

# Evolução Estelar

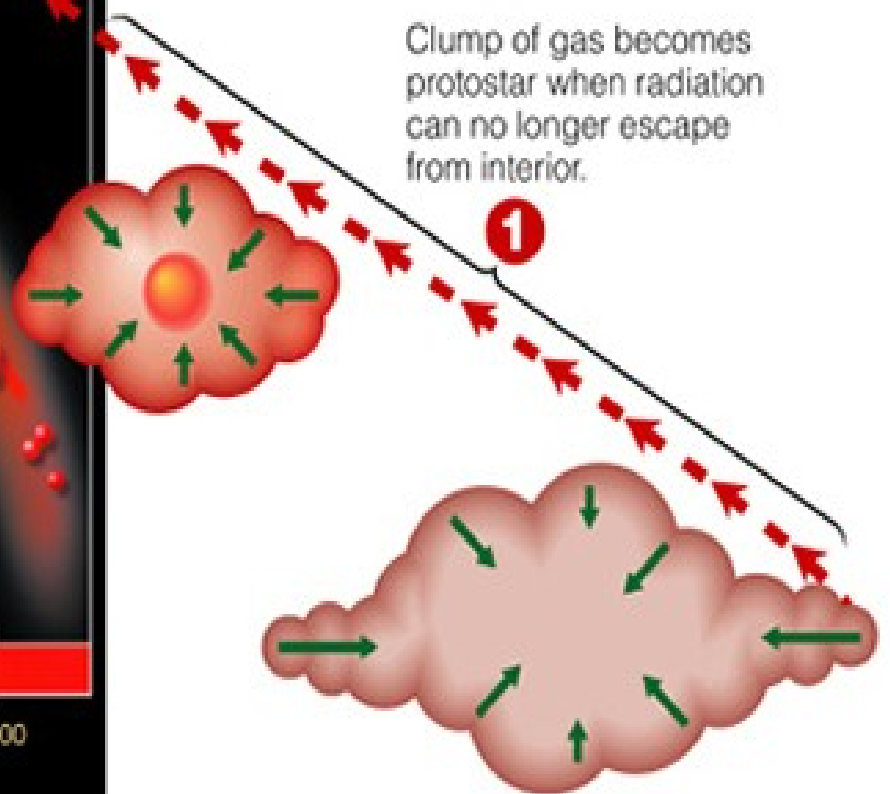
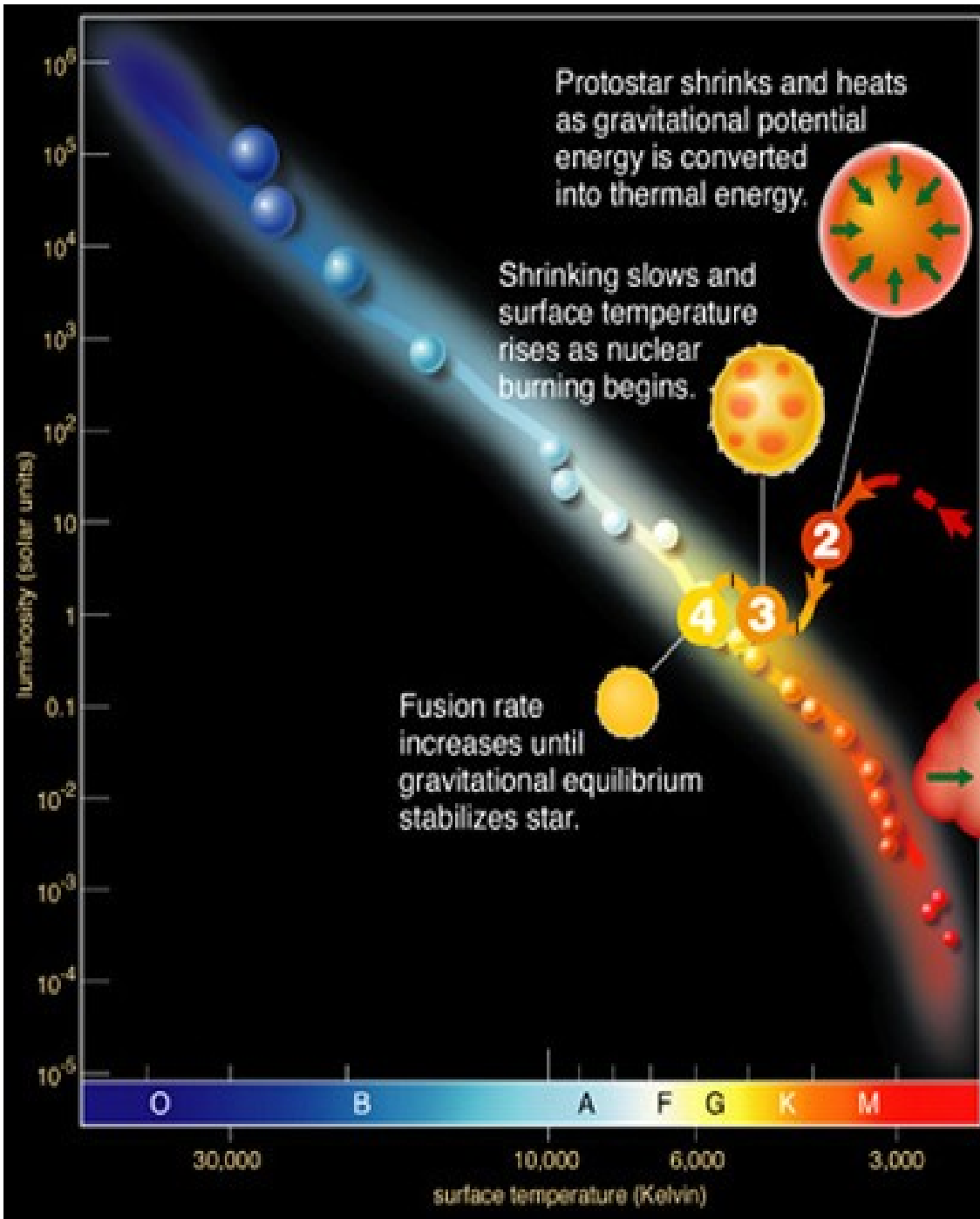
Definição: variações de temperatura “superficial” e luminosidade ao longo da vida de uma estrela.

