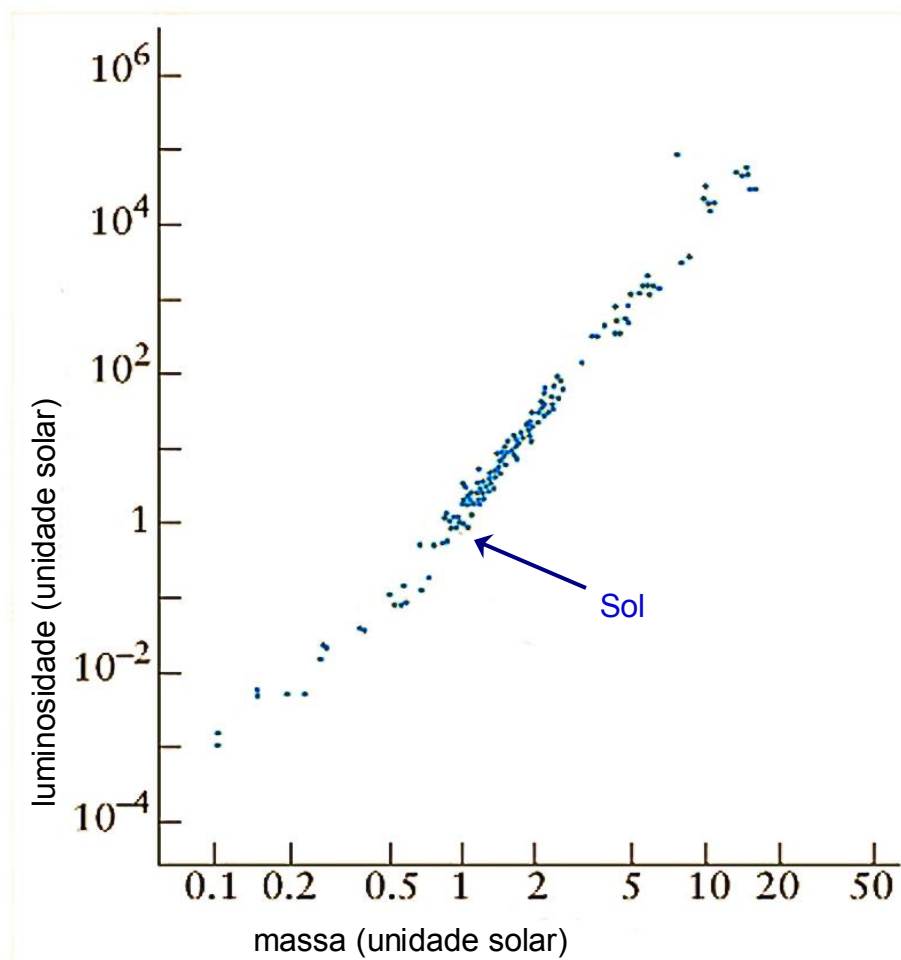


# Evolução e estrutura estelar I

- ASTRONOMIA GERAL
- FIS004
- Prof. Gustavo Guerrero
  
- Introductory Astronomy & Astrophysics, M. Zeilek, S. A. Gregory & E. v. P. Smith (Caps. 16 e 19)
  
- Agradecimento: Elisabete Dal Pino

# Relação Massa–Luminosidade

- Para as estrelas da Seqüência Principal existe uma relação bem definida entre a massa e a Luminosidade.



**Obtida a partir de medidas de massa de varias binarias**

# Relação Massa-Luminosidade

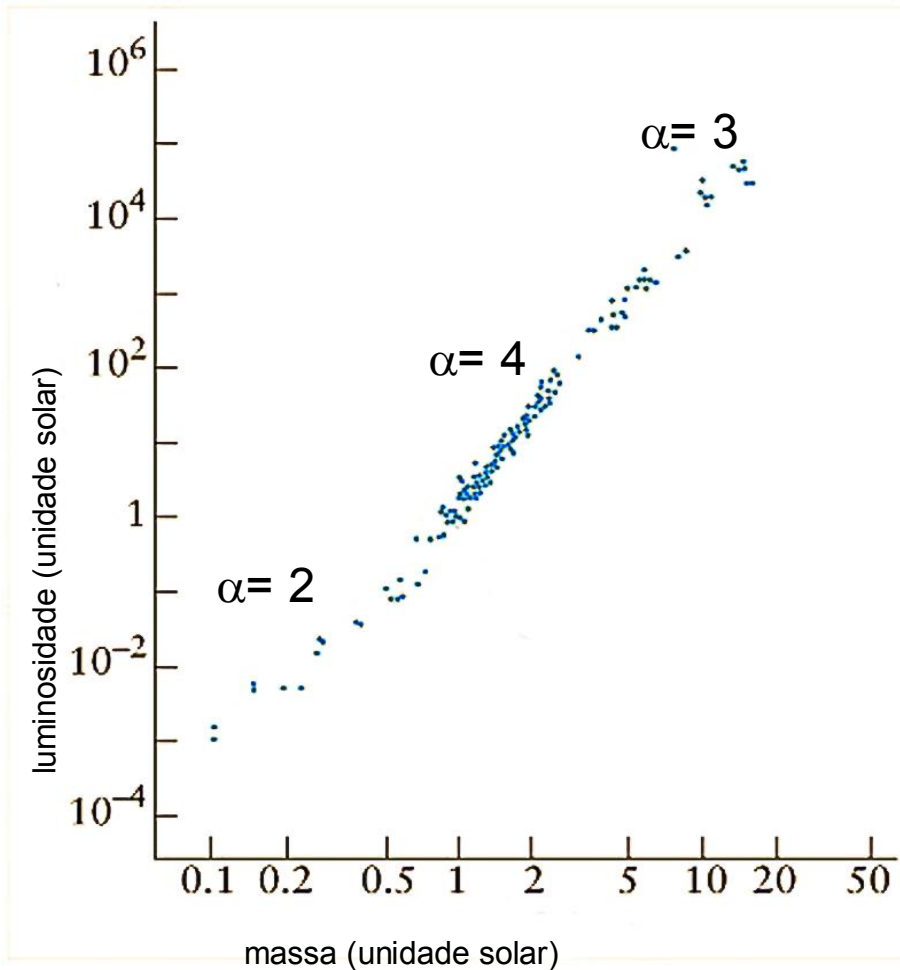
- Em 1924, Eddington sugeriu que a relação entre massa e luminosidade das estrelas\* pode ser expressa por:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\alpha}$$

- O expoente  $\alpha$  depende do tipo de estrela:
  - muito luminosas e de alta massa  $\Rightarrow \alpha \sim 3$ ;
  - estrelas semelhantes ao Sol  $\Rightarrow \alpha \sim 4$ ;
  - estrelas fracas, baixas massas  $\Rightarrow \alpha \sim 2$ .

(\*) somente válida para estrelas da seqüência principal.

# Relação Massa–Luminosidade



$$\frac{\text{luminosidade}}{\text{lum. do Sol}} = \left( \frac{\text{massa}}{\text{massa do Sol}} \right)^{3,5}$$

- Note que a massa varia entre 0,1 e 50  $M_{\odot}$ .
- A luminosidade varia de 0,001 à 1.000.000  $L_{\odot}$ .

# Densidade das estrelas

- Conhecendo a massa (**razão massa-luminosidade**) e o raio (**relação com luminosidade e temperatura**)
  - podemos calcular a densidade média de uma estrela.
  - densidade = massa/volume = massa/( $4\pi R^3/3$ )

Exemplo:

Sol: raio = 696.000 km; massa =  $1,99 \times 10^{30}$  kg

densidade =  $1,41 \text{ g/cm}^3$ .

Betelgeuse: raio =  $1000 \times R_{\odot}$ ; massa =  $10 \times M_{\odot}$ .

