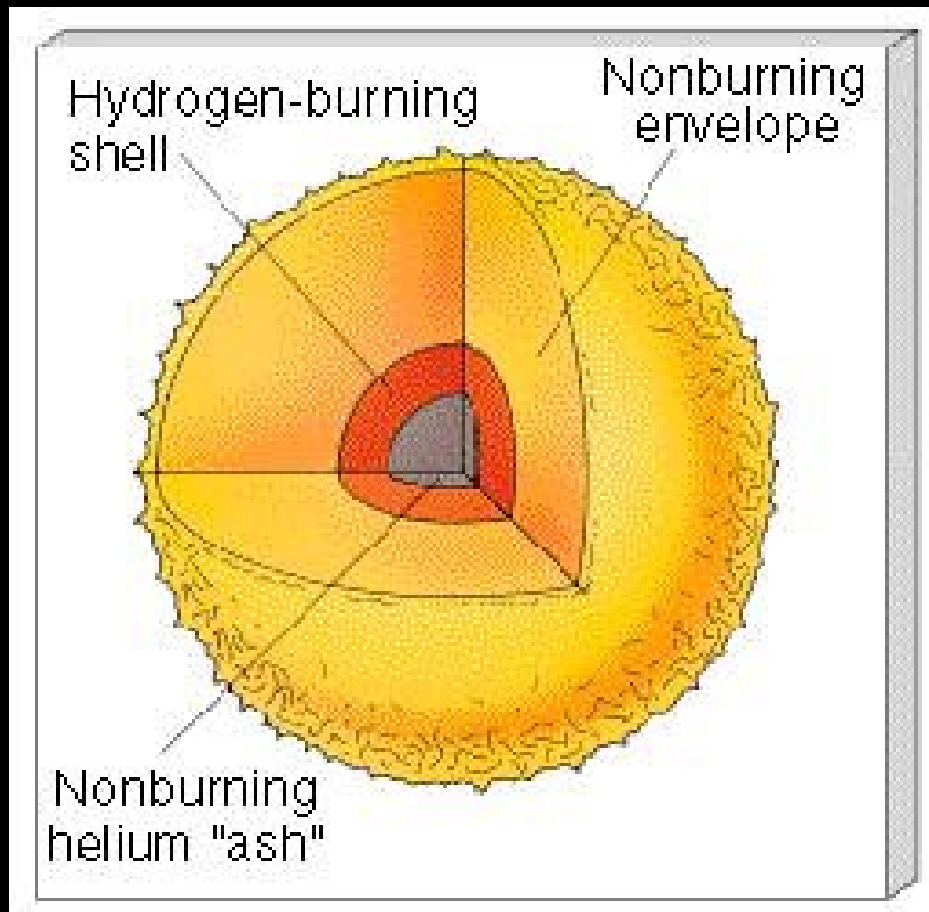


- caroço onde há queima de H
- zona radiativa circundante ao caroço
- envoltório convectivo



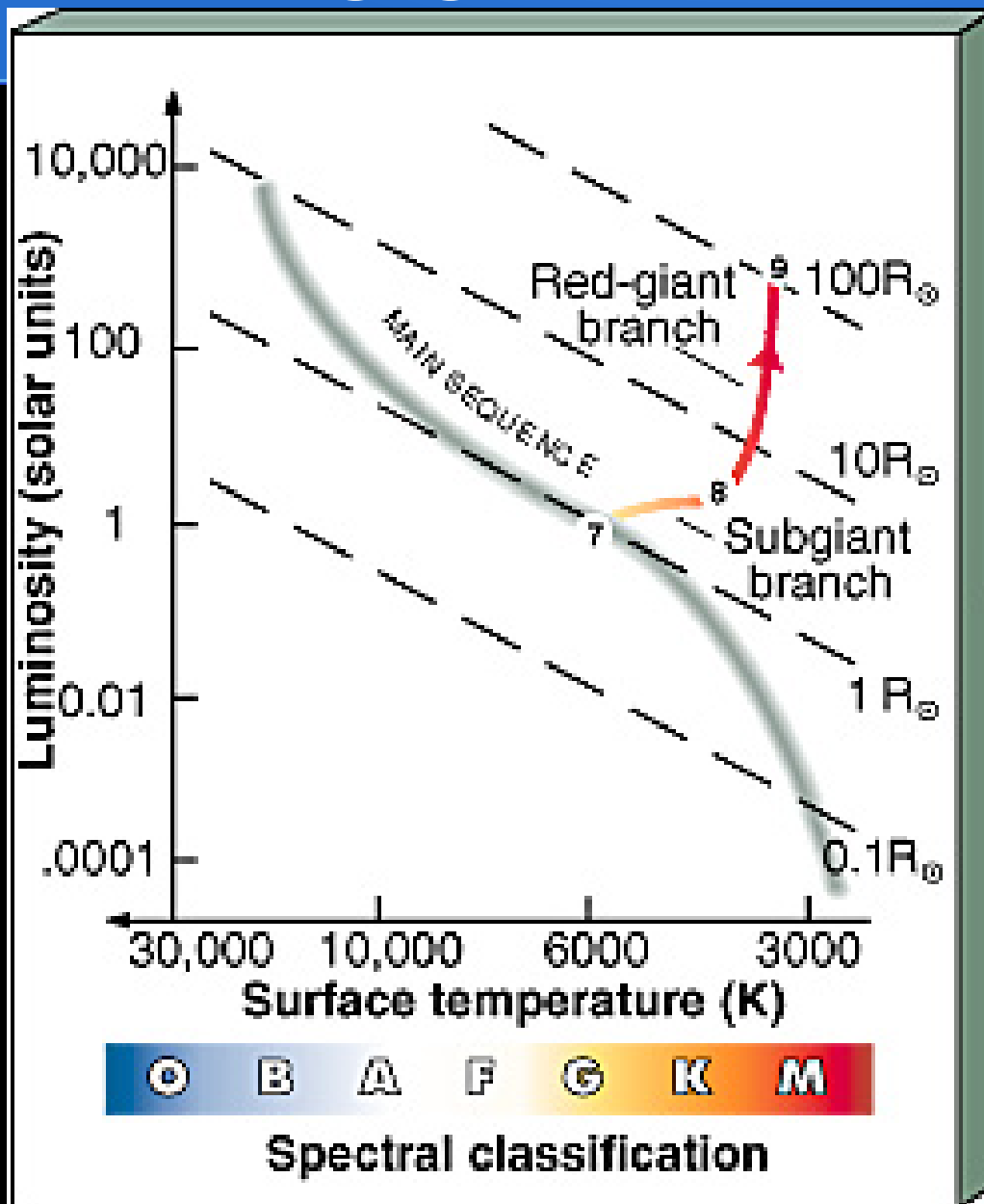
Após a sequência principal

Fase de subgigante



- Quando acaba o H no caroço, não há mais equilíbrio entre a pressão e o peso das camadas superiores da estrela.
- O caroço contrai-se e aquece-se
- A queima do H tem início numa camada circundante (concha) ao caroço
- As “cinzas” dessa queima (átomos de He) juntam-se ao caroço em contração, aumentando sua massa
- A taxa de geração de energia aumenta lentamente, aquecendo o envoltório

Sub-gigante



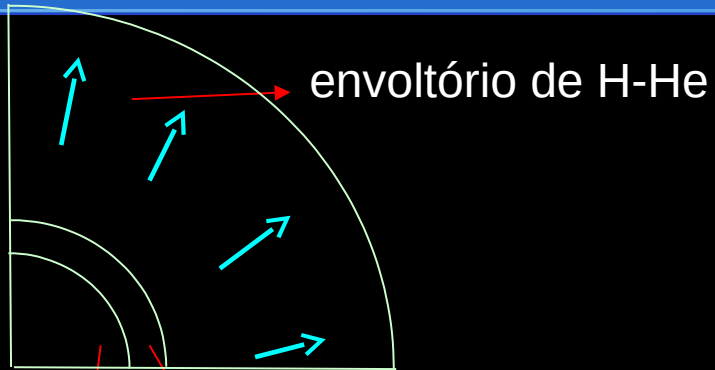
Na superfície:

- a luminosidade aumenta ligeiramente
- raio da estrela continua a aumentar
- a temperatura superficial decresce

Duração: cerca de 1 bilhão de anos para estrelas semelhantes ao Sol

Após a sequência principal

Gigante Vermelha

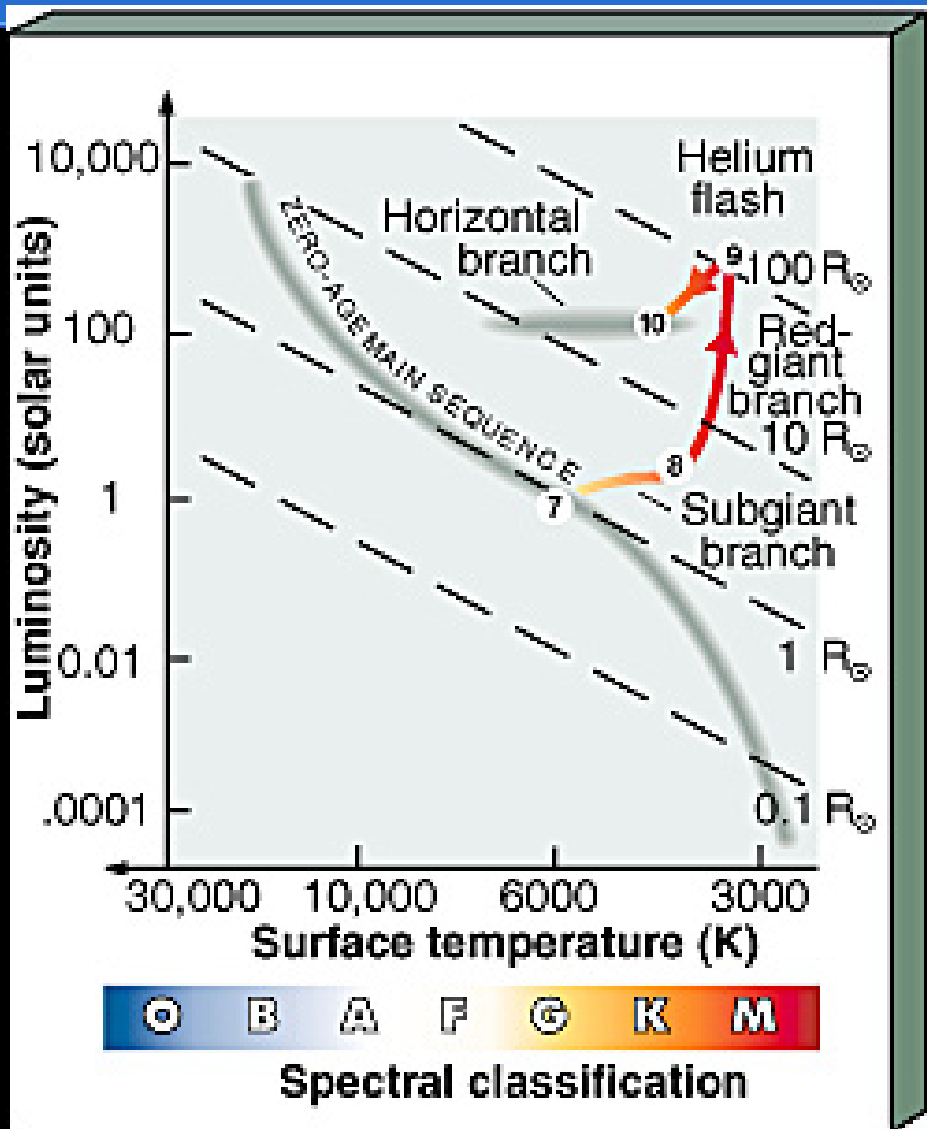


Queima de H em He,
em concha

Caroço de He
suportado por pressão
de degenerescência
dos elétrons.

- O caroço se torna tão denso que passa a ser suportado pela pressão de degenerescência dos elétrons
- o caroço continua a crescer e a se contrair à medida que incorpora as cinzas da camada de queima do H.
- a taxa de queima de H aumenta, conforme a concha for mais e mais aquecida pelo caroço em contração.
- Nem toda a energia proveniente da concha é levada por radiação — o envoltório se torna convectivo.