A evolução de uma estrela é definida por sua metalicidade e, principalmente, por sua massa.

Na nuvem molecular:  
glóbulos em contração:  $E_G \Rightarrow E_K$   
Pressão X gravidade

Teorema de virial:  $E_T = -1/2 E_G$   
(equilíbrio hidrostático)

# Formação estelar (1 $M_{\text{Sol}}$ )



- Se  $M_{\text{glóbulo}} > 0,08 M_{\text{sol}}$  :

$$T_{\text{caroço}} > 10^7 \text{ K} \Rightarrow \text{ignição do H}$$

Estrela na seqüência principal

- Se  $M_{\text{glóbulo}} < 0,08 M_{\text{sol}}$  :

$$T_{\text{caroço}} < 10^7 \text{ K} \Rightarrow \text{não ocorre fusão nuclear}$$

matéria esfria  $\Rightarrow$  anã marrom

# Estrela já formada

- Seqüência principal (SP)
  - Queima de H no núcleo
  - Posição no HR ~invariável
  - Maior parte da vida de uma estrela
    - $t_{SP} \propto M/L$  (razão massa-luminosidade)
    - $L \propto M^n$ , ( $n \sim 3$ )
    - $t_{SP} \propto M^{-2}$

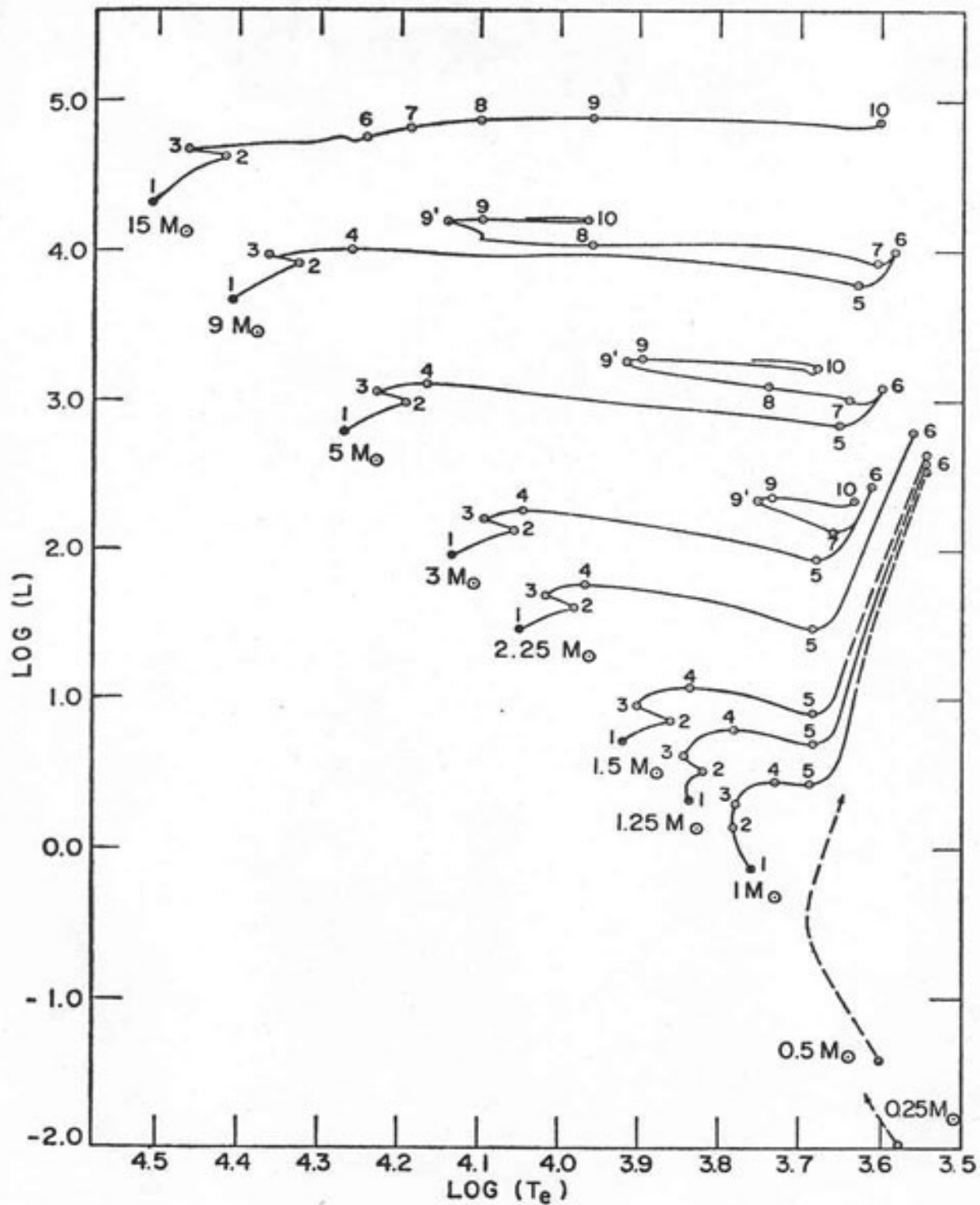
- Caminho evolutivo

- Produção de energia

- Ciclo p-p ( $10^7$  K), ciclo CNO ( $2 \times 10^7$  K), triplo  $\alpha$  ( $10^8$  K)

- Transporte de energia

- Condução, radiação, convecção



Exemplos de caminhos evolutivos no HR

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4$$

- O caminho evolutivo detalhado de uma estrela é complexo (convecção em diferentes regiões)