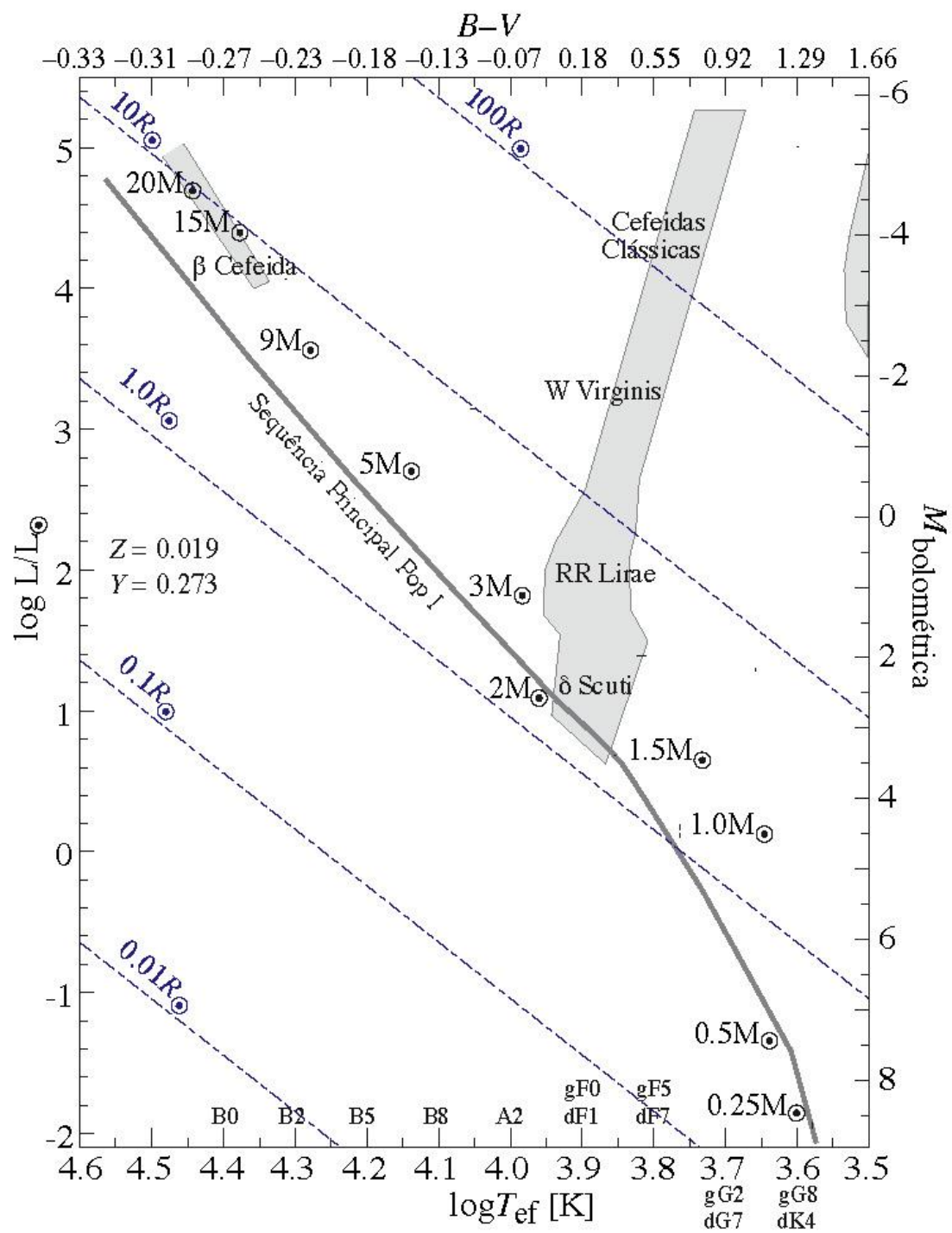
densidade =  $1,41 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^3$ .

Sirius B: raio = 1400 km; massa =  $1 M_{\odot}$ .

densidade =  $1,7 \times 10^{+8} \text{ g/cm}^3$ .

# Diagrama H-R e massa das estrelas

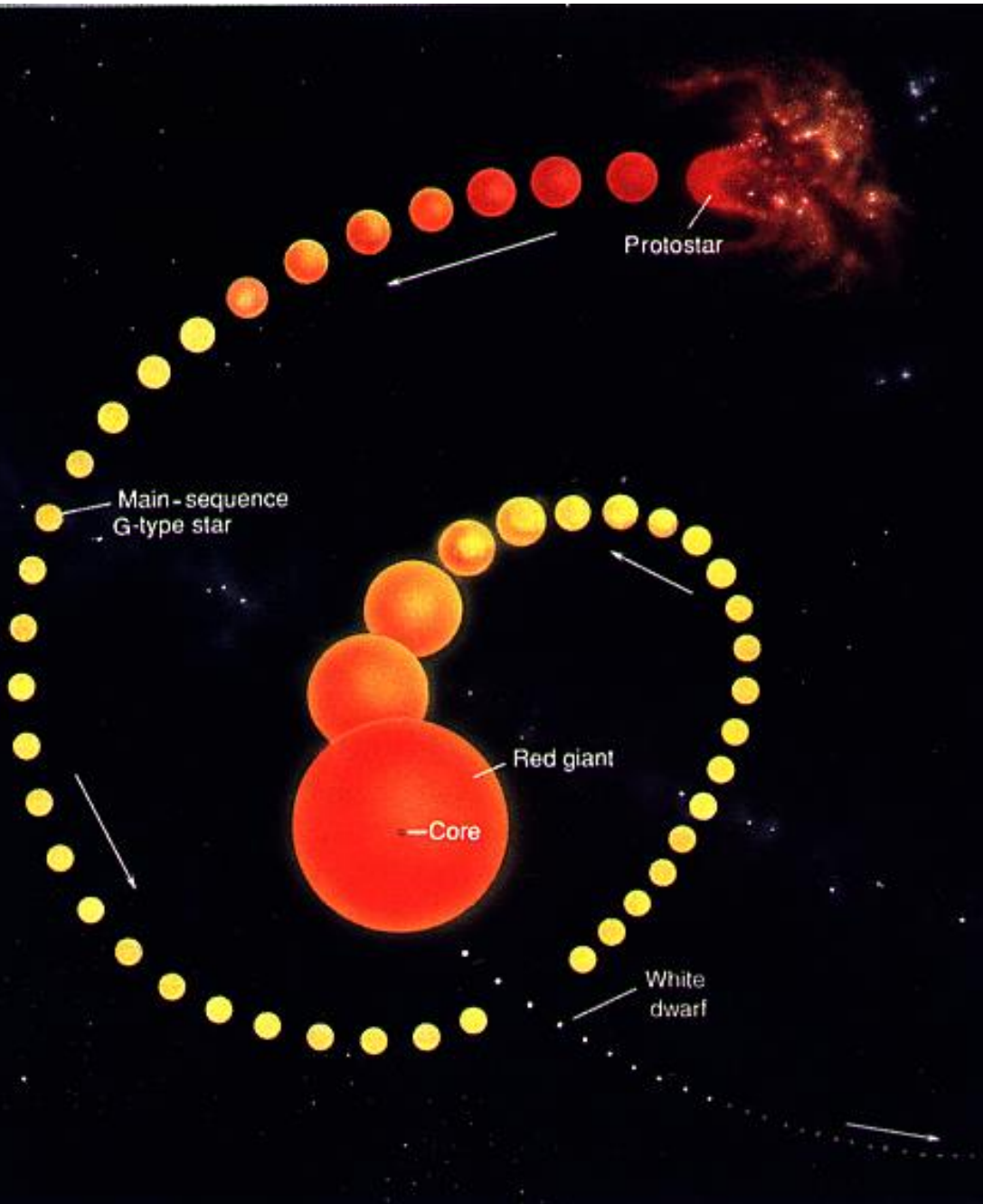
- A massa aumenta ao longo da Seqüência Principal.
- A massa é o fator determinante na posição de uma estrela ao longo da Seqüência Principal.



# Evolução Estelar

Mudanças nos  
parâmetros  
estelares

$R_{\star}$ ,  $T_{\star}$ ,  
 $M_{\star}$



# Evolução de uma Protoestrela

- Após alguns milhões de anos de contração:  
  
T ~ 2000 a 3000K → protoestrela ainda grande e brilhante →  $1M_{\odot}$

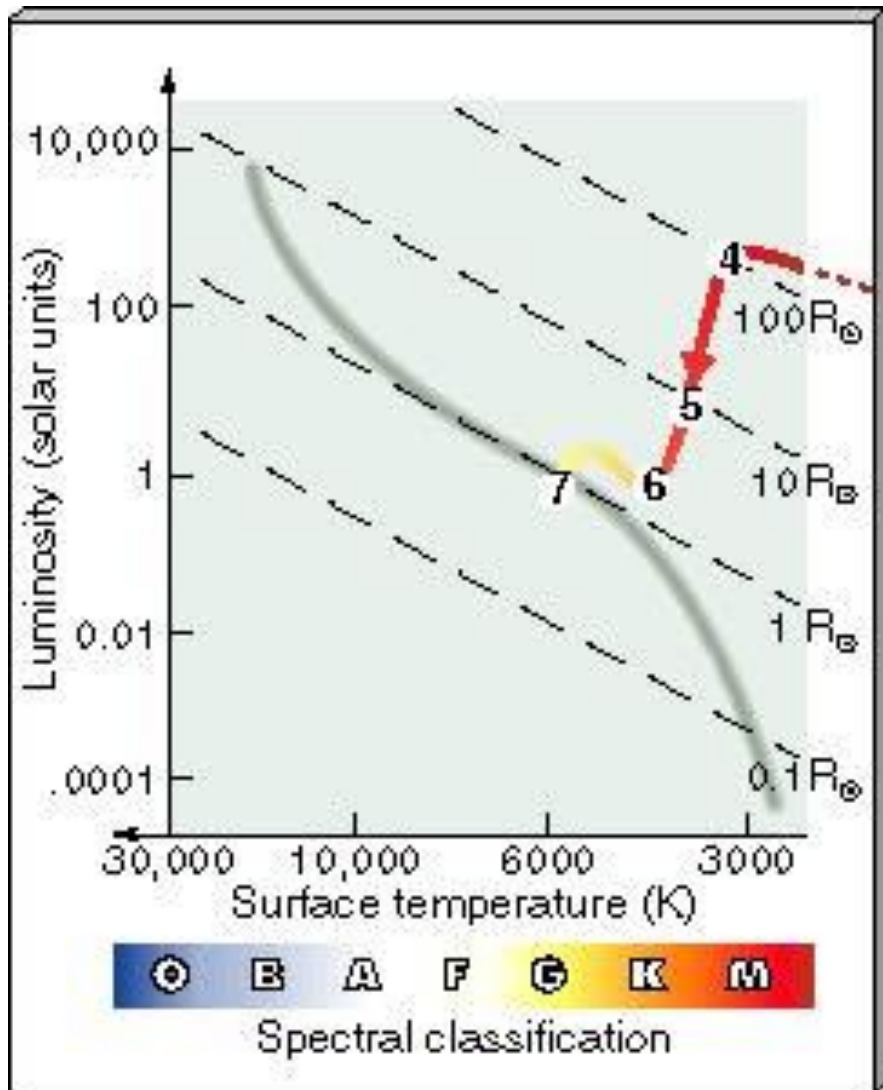
20 x diâmetro e 100 x mais brilhante que o Sol