RGB: Na superfície



Na superfície:

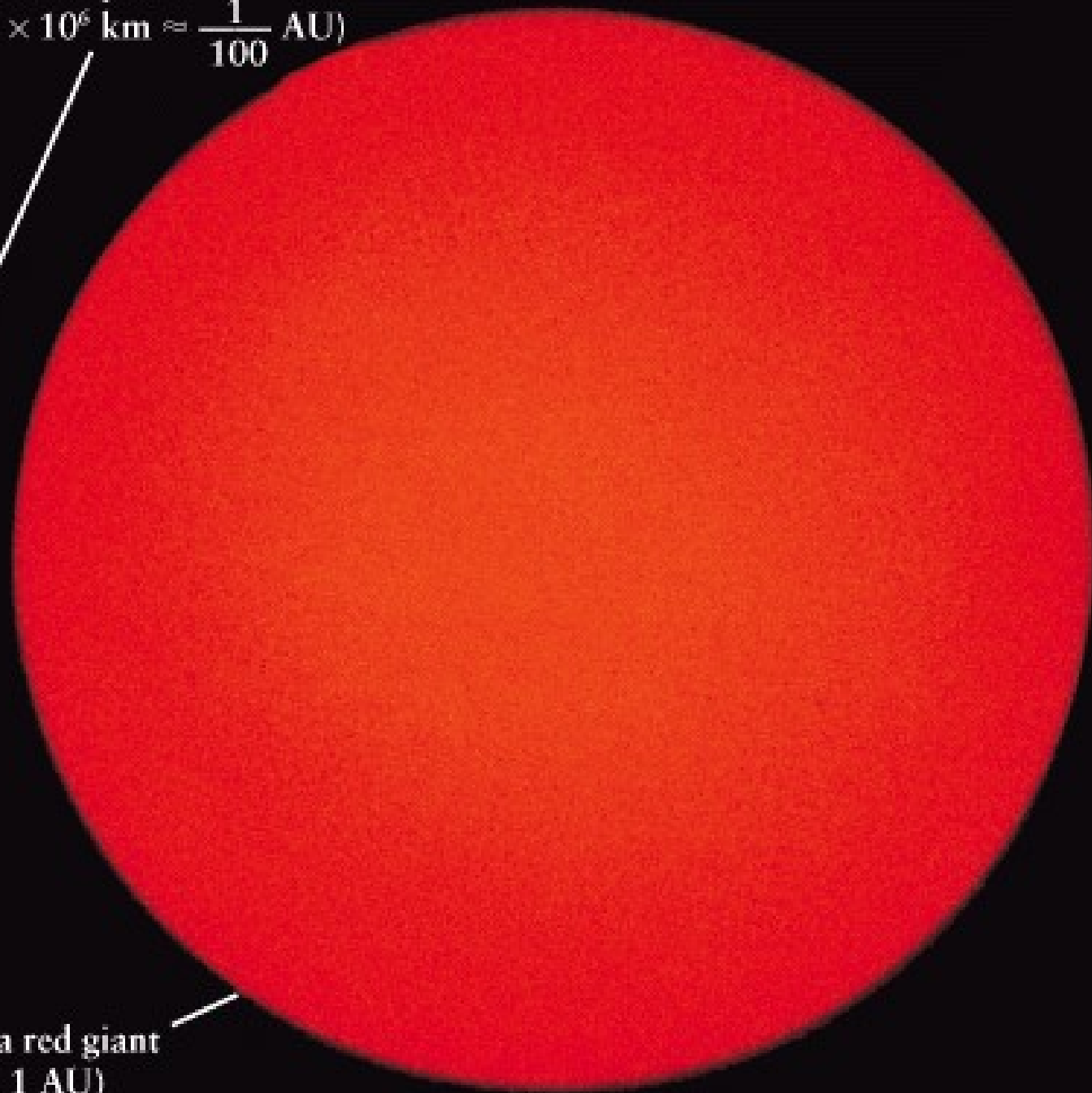
- A luminosidade aumenta dramaticamente
- a temperatura superficial decai ligeiramente
- o raio estelar aumenta dramaticamente
- A estrela perde muita massa através de ventos estelares

Duração: cerca de 1 bilhão de anos para estrelas solares

The Sun as a main-sequence star
(diameter = 1.4×10^6 km $\approx \frac{1}{100}$ AU)

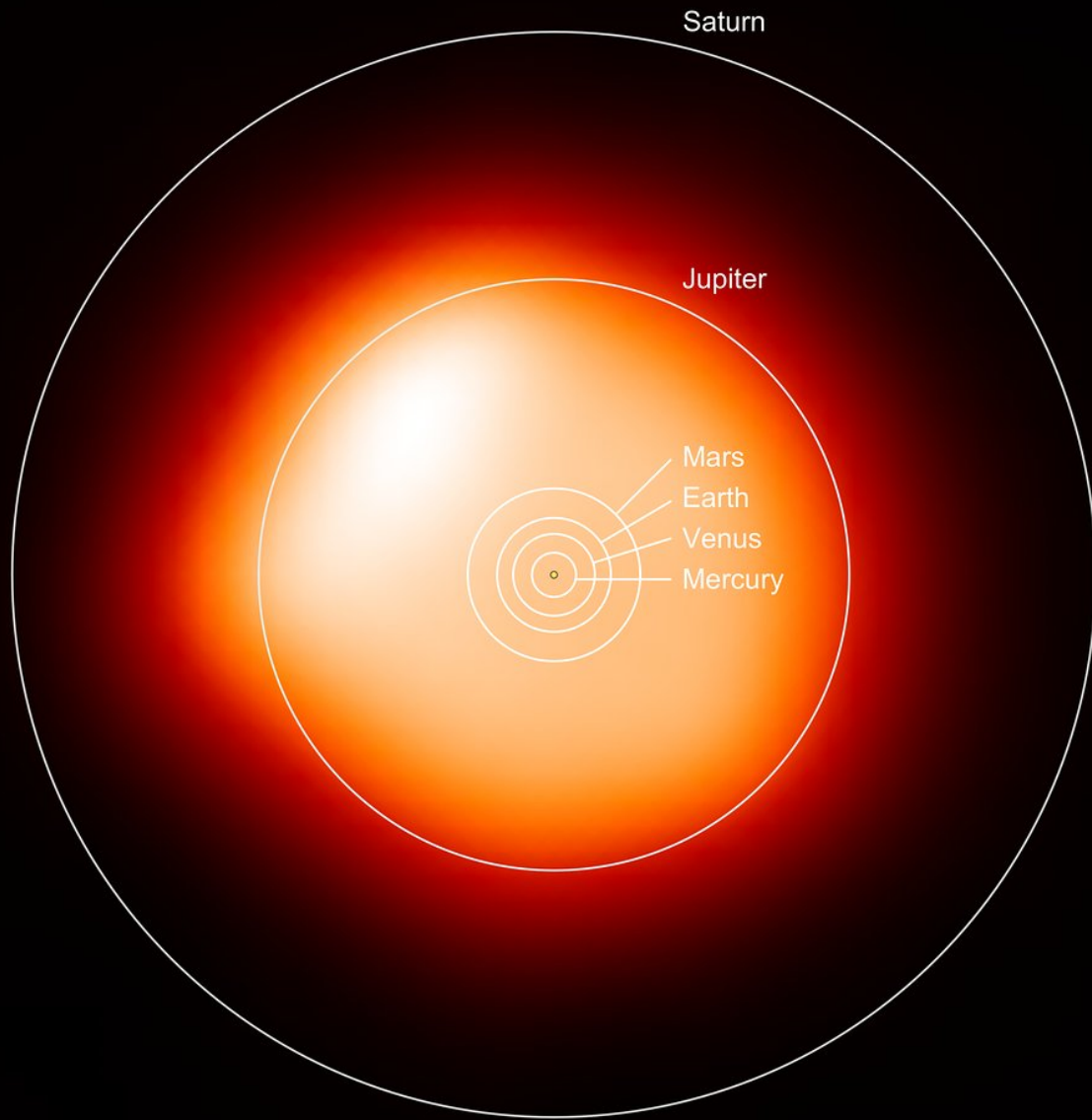


The Sun as a red giant
(diameter ≈ 1 AU)