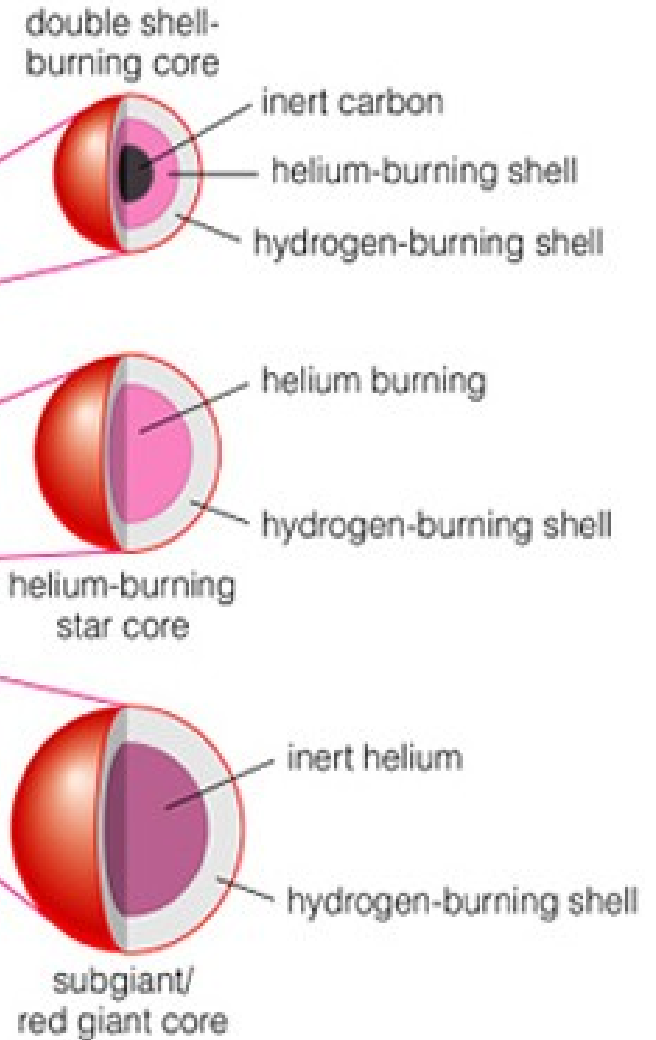
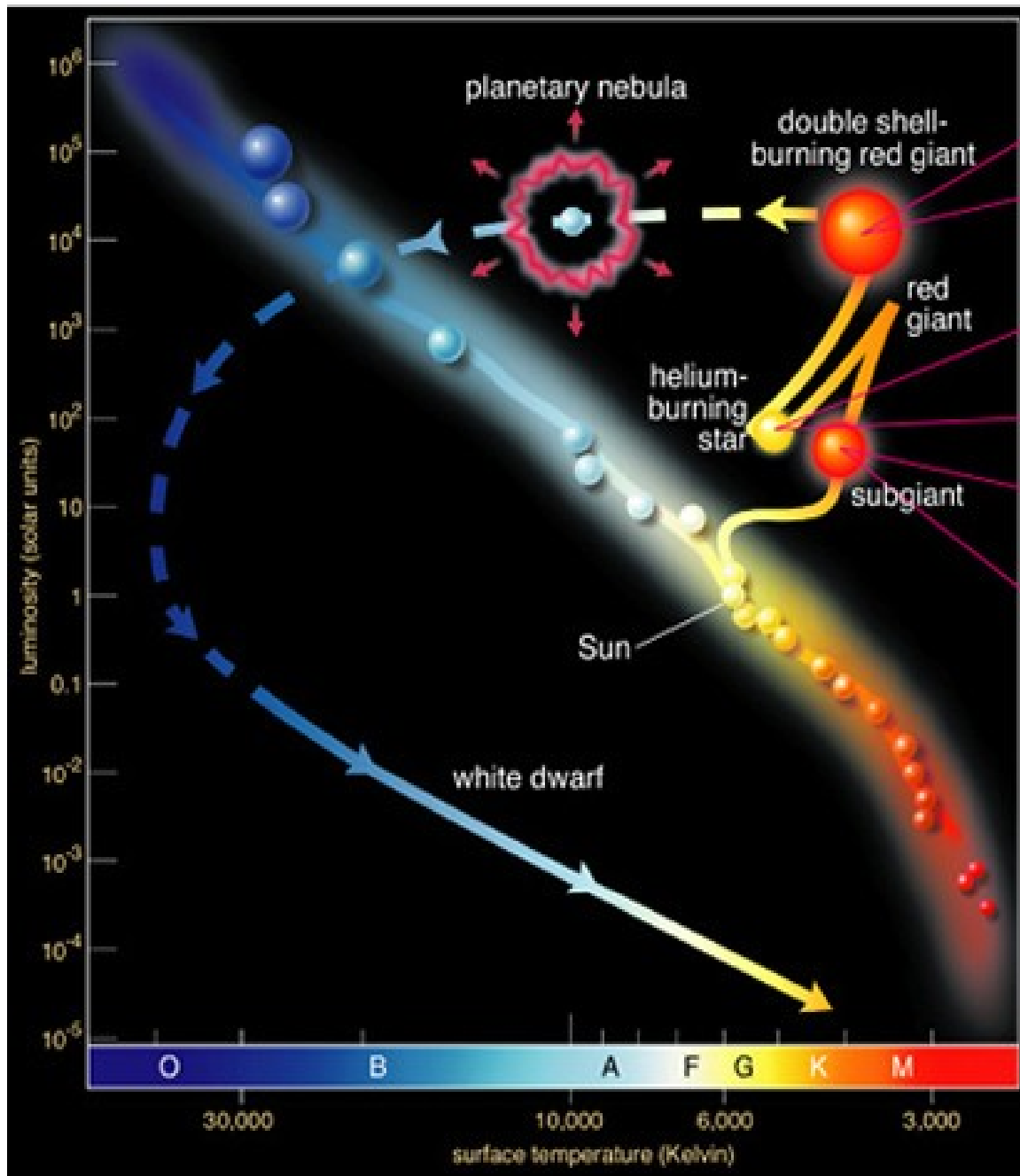
Região de convecção:

Camadas externas (baixa massa)

Camadas internas (massivas)

- Em função do modo de queima de H no núcleo:
    - Estrelas de baixa massa [ $0,08 - 1,5 M_{\text{Sol}}$ ]
      - Cadeia p-p
    - Estrelas de alta massa ( $M > 1,5 M_{\text{Sol}}$ )
      - Ciclo CNO
- (Ambas de população I)

# Caminho evolutivo



( $1 M_{\text{Sol}}$ )

# Estrelas de baixa massa

## Fase 1 (saída da SP)

- Caroço:

- H se esgota => contração => queima de H em camada acima.