- Trajetória evolutiva das protoestrelas **começa** na região das gigantes vermelhas no **Diagrama H-R.**

*Pois são grandes e vermelhas*



# Trajectoria Evolutiva da Protoestrela no Diagrama HR



**Protoestrela (fase 4):** começa no ramo das gigantes vermelhas

Depois disso: **move-se para baixo (L < s) e para esquerda (T > s)** : isso se deve à contração

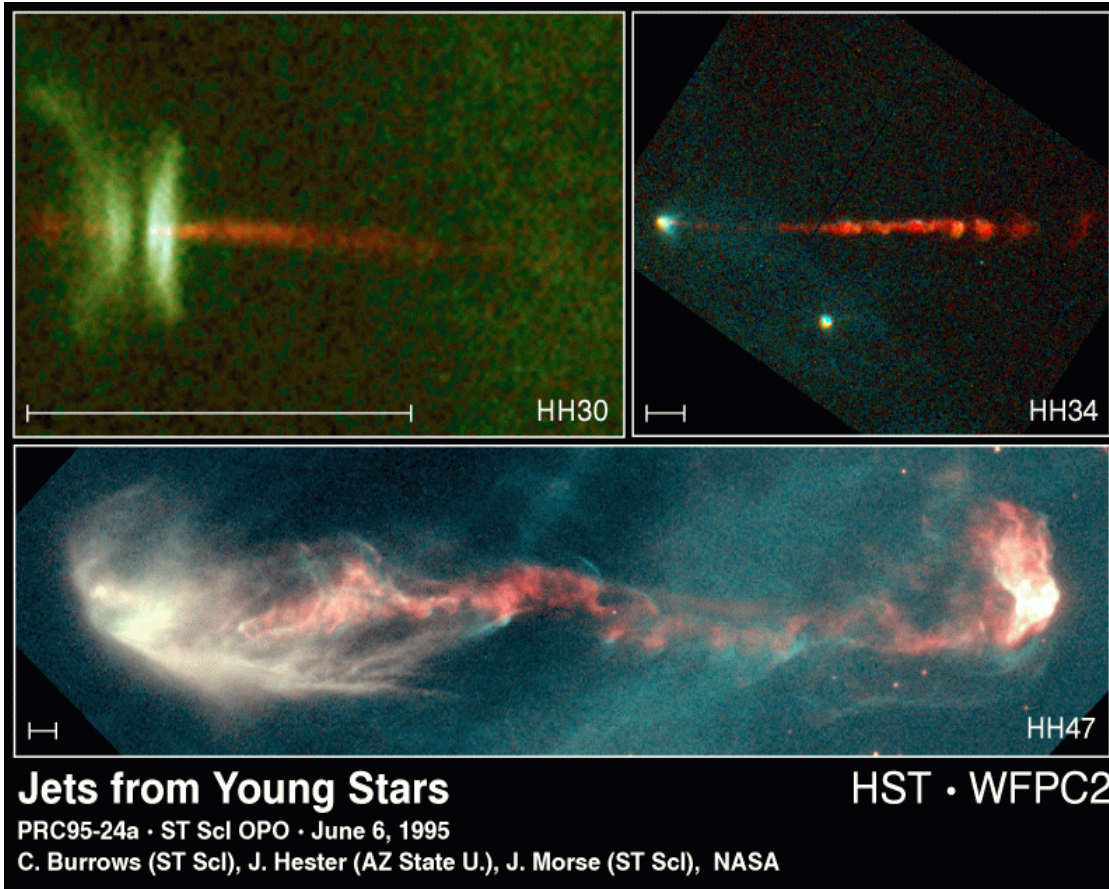
→ **T ↑ e R ↓**

**Cada vez mais: P ↑** : e trabalha contra a gravidade desacelerando contração

**Calor do núcleo da estrela:** difunde para a superfície fria: onde é irradiado

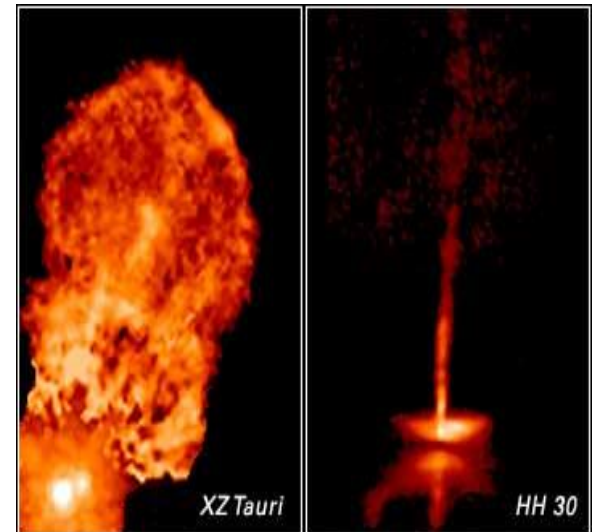
**Quando menos energia é irradiada (L <):** contração diminui (**fase 5**): atividade violenta com **liberação de ventos e jatos**

# Evidências de discos, jatos e ventos em estrelas Pré-SP

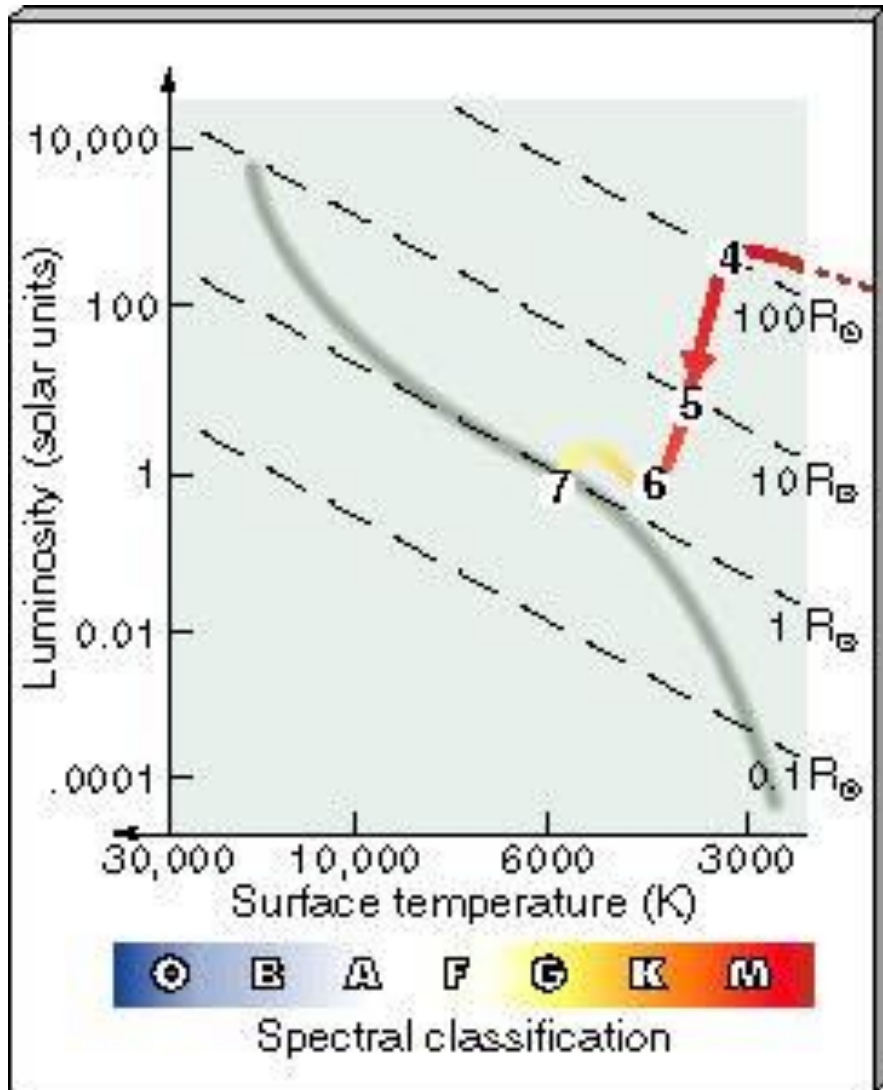


## Estrelas Pré-SP

**T-Tauri:** ~ 1 massa solar: ejeção de matéria em forma de jatos



# Trajectoria Evolutiva da Protoestrela no Diagrama HR



$10^7$  anos depois (fase 6):  
protoestrela torna-se **estrela**:

## Pre-Sequencia Principal

$$M = 1 M_{\text{sol}}$$

$$R = 10^6 \text{ km}$$

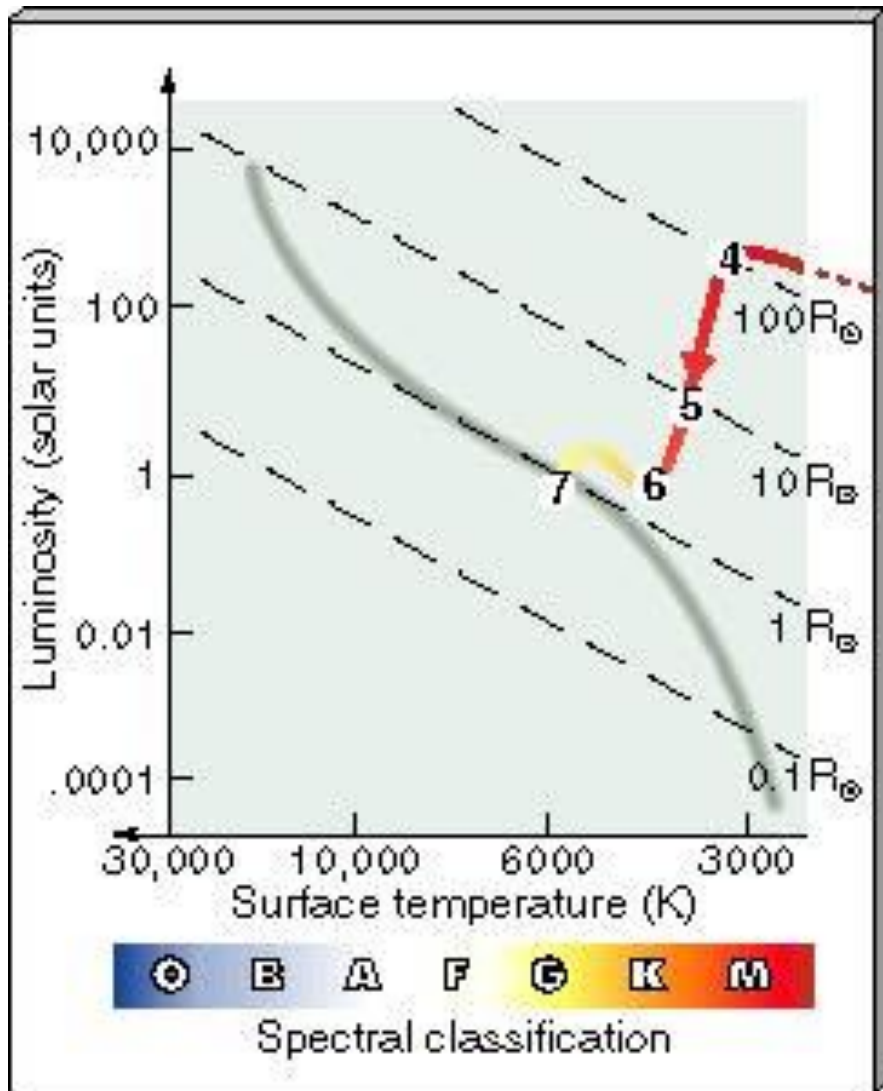
$$T_c \approx 10^7 \text{ K}$$

$$T_s = 4500 \text{ K}$$

Suficiente para iniciar reações nucleares:



# Trajectoria Evolutiva da Protoestrela no Diagrama HR



**$30 \times 10^6$  anos depois:** estrela contrai mais um pouco (ajuste fino) (fase 7):

$$n_c = 10^{32} \text{ m}^{-3}$$

$$T_c = 15 \times 10^6 \text{ K}$$

$$T_s = 6000 \text{ K}$$



**Equilíbrio Hidrostático:**

$$F_G = F_{\text{Pressao}}$$



**Entra na SP**

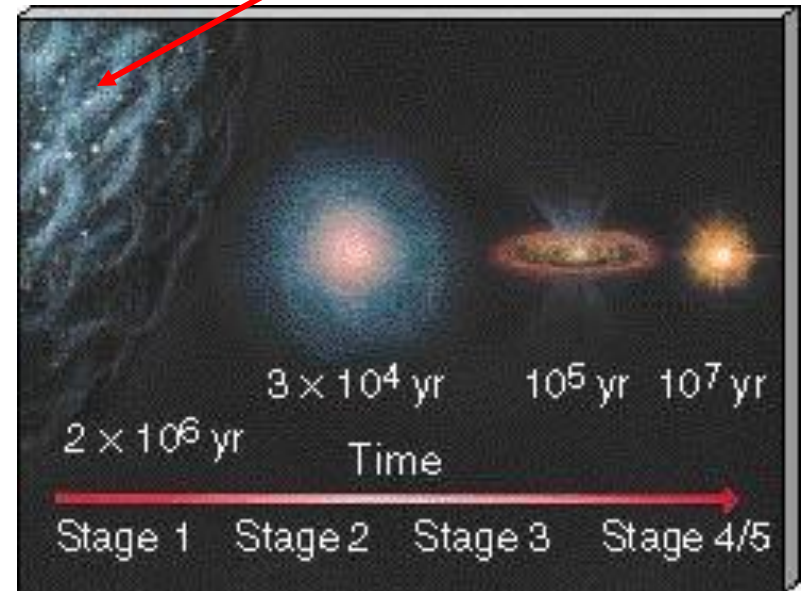
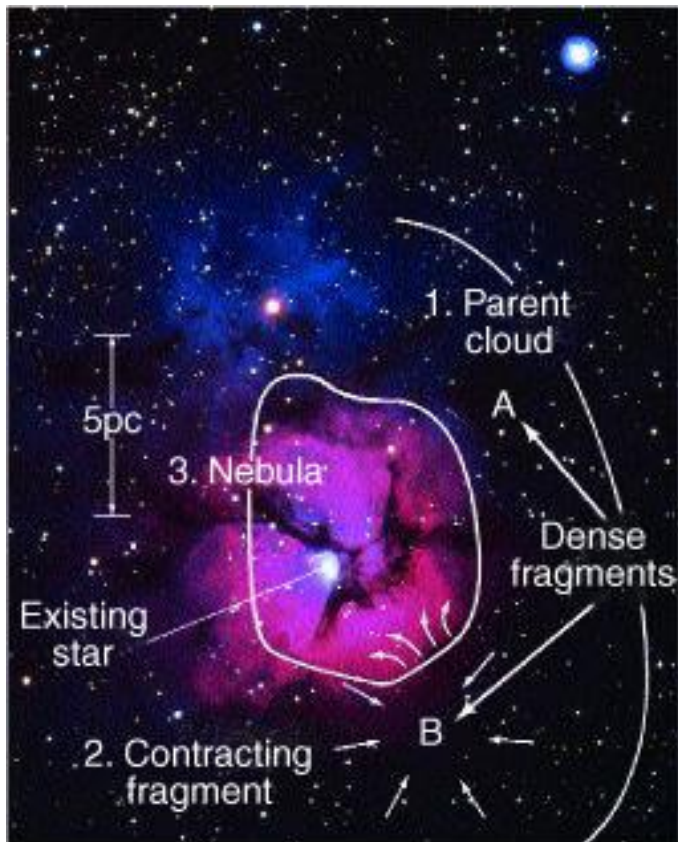
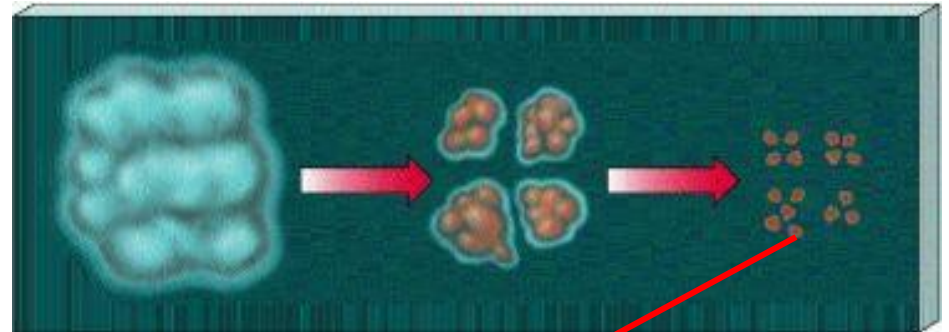
**Taxa de geracao de energia no nucleo = taxa de energia irradiada ns superficie (L)**