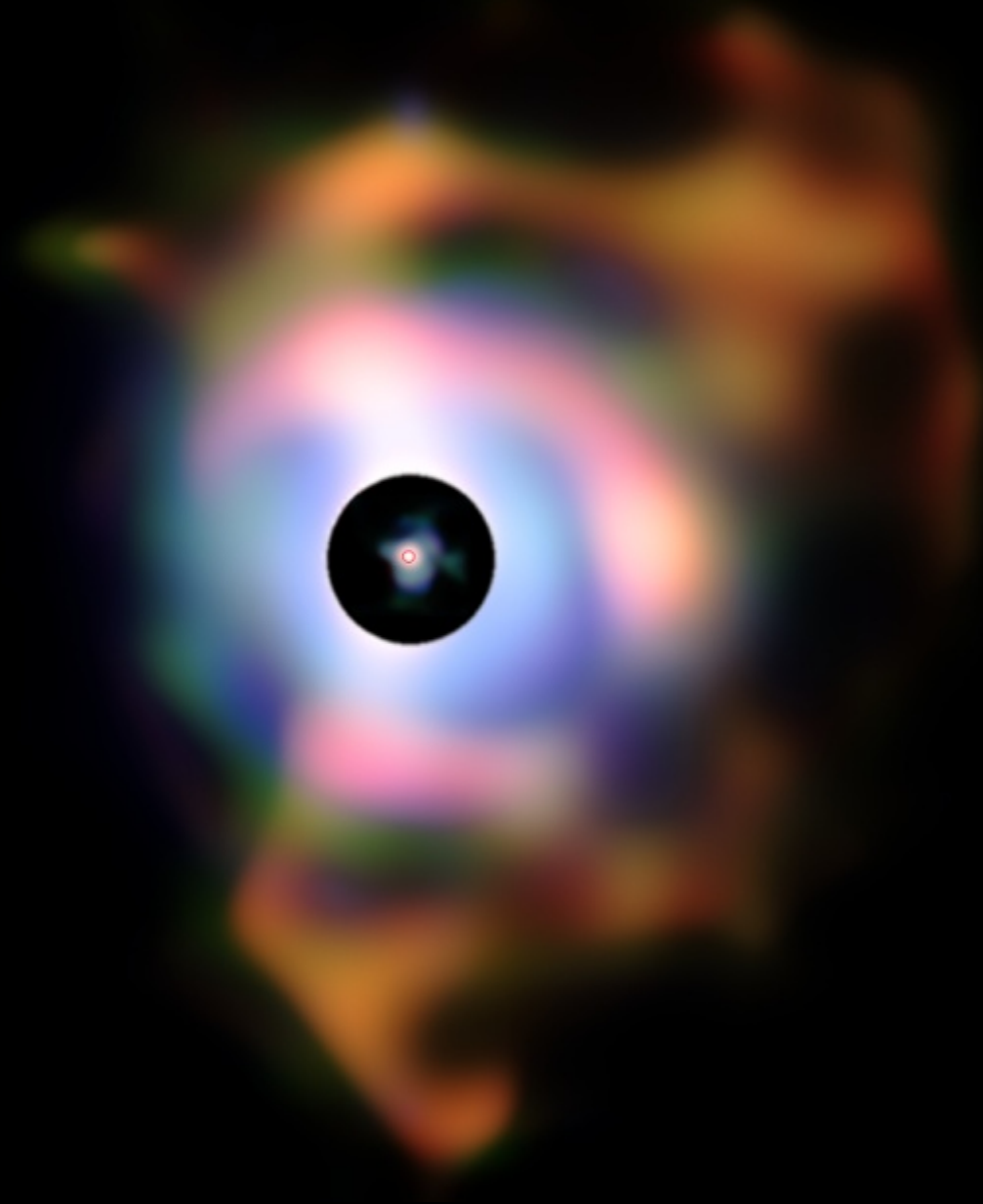




Betelgeuse

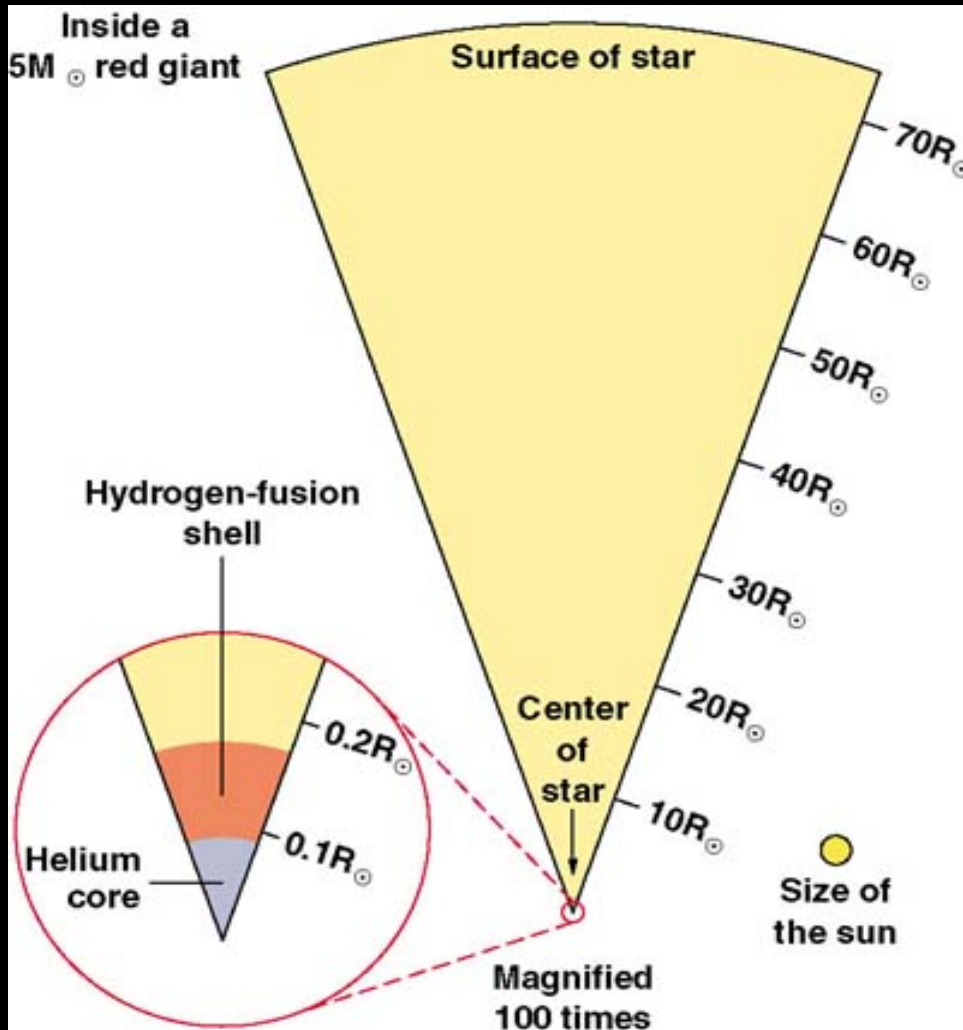


0.015"



Stardust and Betelgeuse
ESO, Pierre Kervella (LESIA, Observatoire de Paris), et al.

Estrutura de uma gigante vermelha

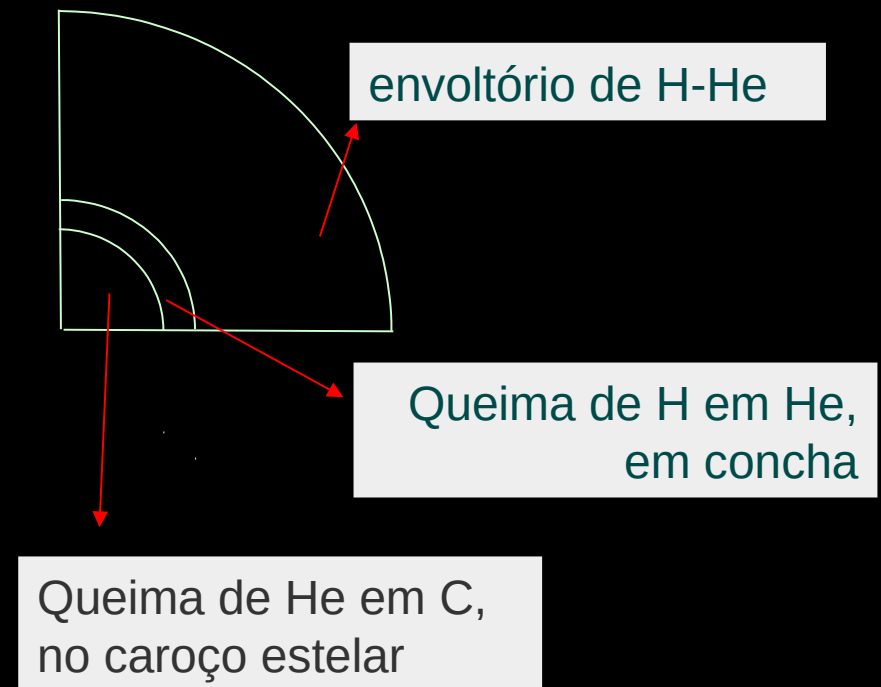


- Estrutura interna de uma gigante vermelha:
 - caroço em contração e em aquecimento
 - queima de H em concha
 - envoltório em expansão e em resfriamento

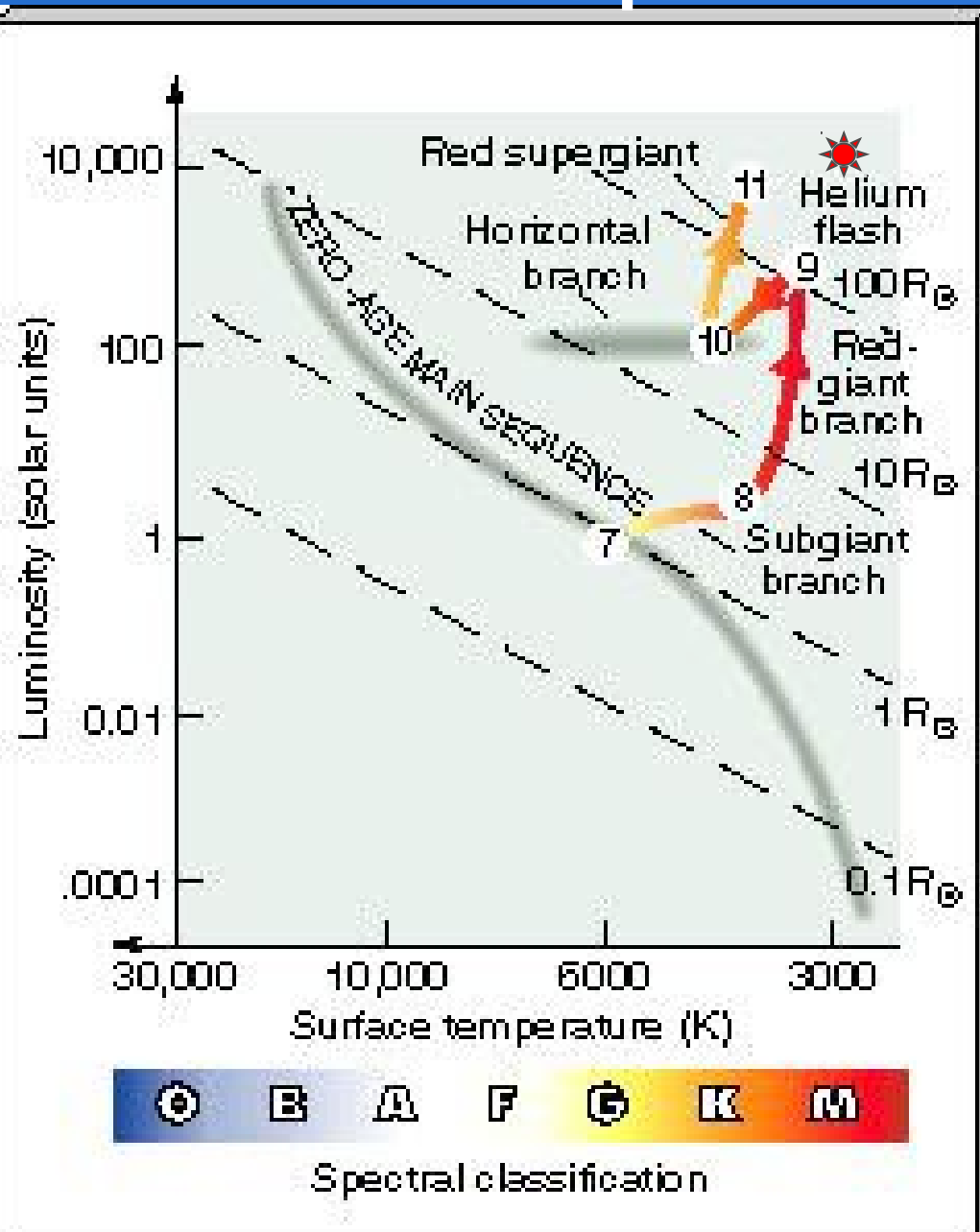
Após a sequência principal

Gigante do ramo horizontal (HR)

- Uma vez que a temperatura e a densidade no caroço sejam suficientemente grandes, ocorre a queima do He através do processo alfa triplo. Esta ignição, chamada de *flash* do He, é violenta e rearranja completamente a estrutura da estrela.
- o caroço inicialmente se expande e resfria-se.
- a queima do He prossegue hidrostaticamente no caroço.
- a taxa de geração de energia é menor do que a de uma gigante vermelha.



HR: Na superfície



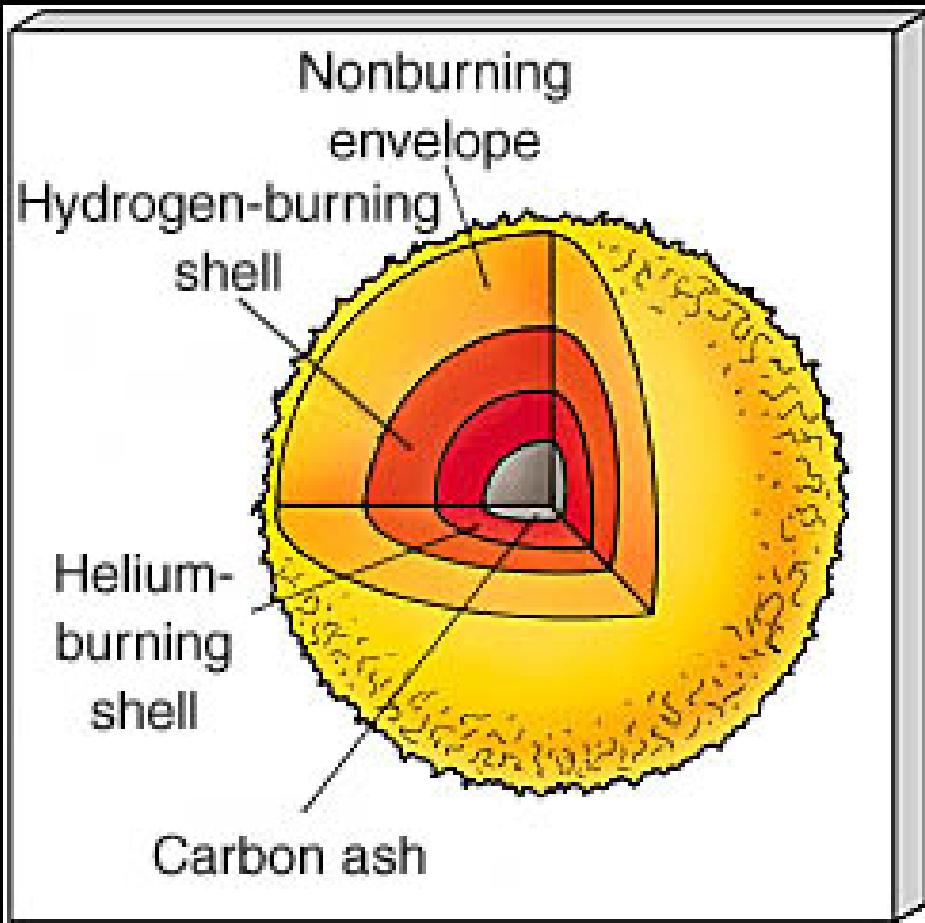
Na superfície:

- a luminosidade mantém aprox. constante e menor do que a de uma gigante vermelha
- o raio é menor do que o de uma gigante vermelha

Duração: cerca de 0.1 bilhão de anos

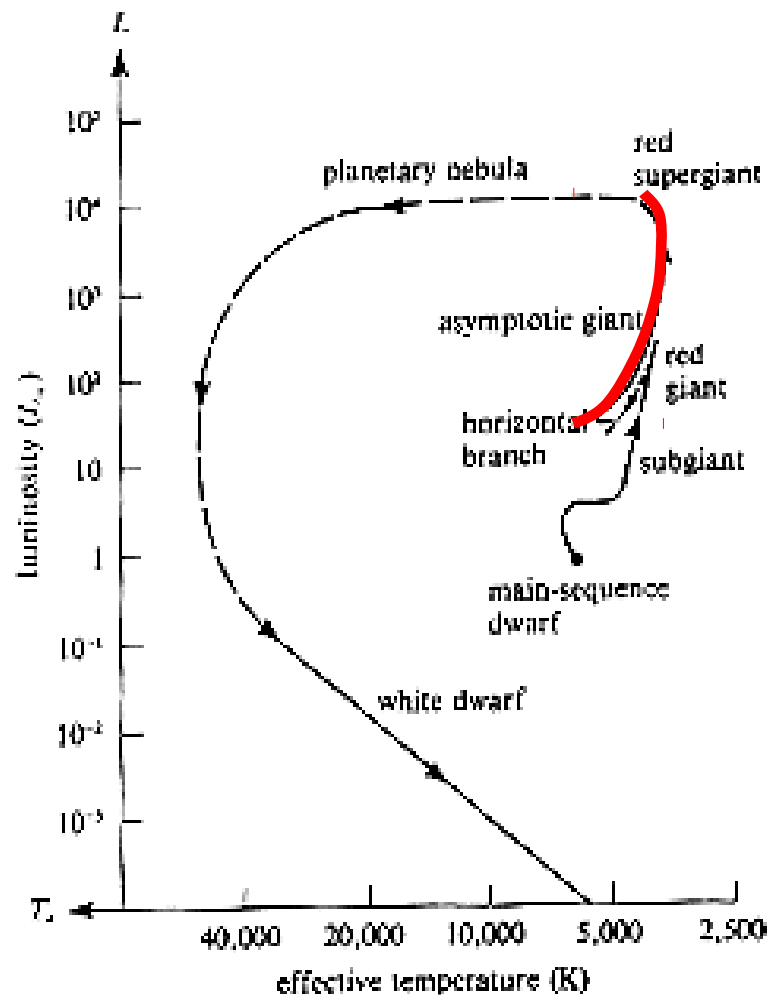
Após a sequência principal

Gigante do Ramo Assintótico (AGB)



- Quando todo o He no caroço é consumido:
 - o caroço contrai-se até ser novamente suportado por pressão de degenerescência dos elétrons.
 - começa a queima de He em concha circundante ao caroço.

AGB: Na superfície...

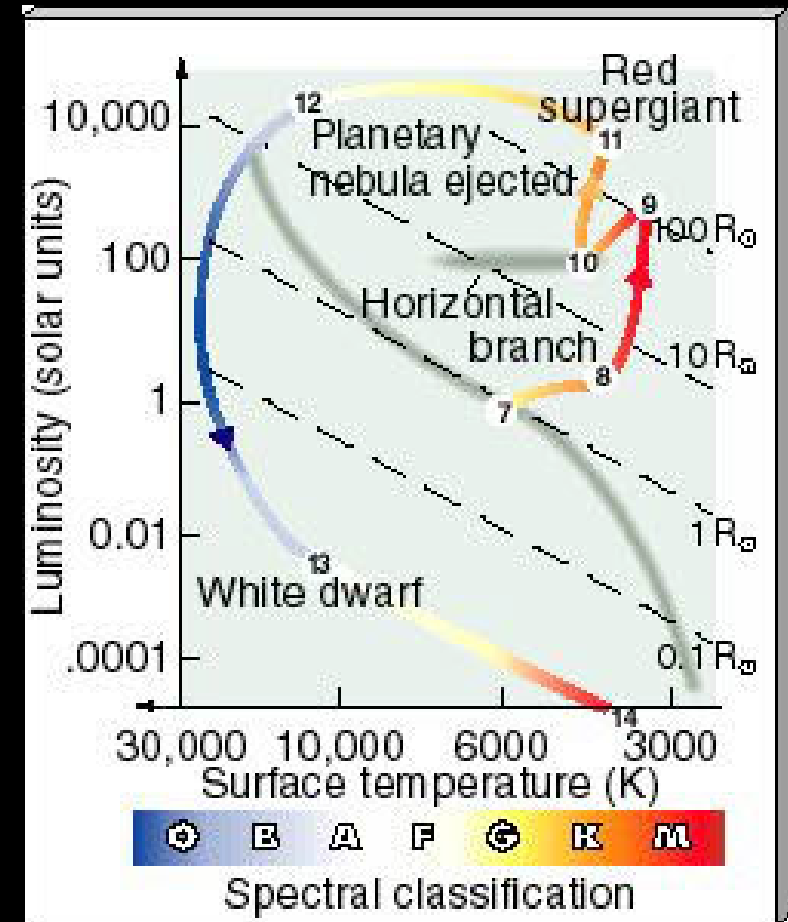


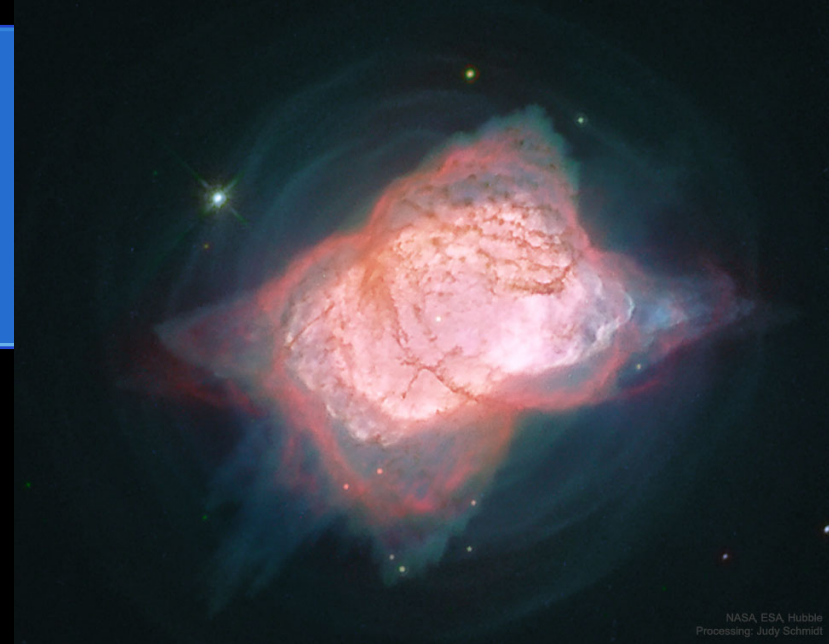
Na superfície:

- a luminosidade aumenta
- a temperatura varia pouco
- o raio da estrela aumenta dramaticamente
- a estrela perde massa através de pulsações

Nebulosa planetária e anã branca

- Em estrelas de baixa massa, o caroço nunca queima C. Entretanto, a taxa de queima de He na concha é muito instável, e a estrela pulsa, levando à expulsão do envoltório, que forma uma nebulosa planetária.
- O caroço desta estrela, por sua vez, sobra como uma anã branca, que gradativamente vai esfriando.





Bright Planetary Nebula NGC 7027 from Hubble
Image Credit: Hubble, NASA, ESA; Processing & License: Judy Schmidt



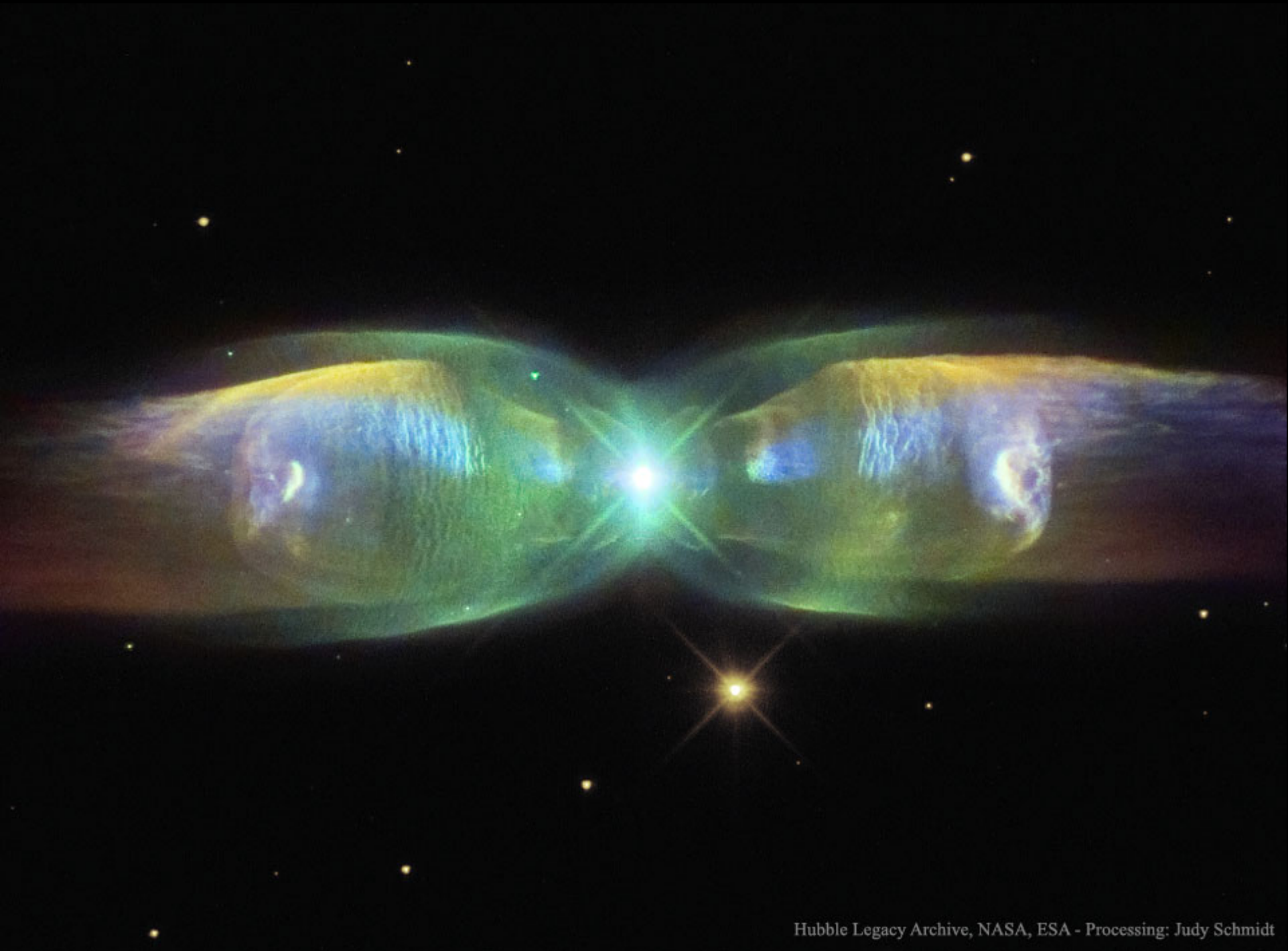
The Butterfly Nebula from Hubble
Image Credit: NASA, ESA, Hubble, HLA;
Reprocessing & Copyright: Jesús M.Vargas & Maritxu Poyal