- Envelope:

- Resfria e expande =>  $L \sim \text{constante}$

## Fase 2 (ascensão ao ramo de gigantes vermelhas)

- Envelope:

- Aquecimento de camada mais externas => expansão
- Queda  $T_{\text{eff}}$  => aumento opacidade => convecção dominante => aumento da  $L$

- Carvão:

- $\rho$  aumenta  $\Rightarrow$  degenerescência dos elétrons  
( Pressão  $\sim$ independe da temperatura)

## Fase 3 (flash do He)

- Carvão

- $T > 2 \times 10^8 \text{ K} \Rightarrow$  queima de He  $\Rightarrow$  aumento da Temperatura  $\Rightarrow$  aumento da queima de He
- $T > 3,5 \times 10^8 \text{ K} \Rightarrow$  fim da degenerescência  $\Rightarrow$  expansão  $\Rightarrow$  resfriamento

- Envelope:

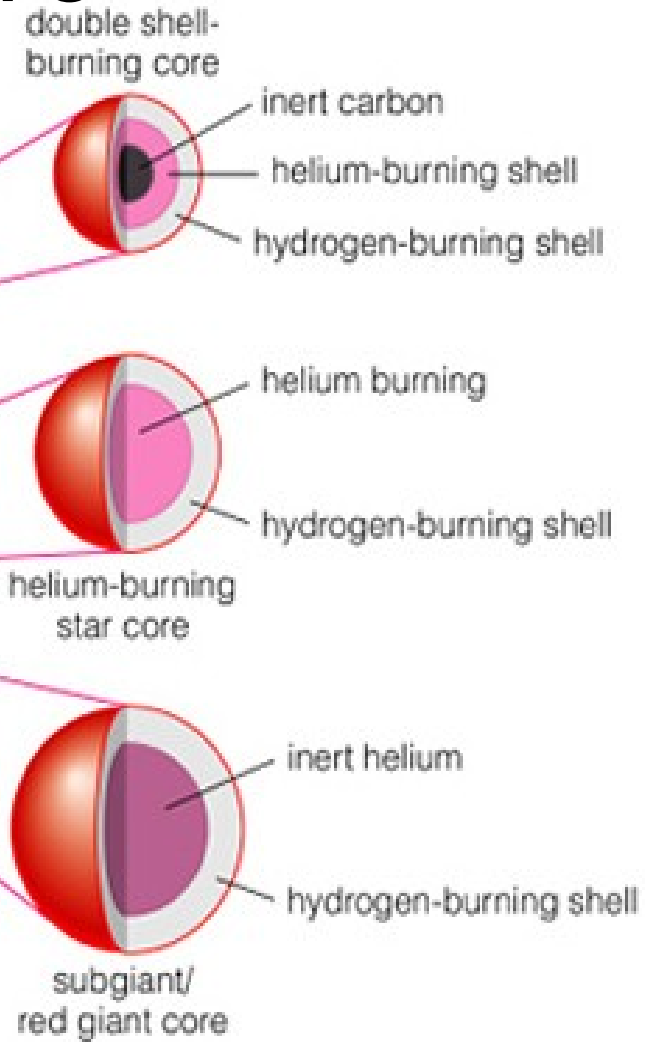
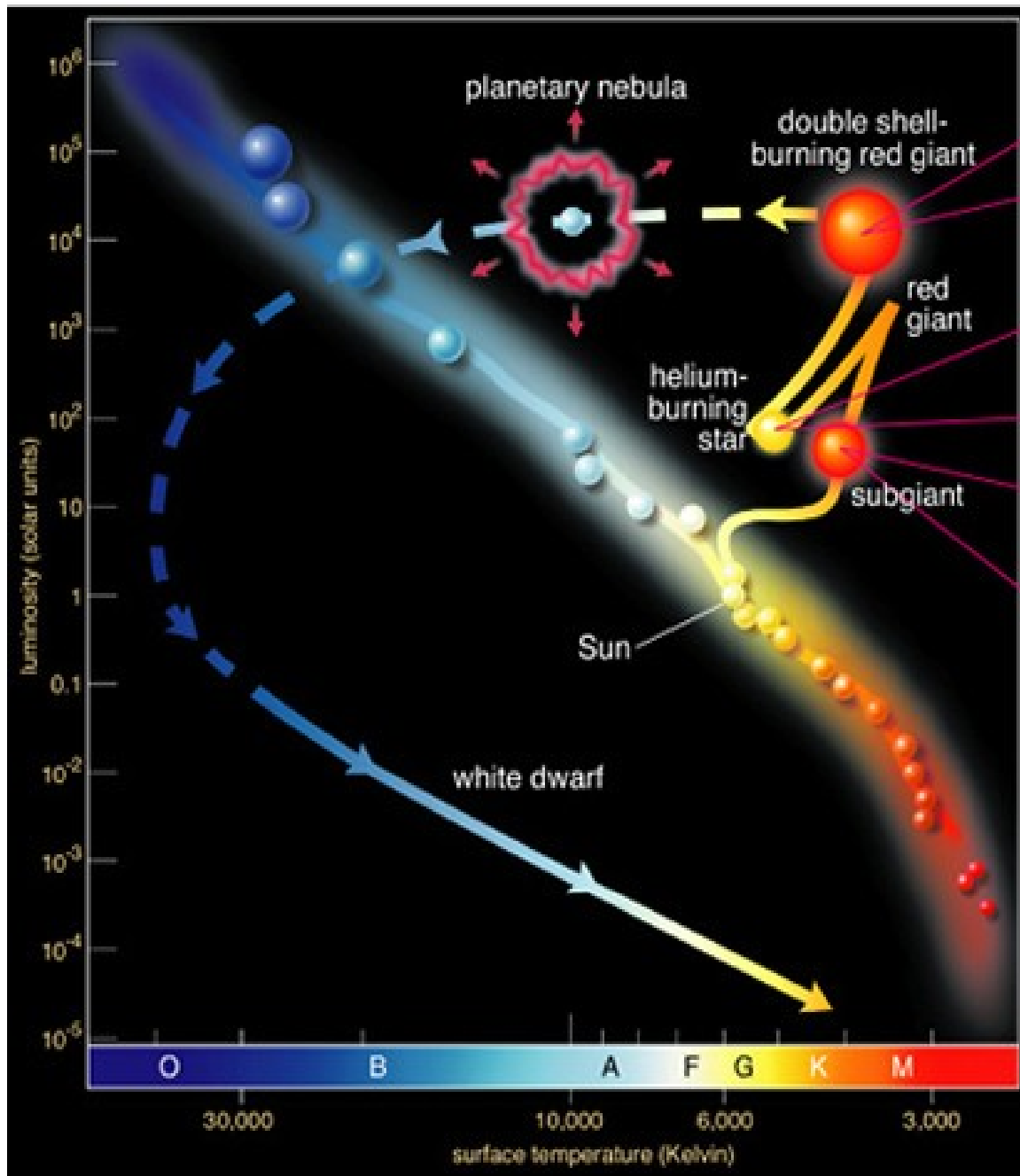
- R e L crescem e, após o resfriamento do caroço, decrescem