**Estrela como o SOL:** leva ao todo  **$40\text{-}50 \times 10^6$  anos** para chegar na SP



# NASCE UMA ESTRELA !

Gravidade > Forças de Pressão:  
COLAPSO & fragmentação



# Estrelas de outras massas

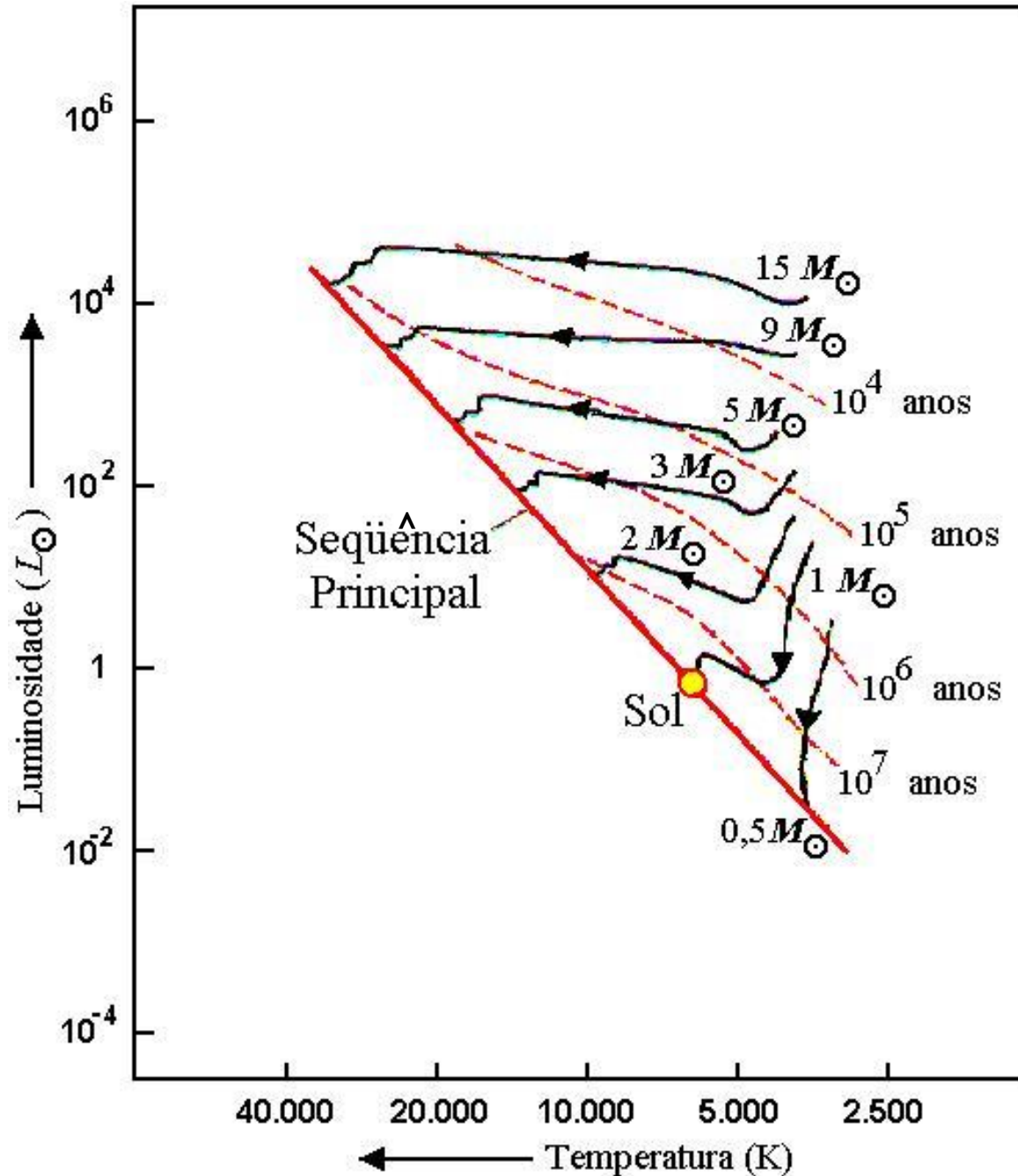
Trajectoria evolutiva depende da massa da protoestrela:

- Trajectoria que acabamos de ver: vale para estrela de  $M = 1 M_{\text{sol}}$  – dezenas de  $10^6$  anos para chegar na SP
- Protoestrela de  $M = 15 M_{\text{sol}}$ : apenas 10.000 anos para chegar na SP
- Protoestrelas com  $M \leq 0,08 M_{\text{sol}}$ : nunca desenvolve  $P_c$  e  $T_c$  altos o bastante para virar estrelas – semelhantes a planetas (Jupiter) : anas marrons
- Protoestrelas com  $M \geq 100 M_{\text{sol}}$ : desenvolvem altas  $T_s$  tao rapido que pressao da radiacao rapidamente encerra o colapso gravitacional: chega rapido na SP

# Trajeto<sup>^</sup>rias evolutivas pr<sup>^</sup>seq<sup>^</sup>ncia principal (PSP):

para estrelas de diferentes massas

a protoestrela caminha p/ esquerda (T↑) e p/ baixo (L↓).



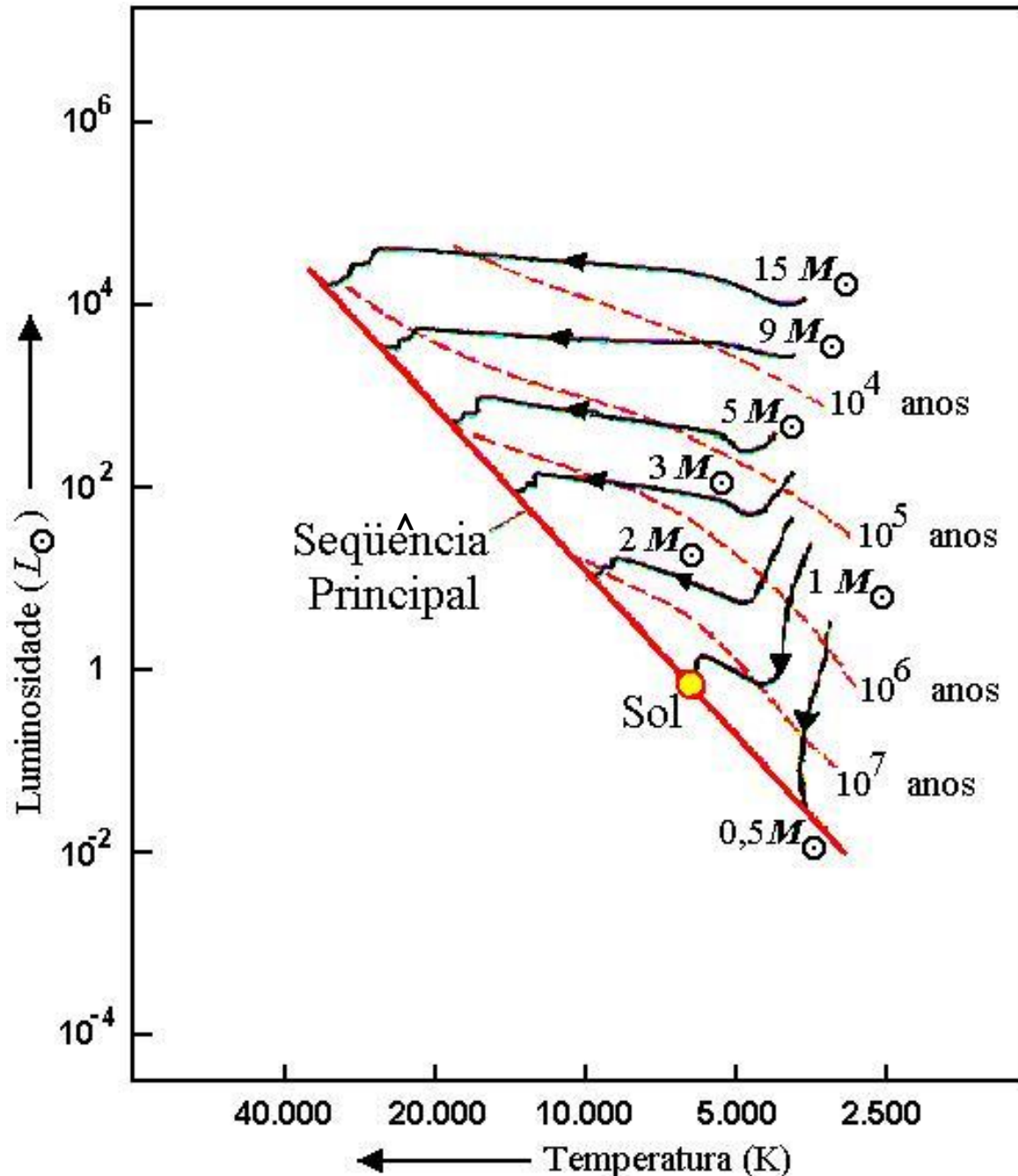
# Trajatórias evolutivas pré-seqüência principal (PSP)