The Helix Nebula from CFHT
Image Credit: CFHT, Coelum, MegaCam, J.-C. Cuillandre (CFHT) & G. A. Anselmi (Coelum)



The Helix Nebula from Blanco and Hubble
Image Credit: C. R. O'Dell, (Vanderbilt) et al. ESA, NOAO, NASA

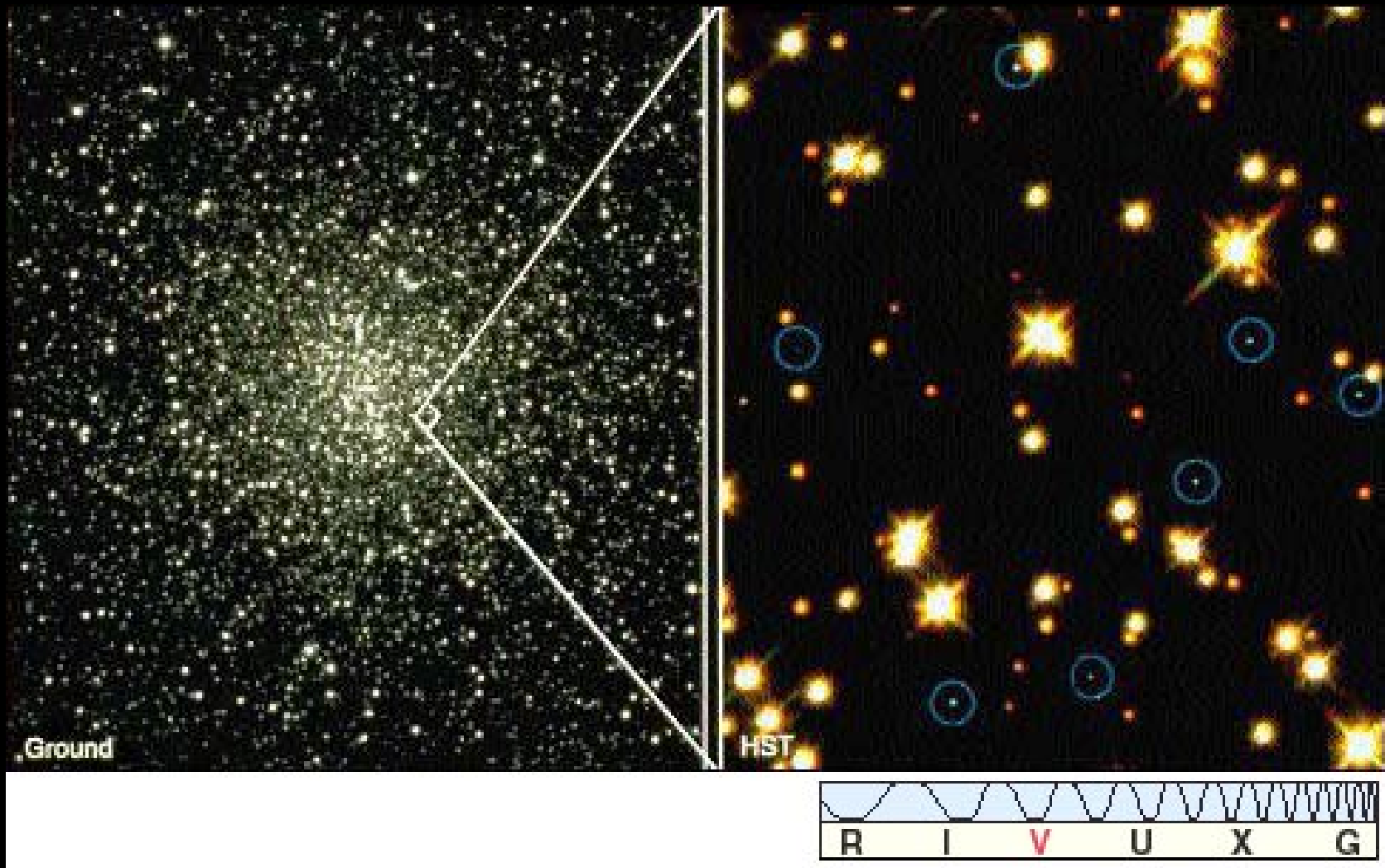


Hubble Legacy Archive, NASA, ESA - Processing: Judy Schmidt

M2-9: Wings of a Butterfly Nebula

Image Credit: Hubble Legacy Archive, NASA, ESA - Processing: Judy Schmidt

As ínfimas anãs brancas



Anãs brancas em um aglomerado globular

composição química do núcleo das anãs brancas

- **He**, até cerca de 0,46 e 0,50 M_{Sol} , para $Z=0,04$ e $Z=0,0001$
- **C/O**, até cerca de 1,05 M_{Sol}
- **O/Ne/Mg**, acima de cerca de 1,05 M_{Sol}
- *Mas a composição do núcleo depende da metalicidade das progenitoras e se elas eram binárias*

SOL

(Sackmann et al. 1993)

Tempo de **contração**: 50 Myr

Tempo gasto na **SP**: 12 Gyr

Tempo gasto no **RGB**: 1 Gyr

Tempo gasto no **HB + AGB**: 0.5 Myr

Consequências:

Luminosidade no fim da SP: $2.2L_{\text{sol}}$

MAS, para $L=1.4L_{\text{sol}} \Rightarrow$ fim dos oceanos

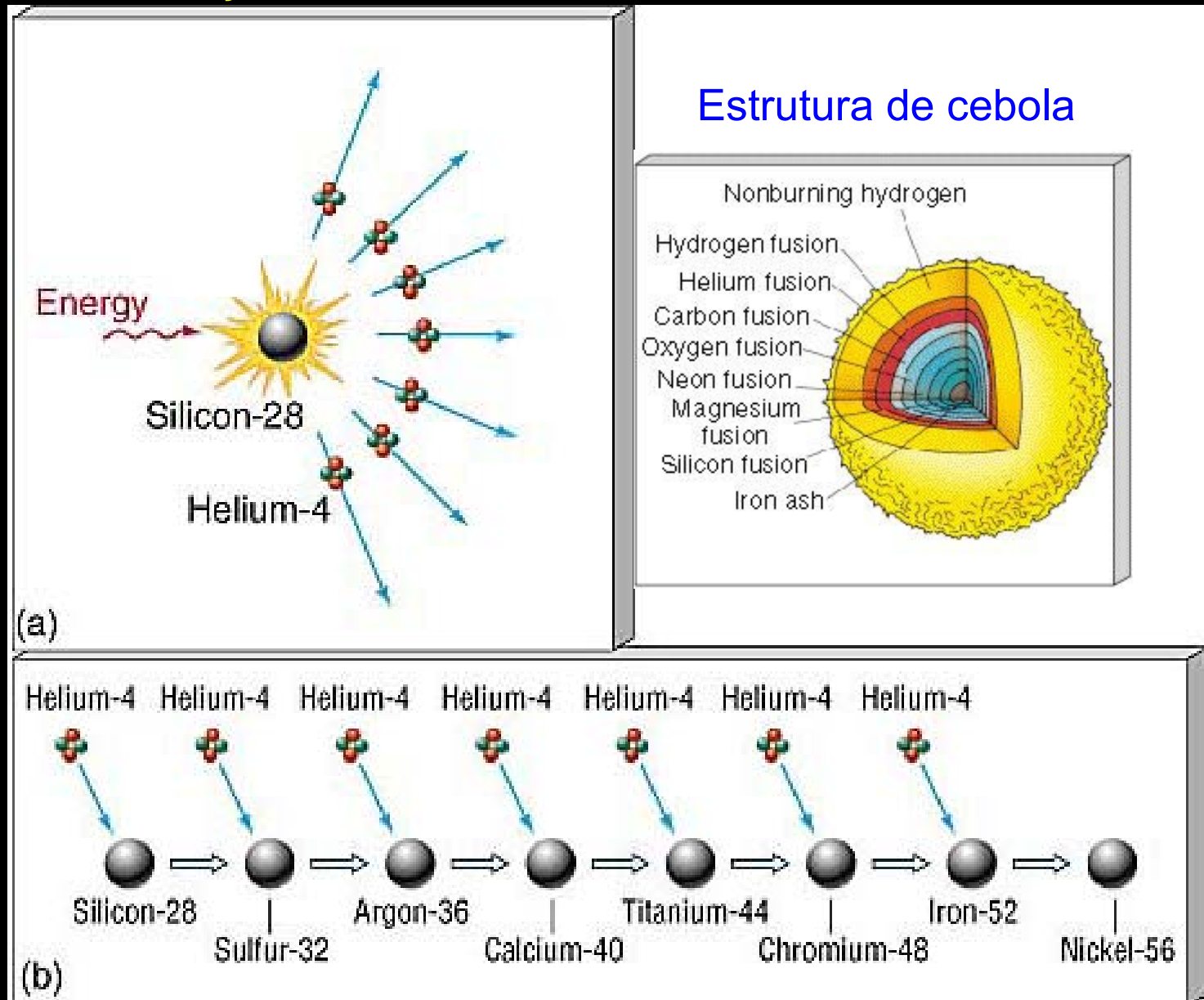
Aumento do R_{sol} até a órbita de Mercúrio

Evolução das estrelas de altas massas

- Estrelas muito massivas deixam a sequência principal muito rapidamente em direção ao ramo das gigantes. Por terem muita massa, a temperatura no caroço impede a degenerescência dos elétrons.
- Os estágios sucessivos de queima levam a estrela a caminhar de um lado a outro do diagrama HR.
- A composição interna da estrela estratifica-se de acordo com os estágios de queima e as cinzas remanescentes das queimas anteriores, formando o que chamamos “**estrutura de cebola**”.