## Fase 4 (ascensão ao ramo assintótico GV)

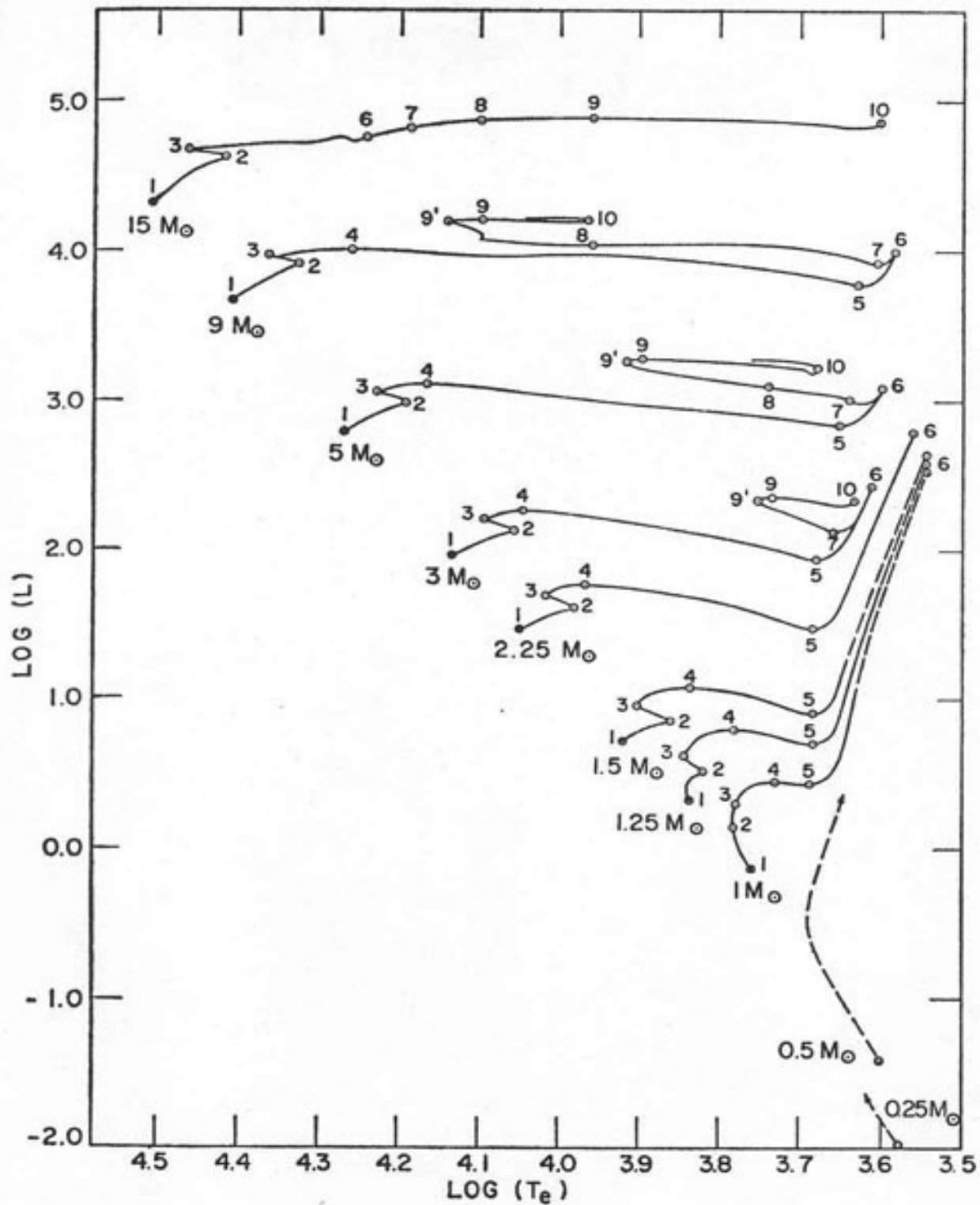
- Carvão:
  - Continua a queima de He, e H em camada acima
  - Exaurido o He => contração => He queima em camada => degenerescência
  - Instabilidade: produção de energia  $\propto T^{30}$
- Envelope:
  - Expansão => aumento da L
  - Instabilidade => pulsos térmicos