Note que a SP - NAO é  
trajetoria evolutiva:

estrelas **NÃO** evoluem ao  
longo da SP

**SP: onde a estrela fica >**  
**parte de sua vida**

Por ex.: uma estrela que  
chega na SP como uma  
estrela G jamais podera  
transformar-se em uma  
estrela O ou B na SP, ou  
descer para tornar-se uma  
ana-vermelha tipo M





# Exemplos de estrelas na pré-sequência principal

## O Sol na sua juventude



### T Tauri

1-2  $M_{\odot}$

tipo espectral F a M

$T_s = 3000$  a  $7000$  K

Acreção de matéria da nuvem progenitora em forma de disco

Ejeção de matéria em jatos e ventos

Grande variabilidade de brilho no IV e UV

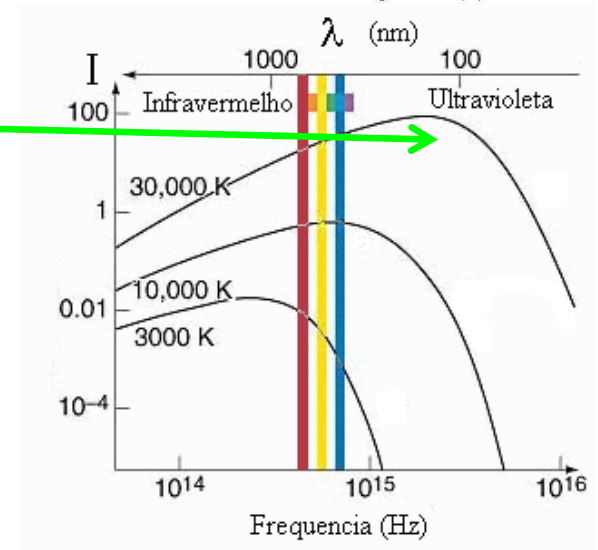
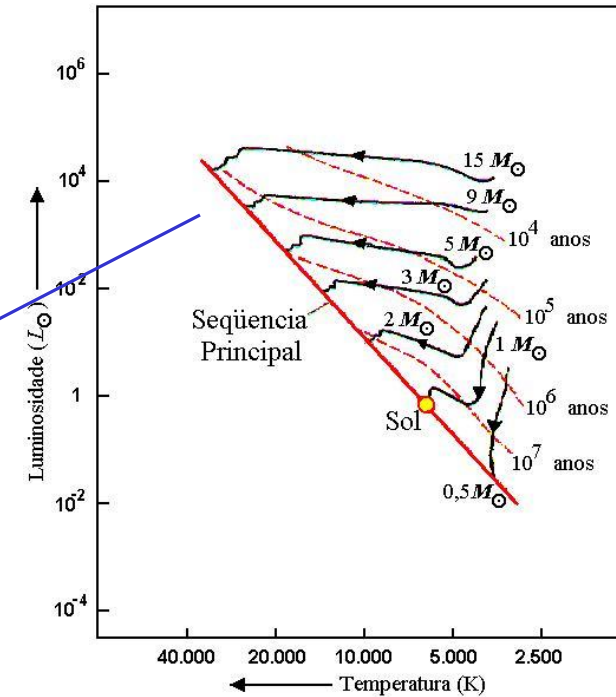
### Ae/Be de Herbig

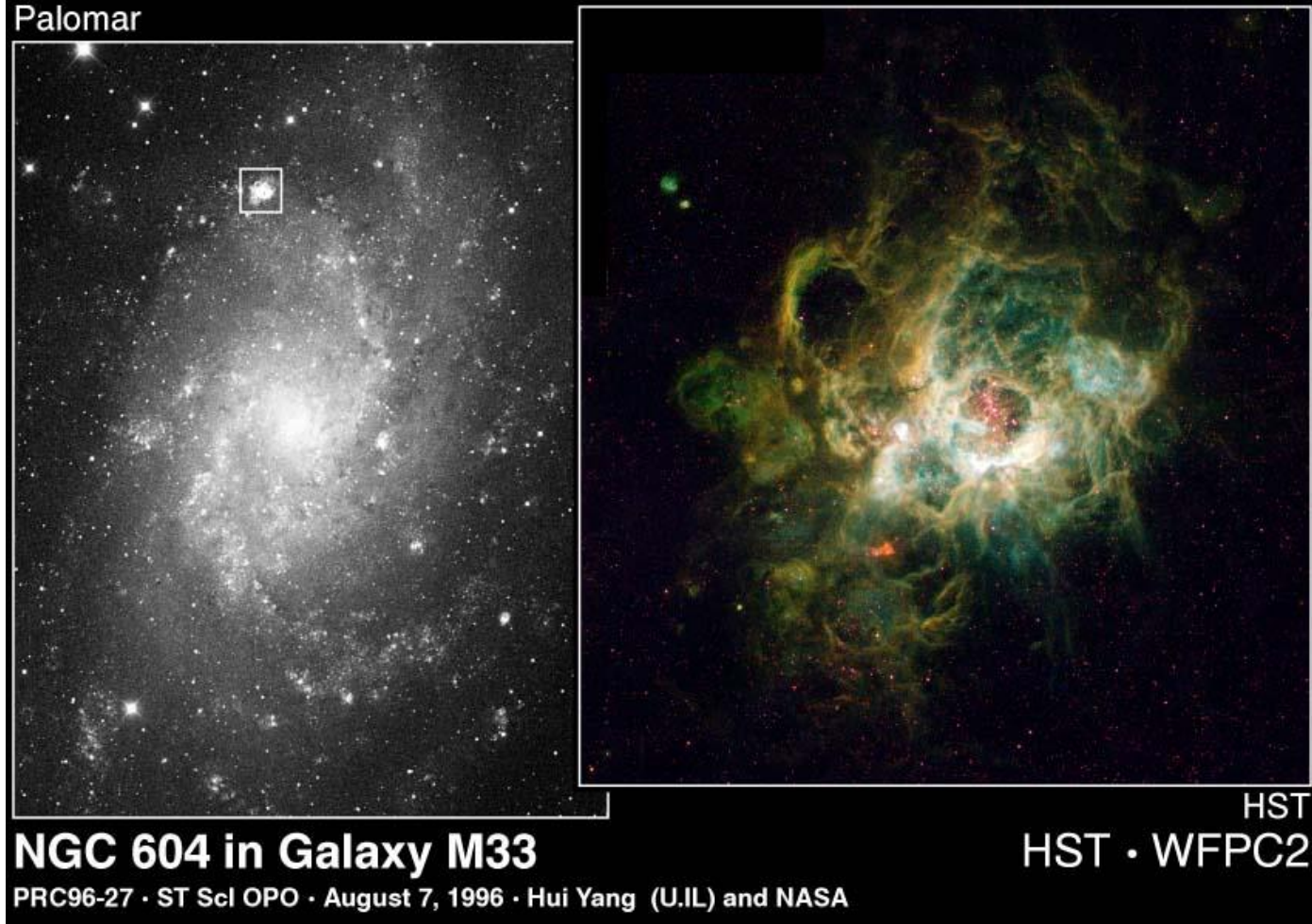
$\sim 2-8 M_{\odot}$

semelhantes às T T mais quentes

# Associações OB

- As estrelas mais massivas ( $\gg M_{\text{sol}}$ ) ficam pouco na pré-seqüência principal.
- Tipo O e B são as mais quentes e luminosas; com forte emissão ultra-violeta.
- Grupos destas  $\star$ s formam as chamadas Associações OB.





Formação de estrelas na galáxia M33. Centenas de estrelas massivas no interior de NGC604 produzem fortes ventos formando uma cavidade no interior da nebulosa.