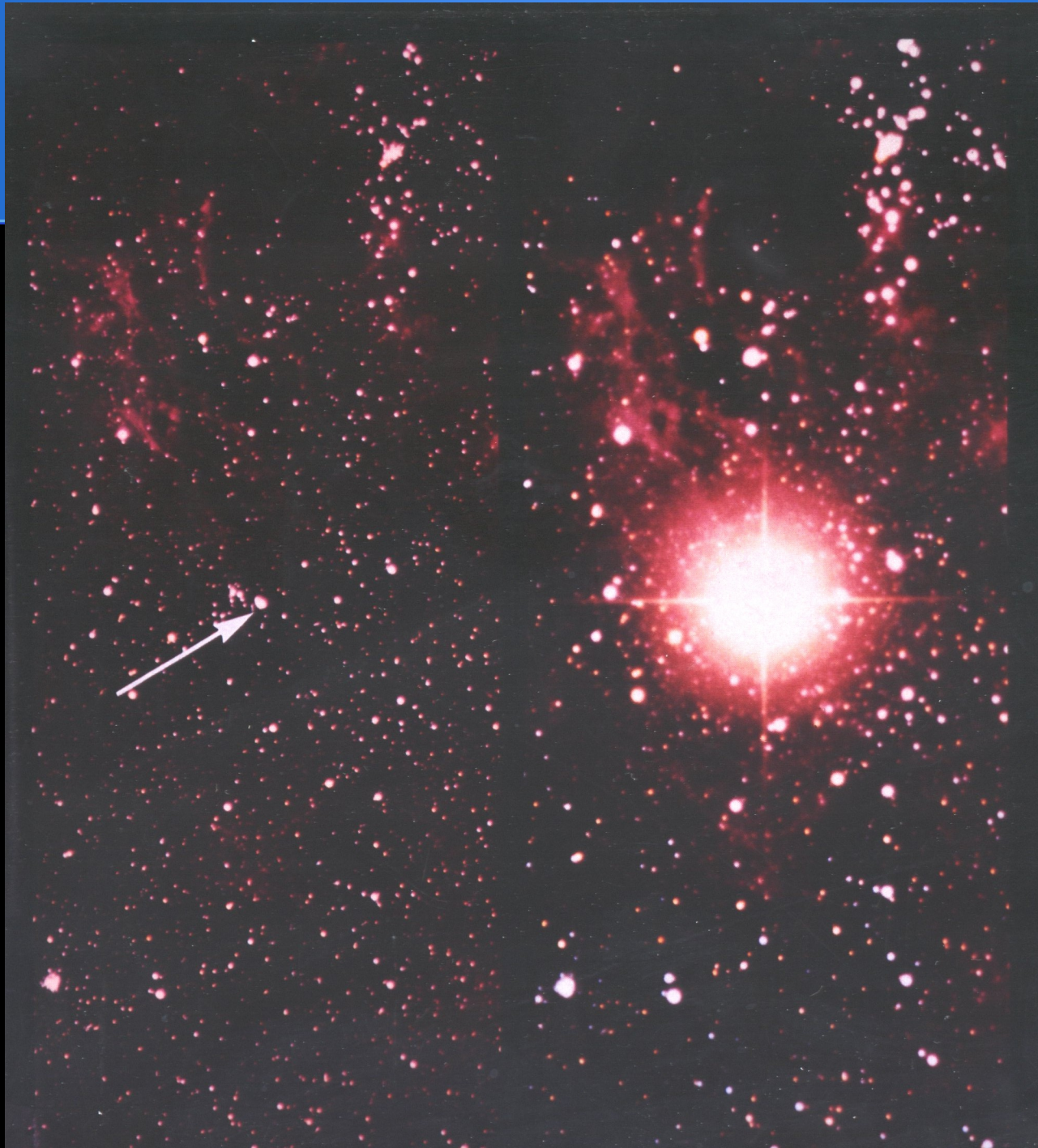
Evolução das estrelas de grande massa

Processo α em caroços de estrelas massivas



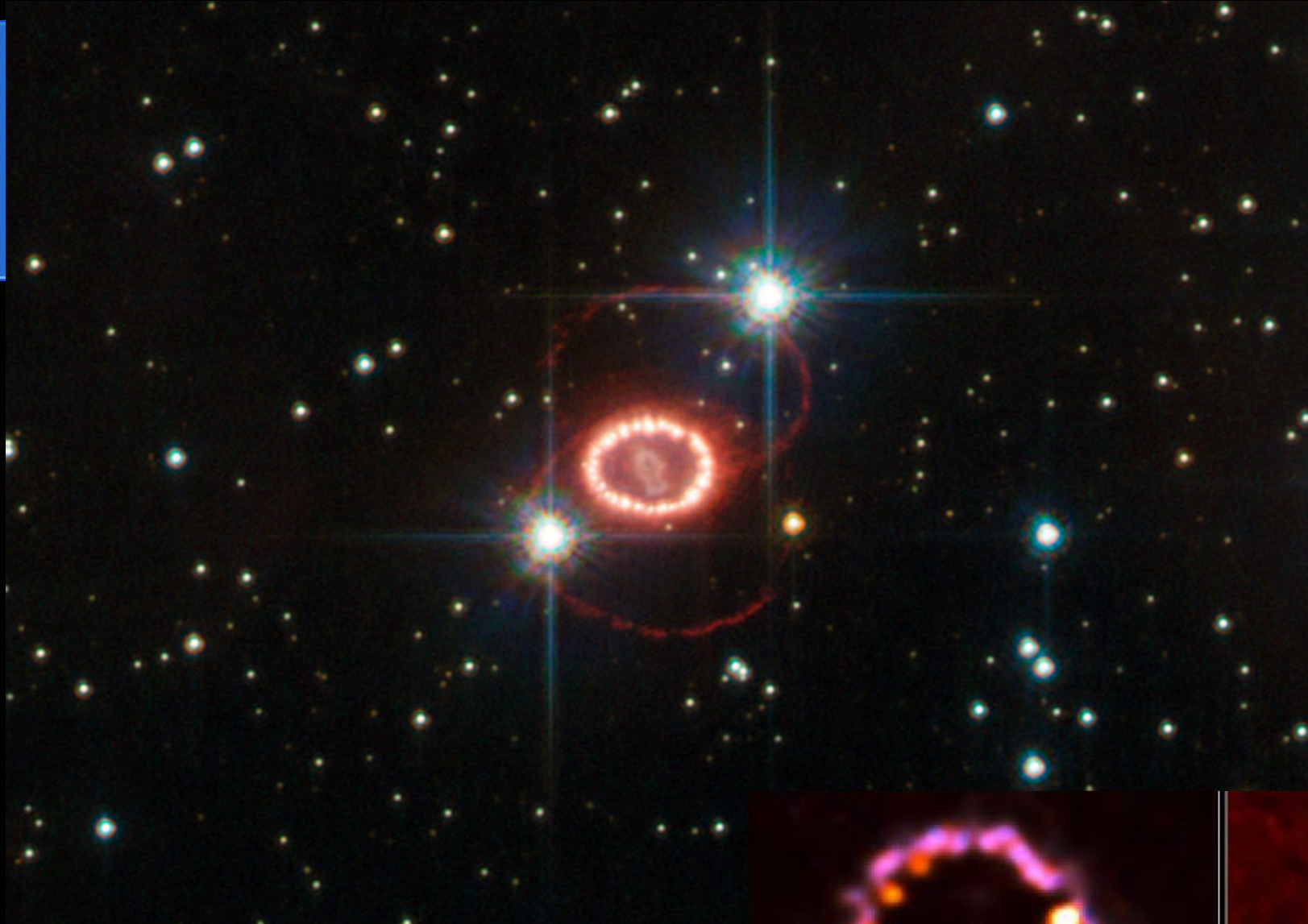
Supernova

- Quando a estrela cria um caroço de Fe, a fusão nuclear no caroço cessa por completo, por o Fe não poder ser queimado, como os outros elementos.
- A gravidade prevalece, levando ao colapso do caroço de Fe.
- Em menos de 1 segundo o raio do caroço diminui de 8000 para poucas dezenas de km, liberando uma quantidade de energia colossal.
- O envoltório não chega a participar desse evento de colapso, mas recebe a energia do colapso e é expelido violentamente para o espaço.

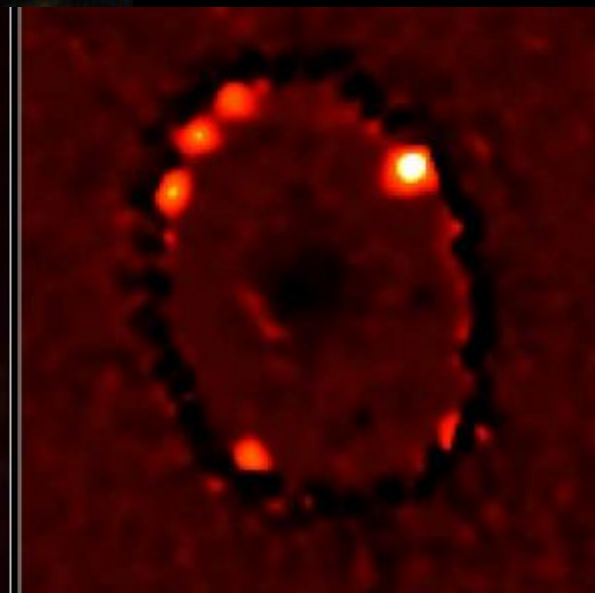
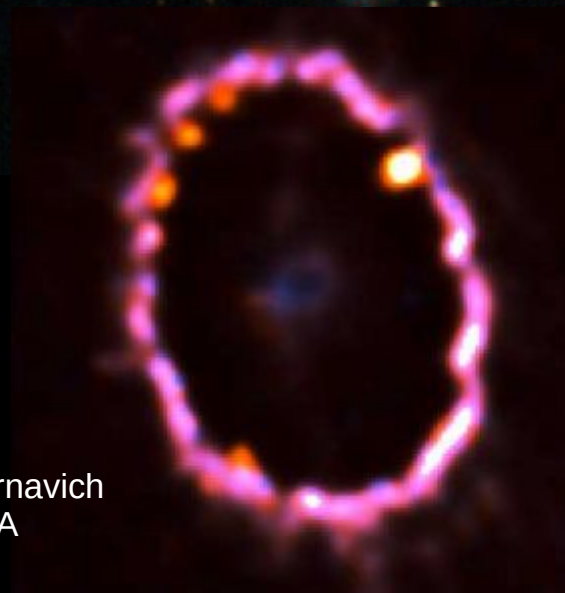


SN 1997 A

Supernova 1987A



The Mysterious Rings of Supernova 1987A
Image Credit: ESA/Hubble, NASA - 2017



New Shocks For Supernova 1987A
Credit: P. Challis and R. Kirshner (CfA), P. Garnavich
(Univ. Notre Dame), SINS Collaboration, NASA
1997