- Fase 5 (início do fim)
- Envelope:
  - Super-vento => NEBULOSA PLANETÁRIA
- Caroço:
  - Sem reações nucleares => esfria => L diminui => ANÃ BRANCA

# Caminho evolutivo



(1  $M_{\text{Sol}}$ )



Exemplos de caminhos evolutivos no HR

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{ef}}^4$$

# Estrelas de alta massa

- Fase 1 (pós SP a GV)
- Carvão:
  - H exaurido  $\Rightarrow$  contração  $\Rightarrow$  queima de H em camada
  - Exaurido H  $\Rightarrow$  contração  $\Rightarrow$  queima de H em nova camada
- Envelope:
  - Expansão  $\Rightarrow$  resfriamento
  - Convecção torna-se importante  $\Rightarrow$  L aumenta

## Fase 2 (caminho para super-gigantes - SG)

- Carvão:

- Contração  $\Rightarrow$   $\rho$  aumenta  $\Rightarrow$  T aumenta até  $10^8$  K  $\Rightarrow$  queima He  $\Rightarrow$  expande  $\Rightarrow$  resfria  $\Rightarrow$  cessa a queima
- Contração  $\Rightarrow$  queima He
- Exaurido o He  $\Rightarrow$  contração  $\Rightarrow$  queima C  $\Rightarrow$  queima de He em camada vizinha (SG)

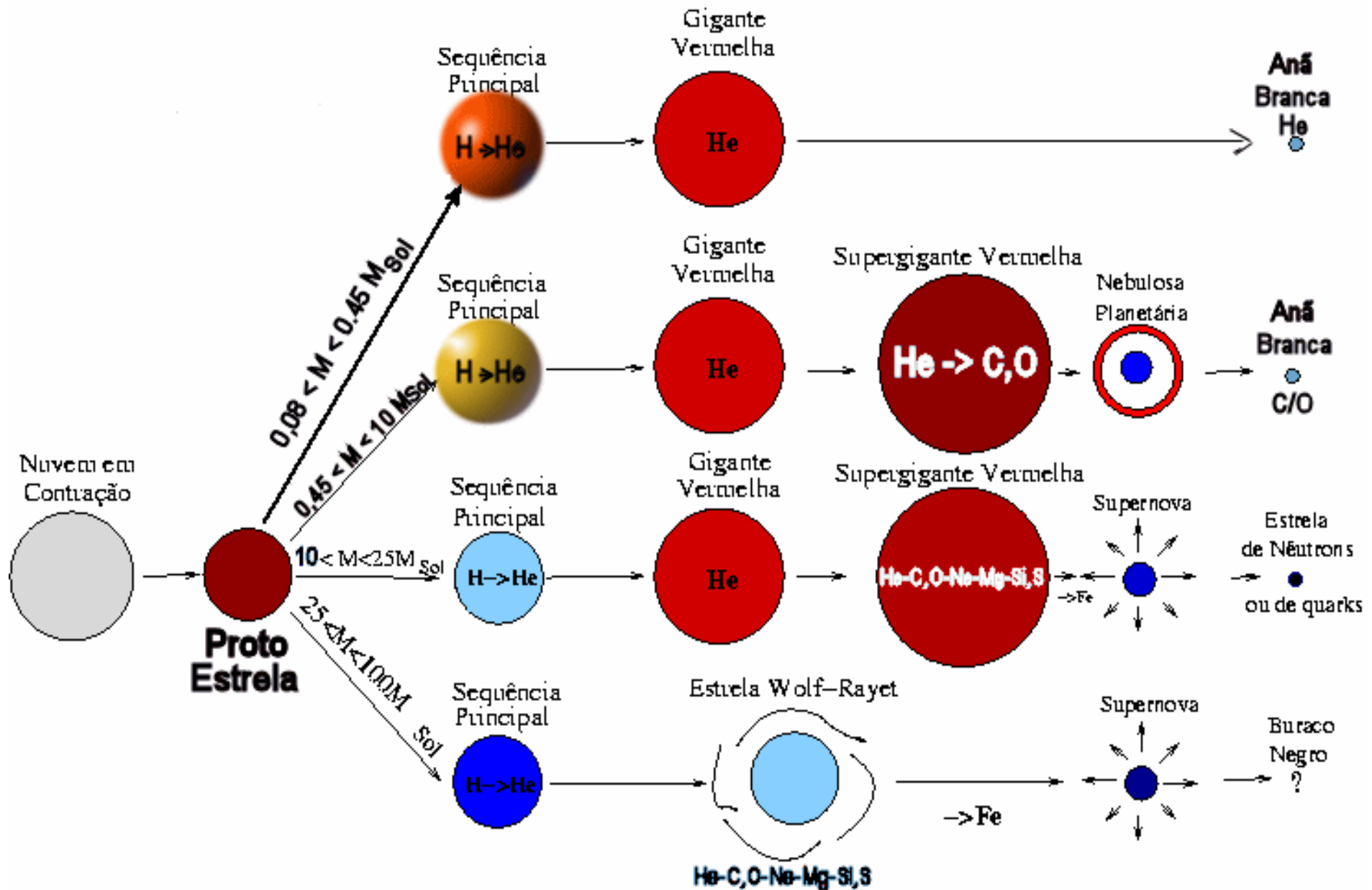
- Envelope:

- Instabilidade: pulsos térmicos
- Expansão  $\Rightarrow$  L aumenta (SG)