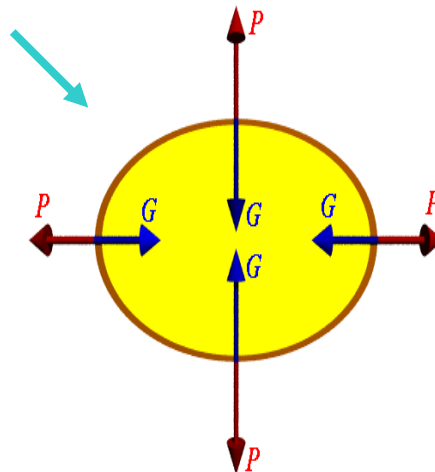
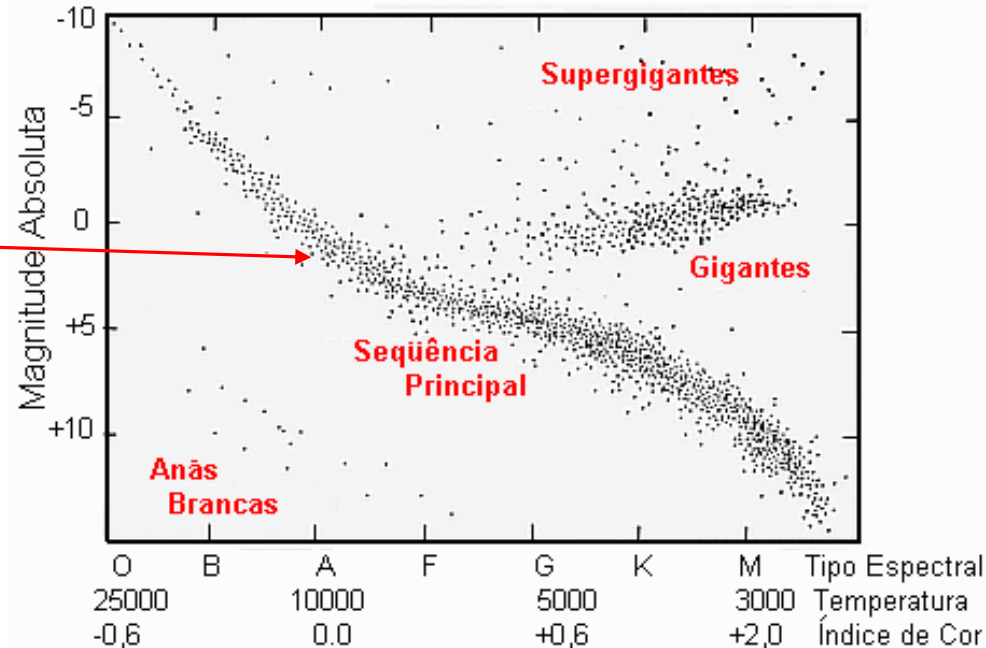
# Sequencia Principal

- Quando estrela chega na **SP** do diagrama HR:

↓  
fase de **vida madura**:  
queima  $4\text{ H} \rightarrow \text{He}$

fase duradoura e estavel:  
**equilibrio hidrostático**

$R, L, T_s$ : constantes



# Tempo de vida na Seqüência Principal

Quanto maior a massa:

- Temperatura interior aumenta rapidamente.
- Alta luminosidade superficial
- Consumo de “combustível” com maior eficiência.



Menor tempo de vida

# Relação Massa/Luminosidade

Vimos que:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{\alpha}$$

- $\alpha \sim 3$  (altas M & L)
- $\alpha \sim 4$  ( $\sim M_{\odot}$  &  $L_{\odot}$ )
- $\alpha \sim 2$  (baixas M & L)

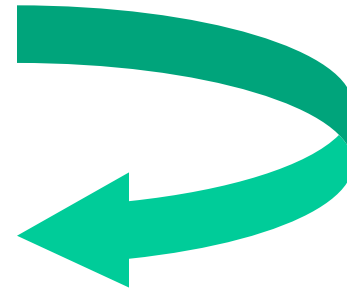
- O tempo de vida na SP depende da massa e da taxa de produção de energia da estrela  $dE/dt$  (=luminosidade).

$$t_* \propto \frac{M_*}{L_*}$$

- Usando a relação M-L

$$\frac{t_*}{t_{\odot}} = \frac{\frac{M_*}{M_{\odot}}}{\frac{L_*}{L_{\odot}}} = \frac{\frac{M_*}{M_{\odot}}}{\left(\frac{M_*}{M_{\odot}}\right)^{3,3}}$$

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{3,3}$$



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

O término do H no interior do caroço estelar (saída da seqüência principal) depende da massa da estrela:

para  $M_* \uparrow$  temos  $t_* \downarrow$

Ex: **estrelas O,B**  $\Rightarrow t_* \sim$  dezenas de milhões de anos

p/  $M_* \downarrow \Rightarrow t_* \uparrow$

Ex: **anãs vermelhas**  $\Rightarrow t_* \sim$  trilhões de anos



# Estágios Finais determinados pela massa

- $M \sim 1 M_{\odot}$  : gigante vermelha  $\Rightarrow$  nebulosa planetária

Anã branca 

- $M > 8 M_{\odot}$  : explosão de supernova  $\Rightarrow$

Estrela de Nêutrons; Pulsar

- $M \gg 1 M_{\odot}$  : explosão mais violenta  $\Rightarrow$

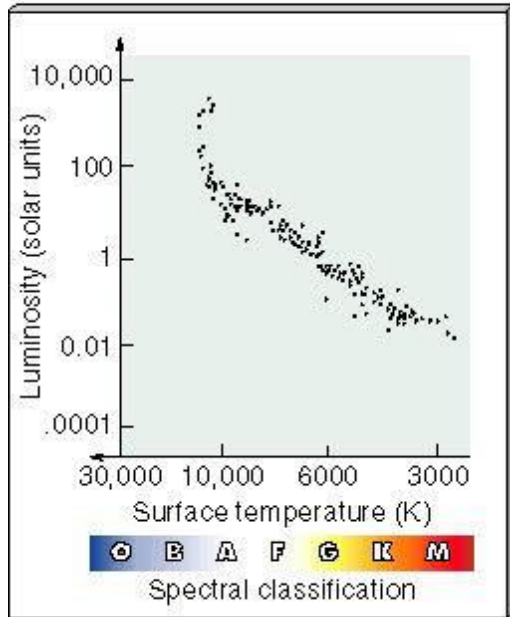
Buraco Negro

# Aglomerados Estelares

- No aglomerado:
  - Todas formaram-se ao mesmo tempo de 1 mesma nuvem
  - todas estrelas à mesma distancia
    - diagrama HR pode ser construido apenas com magnitudes aparentes ( $V$ ) e indices de cor ( $B-V$ ) das estrelas

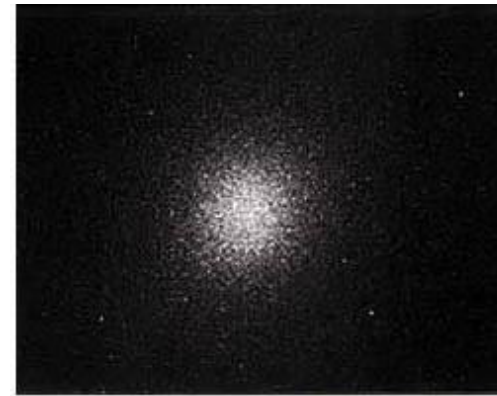


(a)

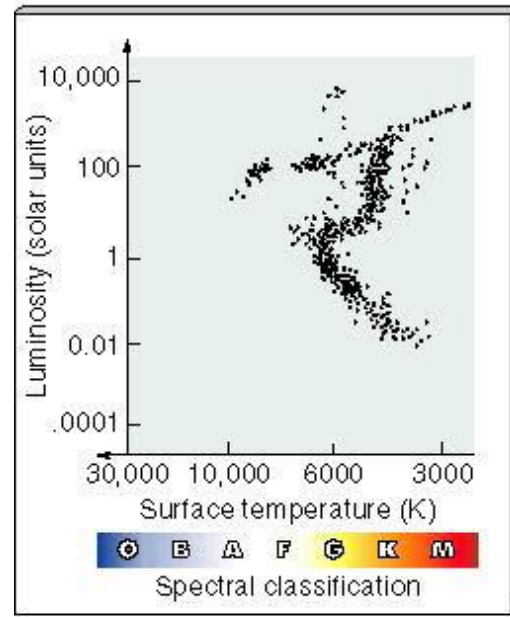


(b)

**Agl. Pleiades: Jovem**



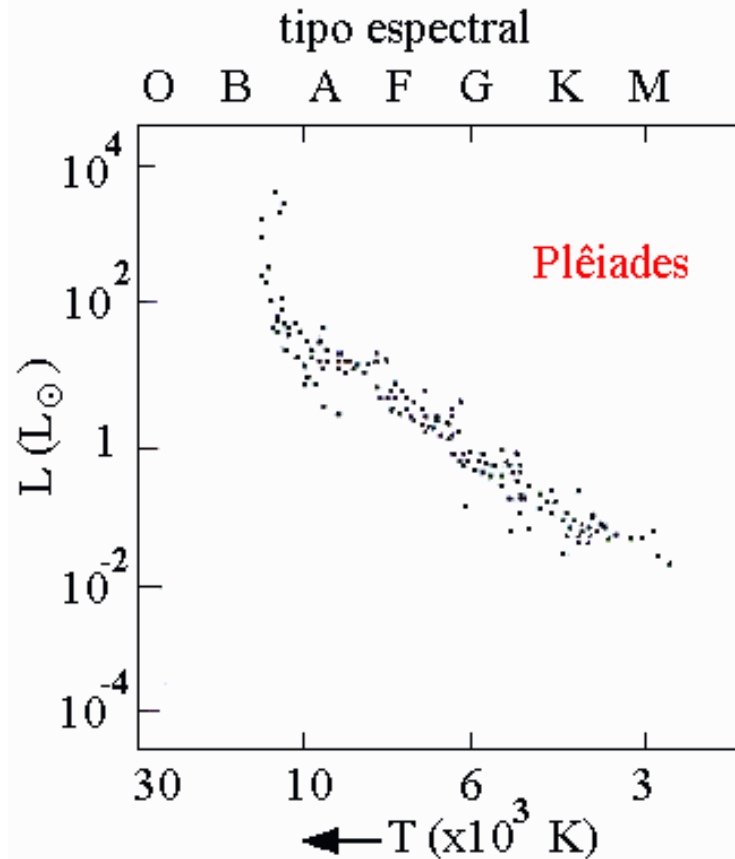
(a)