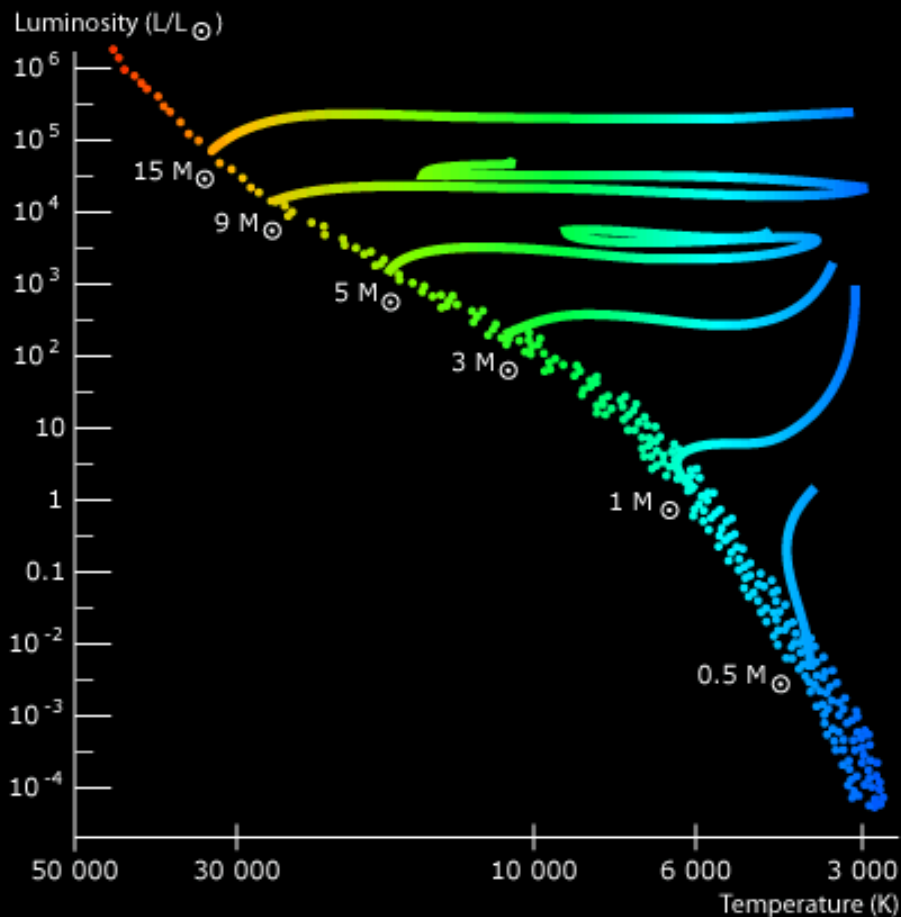


NASA, ESA, & Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

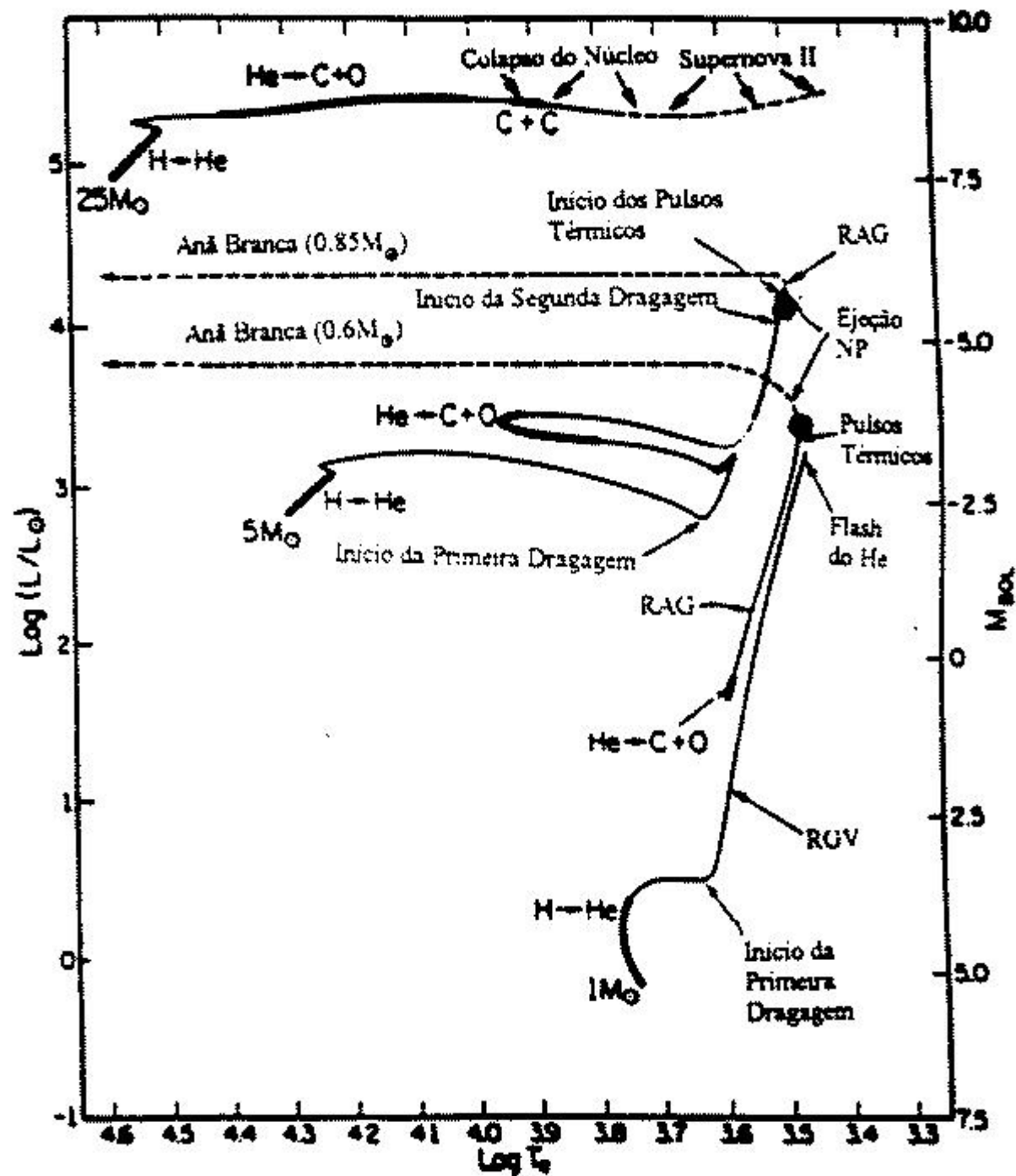
Veil Nebula: Wisps of an Exploded Star

Image Credit: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

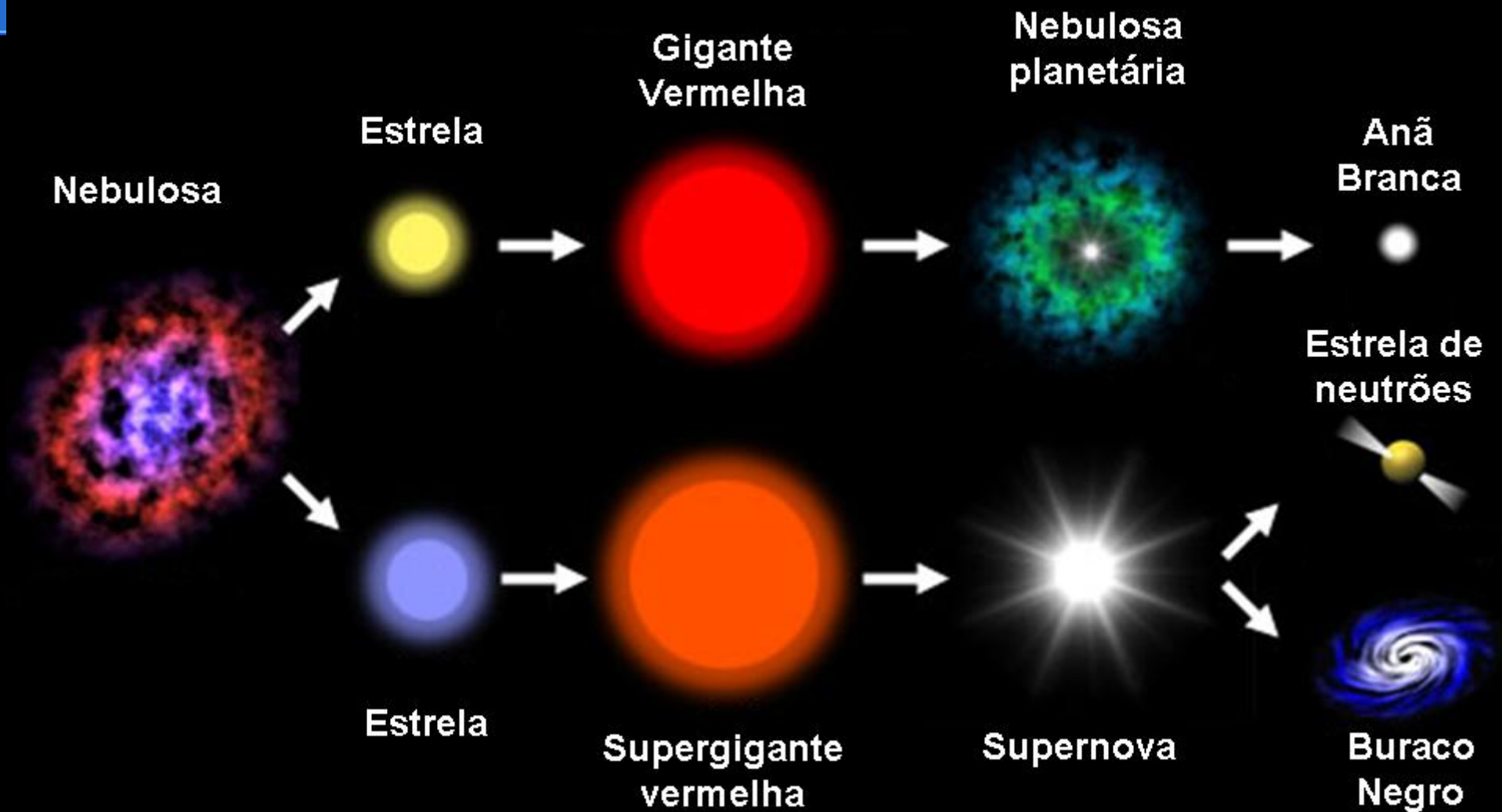
Saída da SP



- A evolução da estrela leva-a a mudanças estruturais.
- No diagrama HR, isso equivale a deixar a sequência principal e seguir em direção a outras regiões do espaço temperatura-luminosidade.



Ciclo de Vida das estrelas



Aglomerados estelares

- mesma idade
- mesma composição química
- aproximadamente, a mesma distância
 - **Aglomerados abertos:** sem forma, pertencentes ao disco
 - **Aglomerados globulares:** esféricos, pertencentes ao halo



Omega Centauri

M 71 – Aglomerado Globular



NGC 602 Aglomerado Aberto



Estrelas iniciais e finais

Plêiades



M80

Diagramas HR de aglomerados

- Por conterem estrelas de **mesma idade e mesma composição química**, os aglomerados são ideais para estudos de evolução estelar, pois mostram estrelas que começaram a evoluir no mesmo momento e que só se diferenciam pela massa, o que leva umas a evoluir mais rapidamente do que outras.
- O diagrama HR dos aglomerados é similar a isócronas teóricas (linha que une estrelas de mesma idade no diagrama).

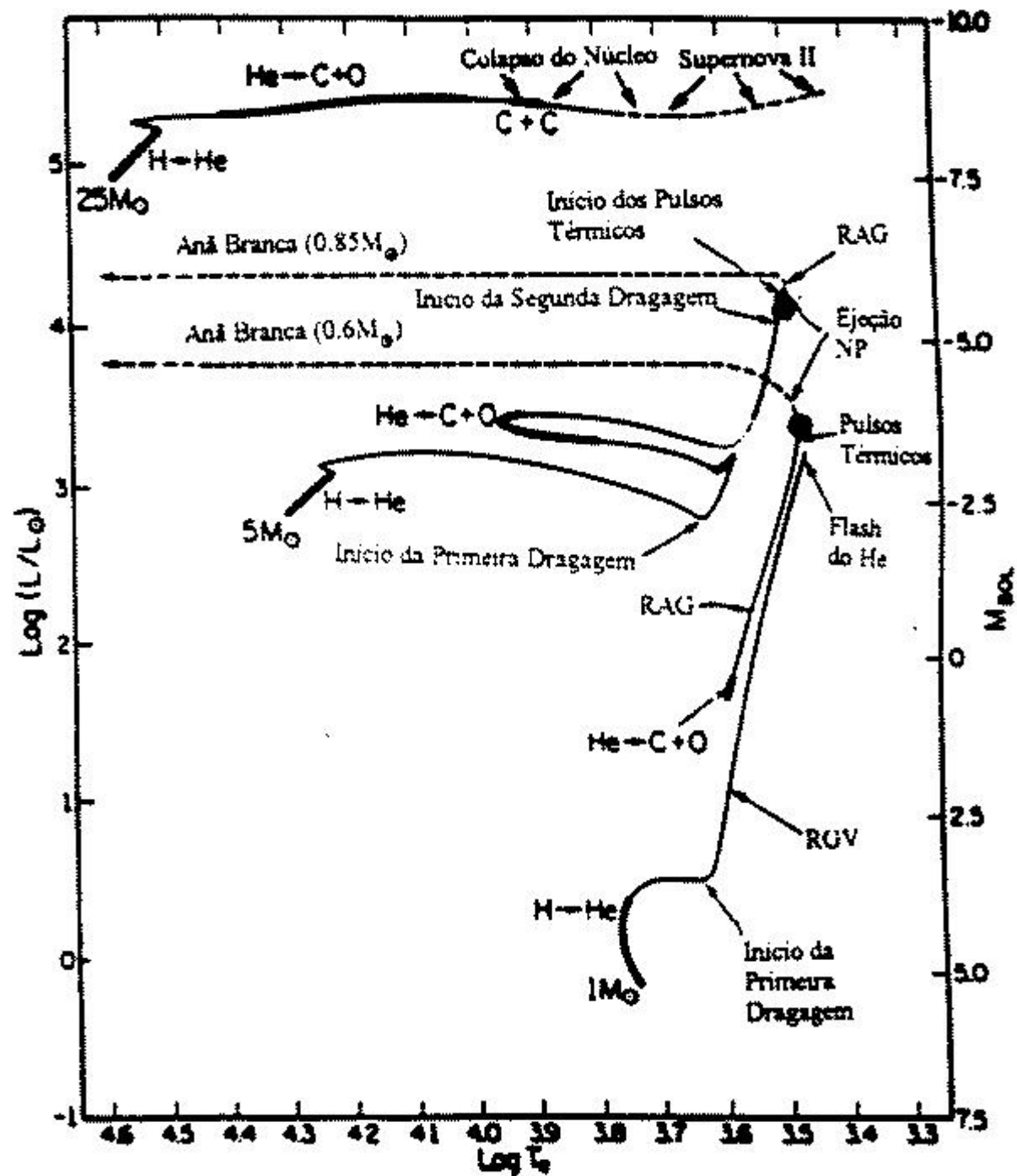


Diagrama cor-magnitude típico: Plêiades (M45)