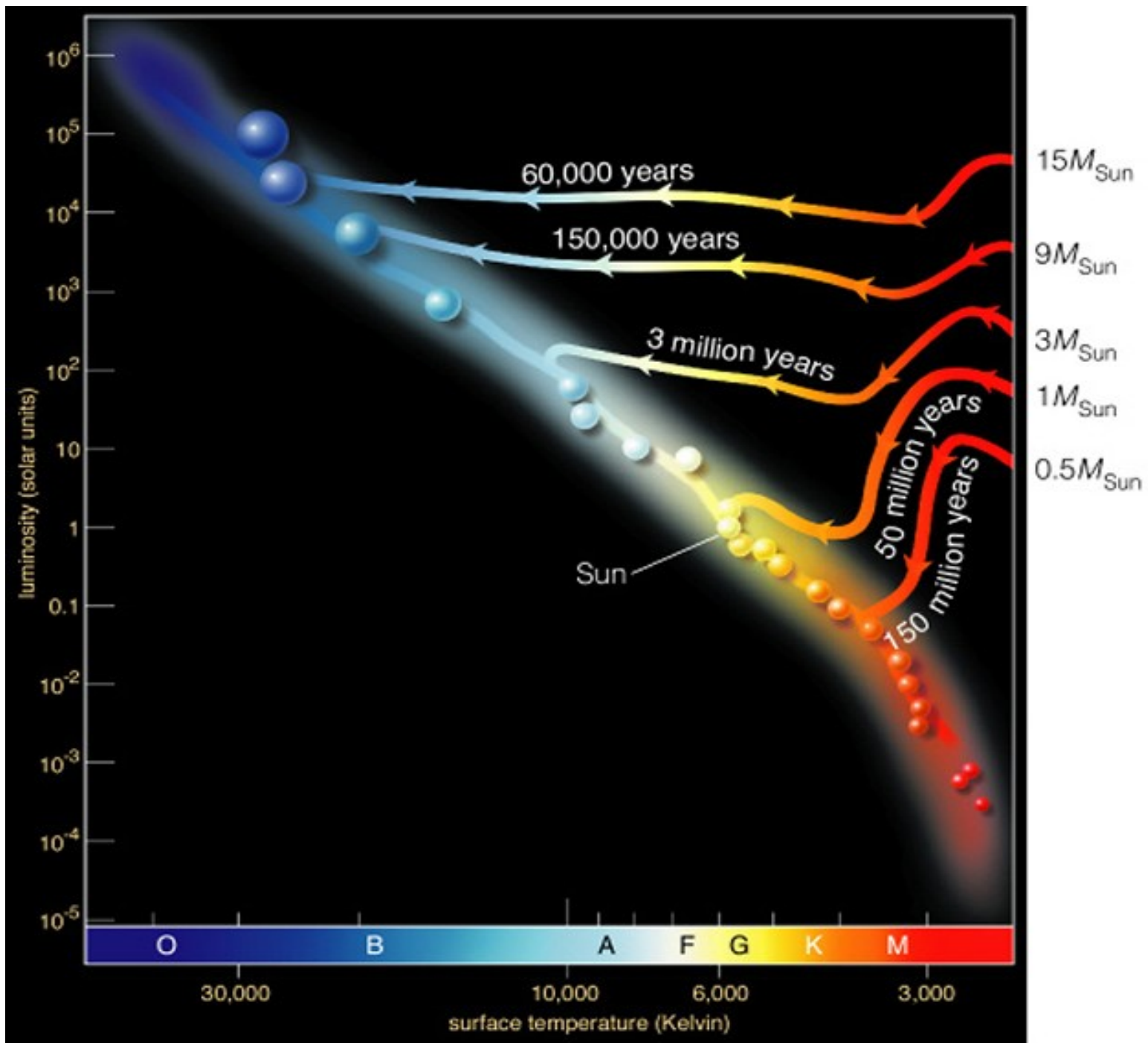
Fase 3 (fim):

bastante dependente da massa.

# Evolução Estelar



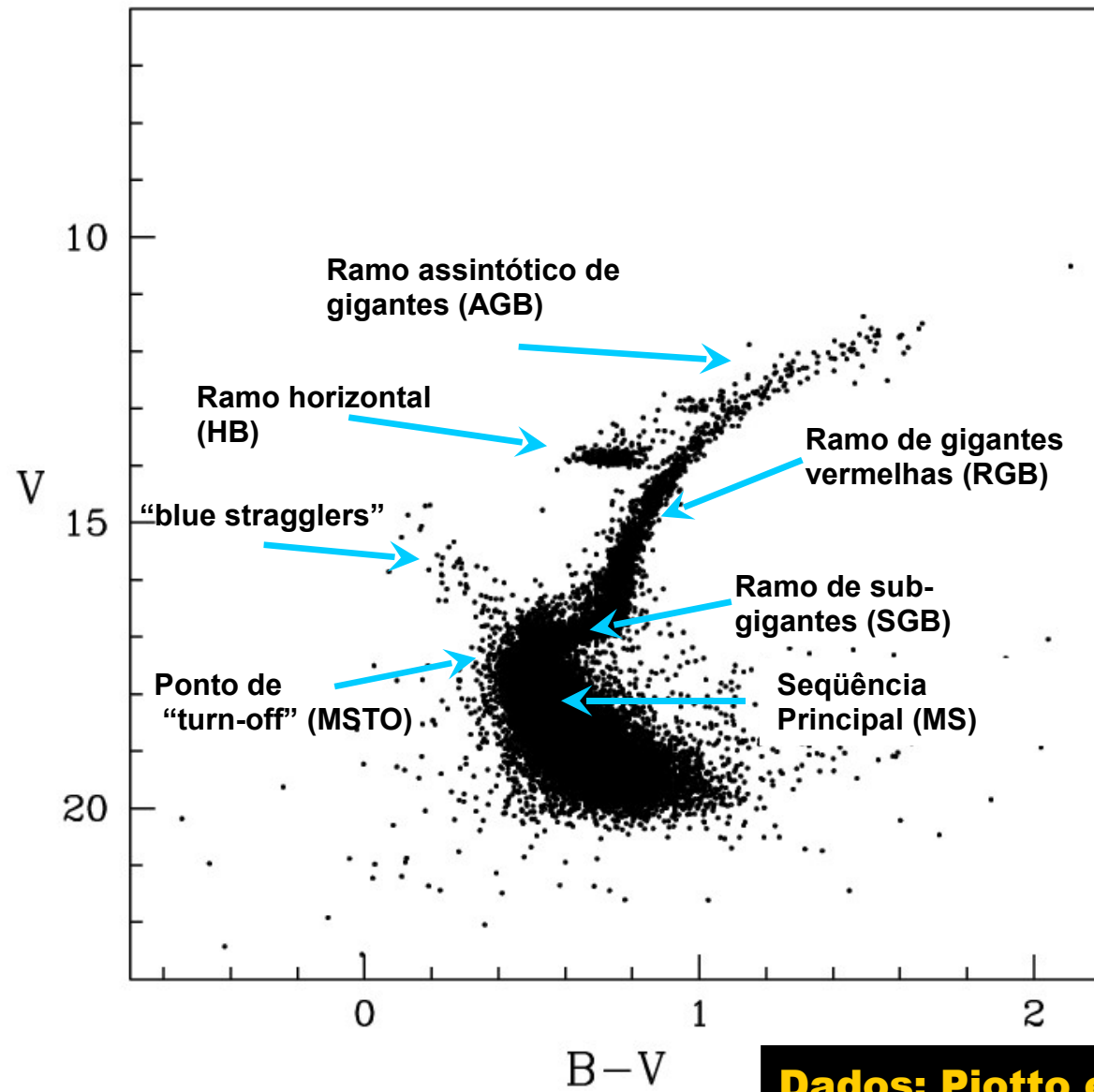
Continua...