(b)

**Agl. Omega Cen: Velho**

# Aglomerado aberto (jovem)

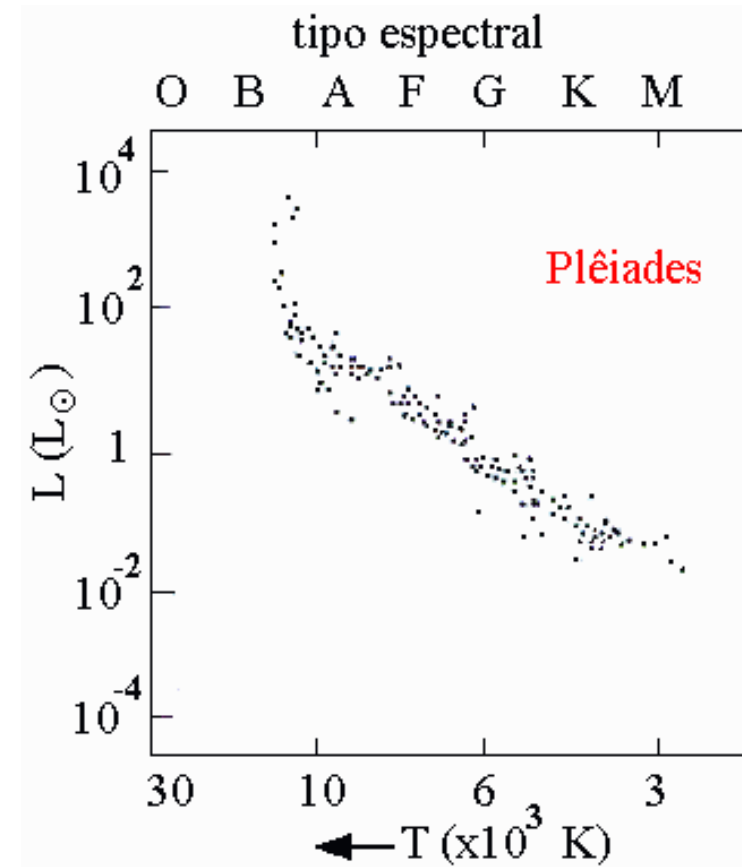


Plêiades

# Aglomerado aberto (jovem)

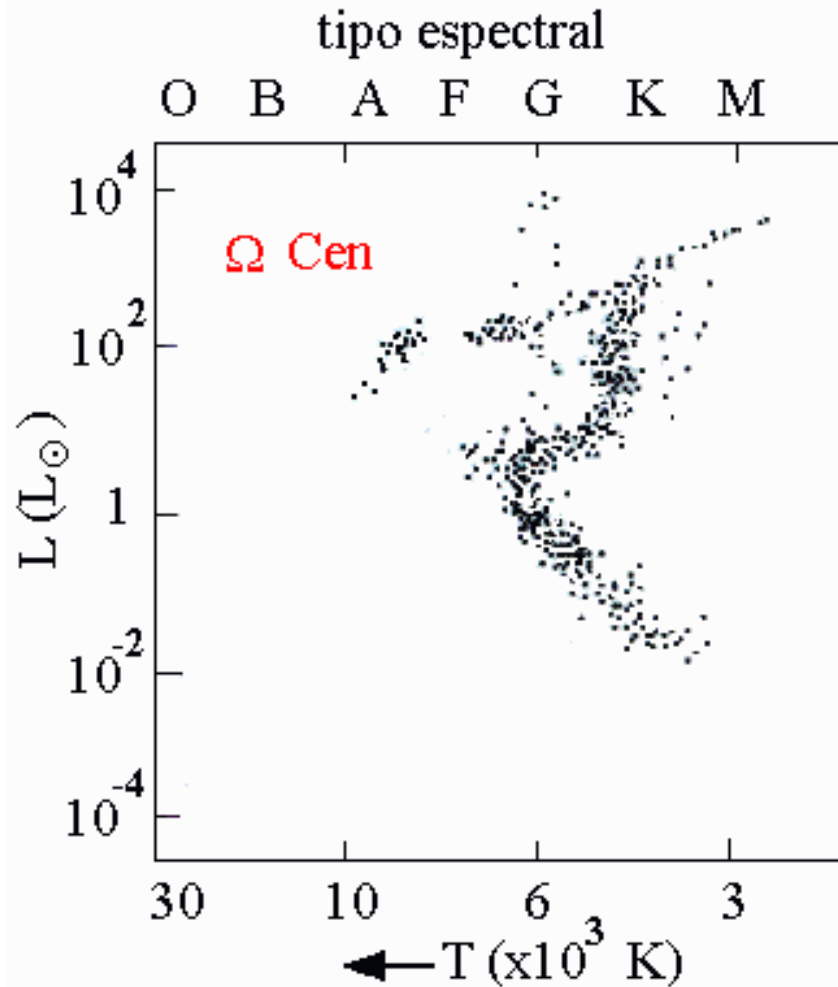
- **Estrelas em toda SP**
- **As estrelas azuis O (alto, esquerda do diagrama HR):** ainda **jovens** pois entram na SP rapidamente e vivem nesta apenas **dezenas de milhões de anos**
- Como todas as estrelas formaram-se ao mesmo tempo: estimar idade do aglomerado:

**20 milhões de anos (vida das estrelas O na SP)**



Plêiades

# Aglomerado globular (velho)



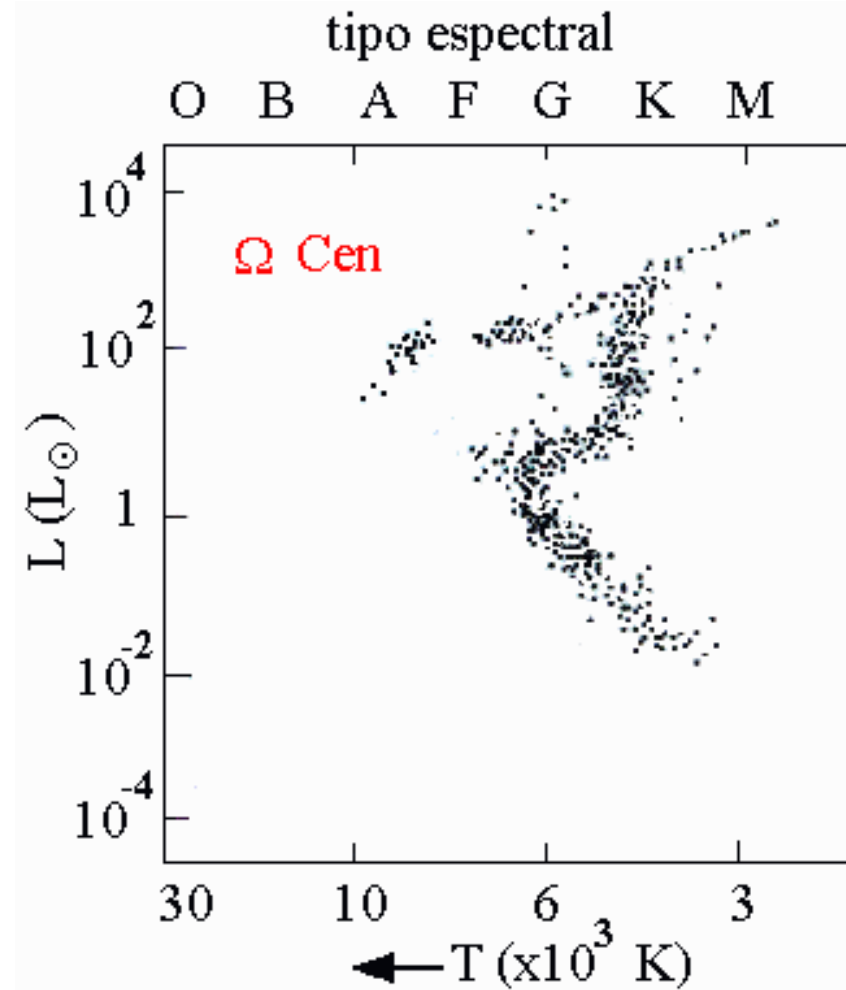
Ômega Centauro:

# Aglomerado globular (velho)

- Aglomerado esférico: centenas de milhares de estrelas (ate milhares de estrelas em alguns casos)
- $D = 50$  pc
- Distancia  $d = 5000$  pc
- **Falta de estrelas O e B** (ja morreram)
- Aglomerados globulares nao contem na SP estrelas com  $M > 0,8 M_{\text{sol}}$ :

→ Idade 10 bilhoes de anos

Estrelas mais velhas de nossa Galaxia



Ômega Centauro:

# Modelo para a Evolução de um aglomerado estelar