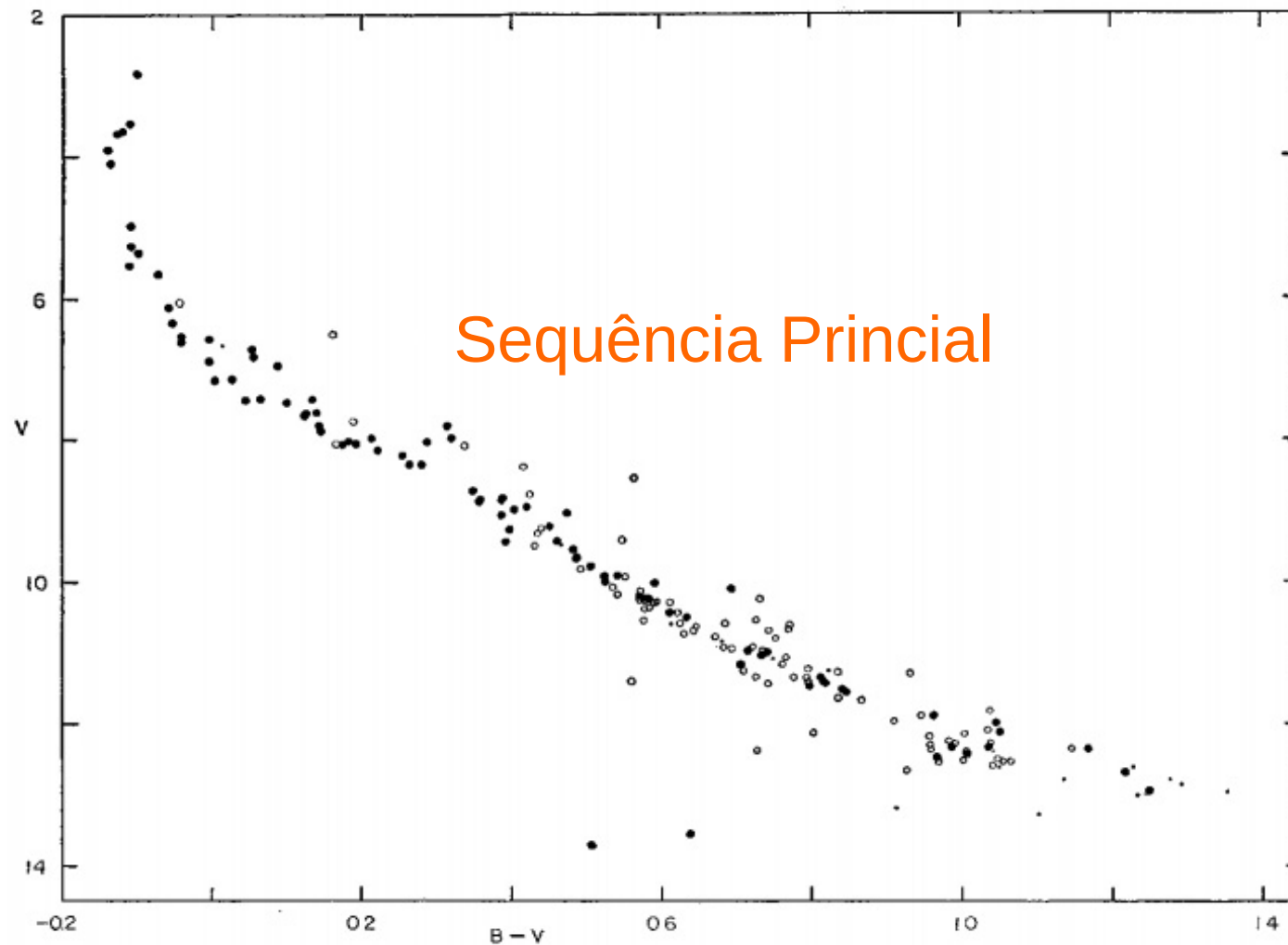
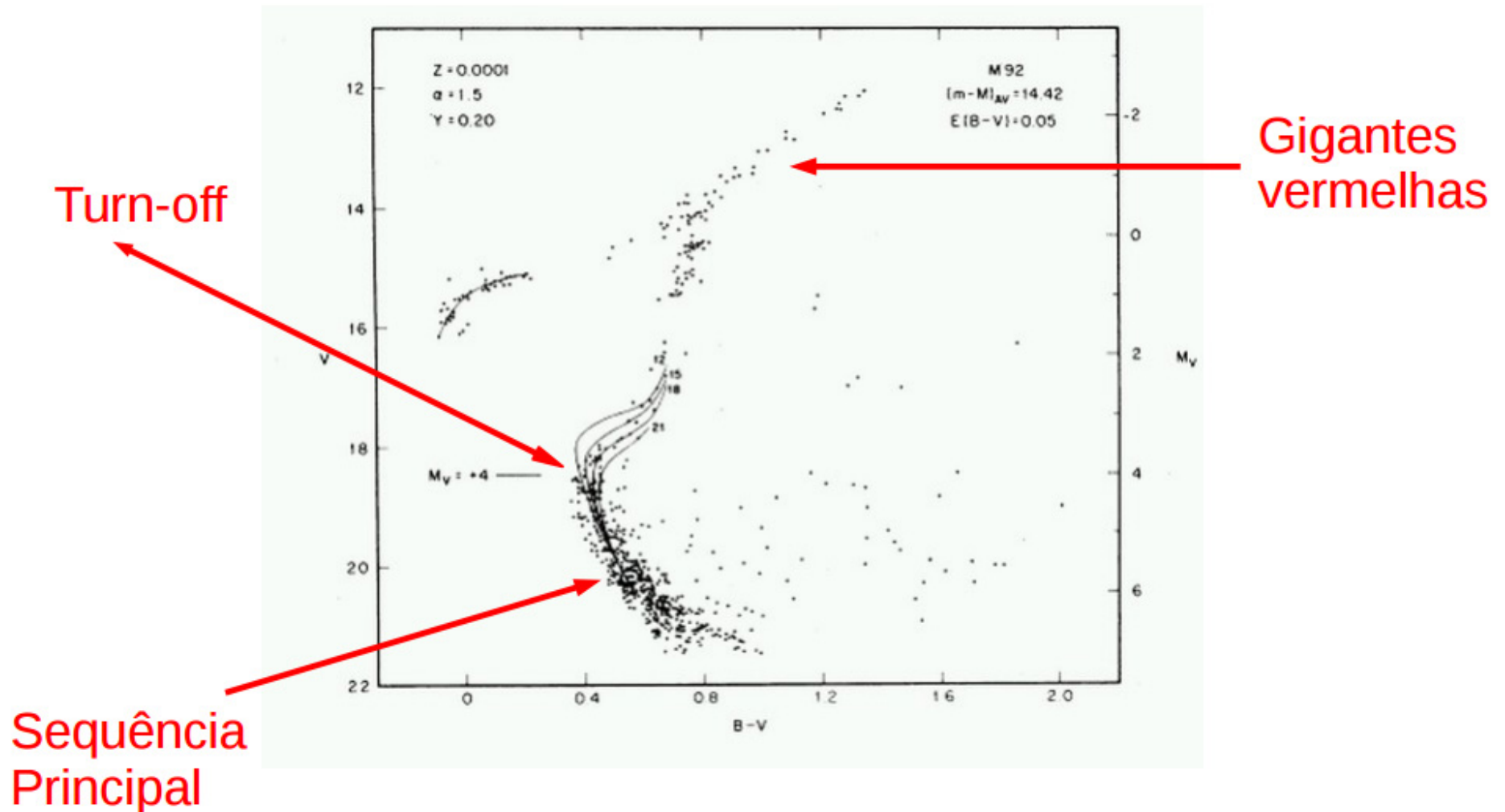
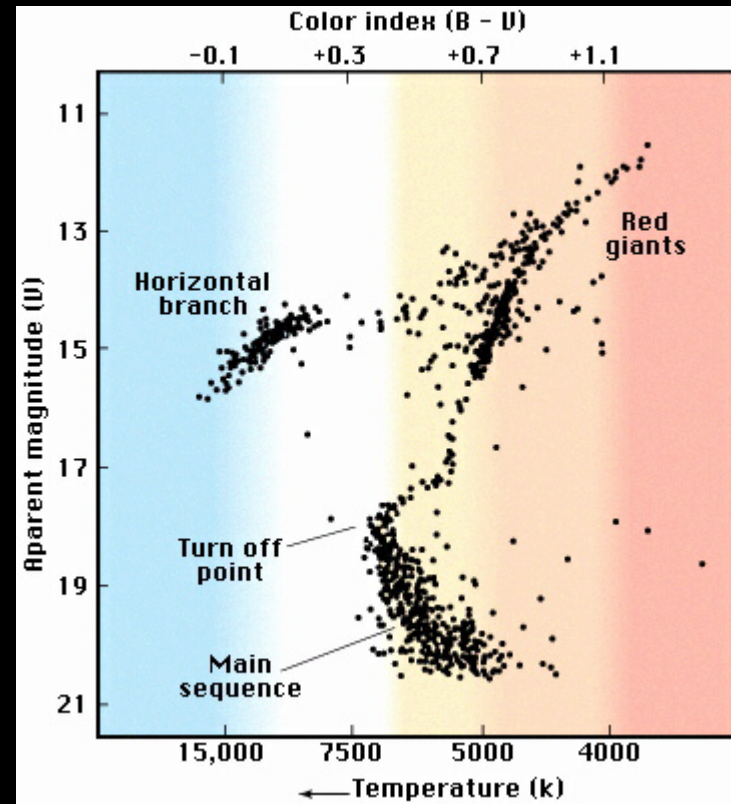
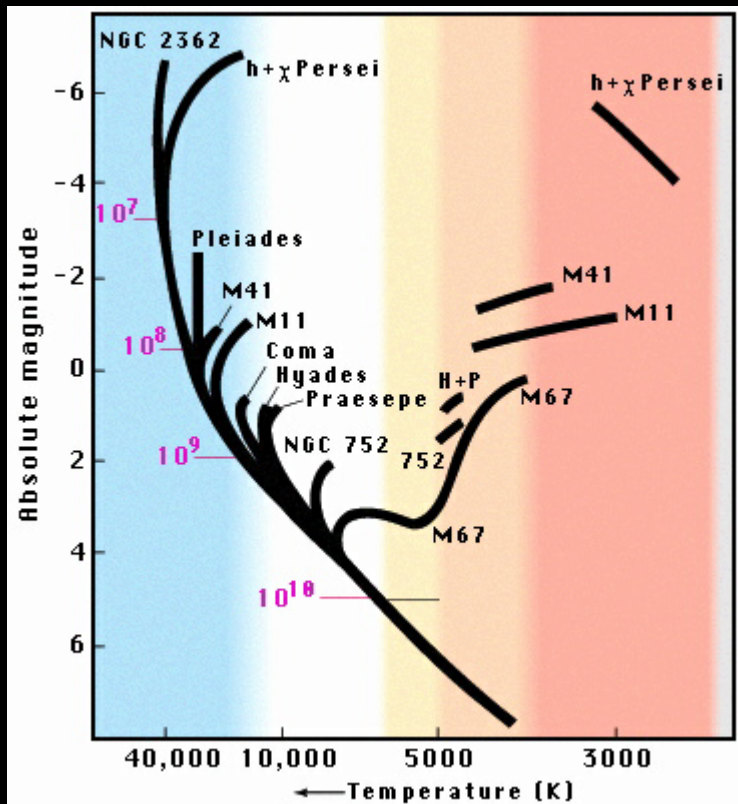


Diagrama típico de um aglomerado globular: M92



Diagramas HR de aglomerados



Nossa Galáxia contém cerca de 170 aglomerados globulares

O número de aglomerados abertos na Galáxia é incerto: ainda hoje, diversos novos aglomerados estão sendo descobertos e estudados

Diagrama de Hertzsprung-Russell (HR)