# Aglomerados Globulares

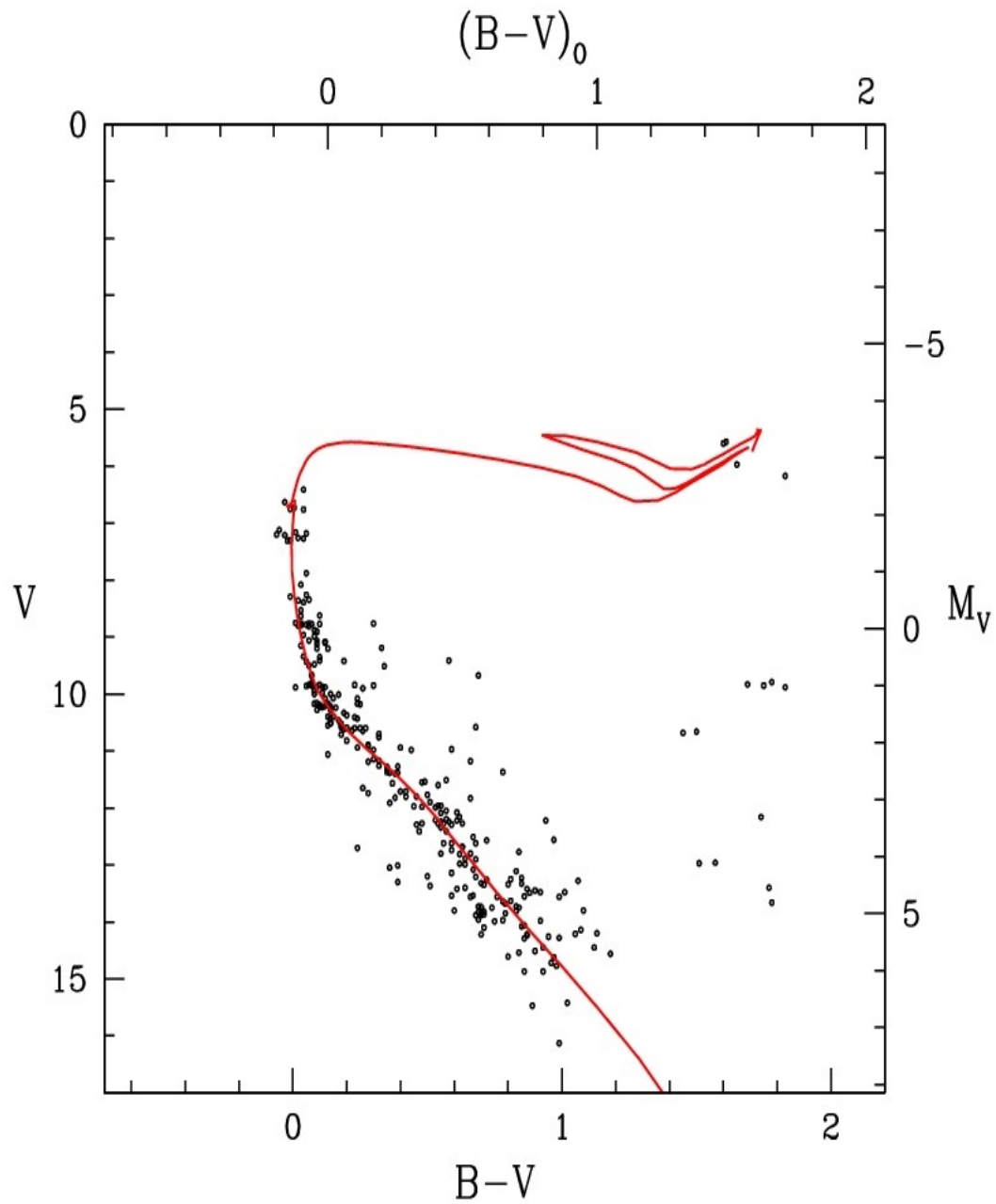


**47 Tuc**



**Dados: Piotto et al.**

# Isócrona



# Formação Estelar

nuvens moleculares:  
instabilidade  $\Rightarrow$  contração  $\Rightarrow$  aumento de T  
reações nucleares