

Evolução e estrutura estelar I

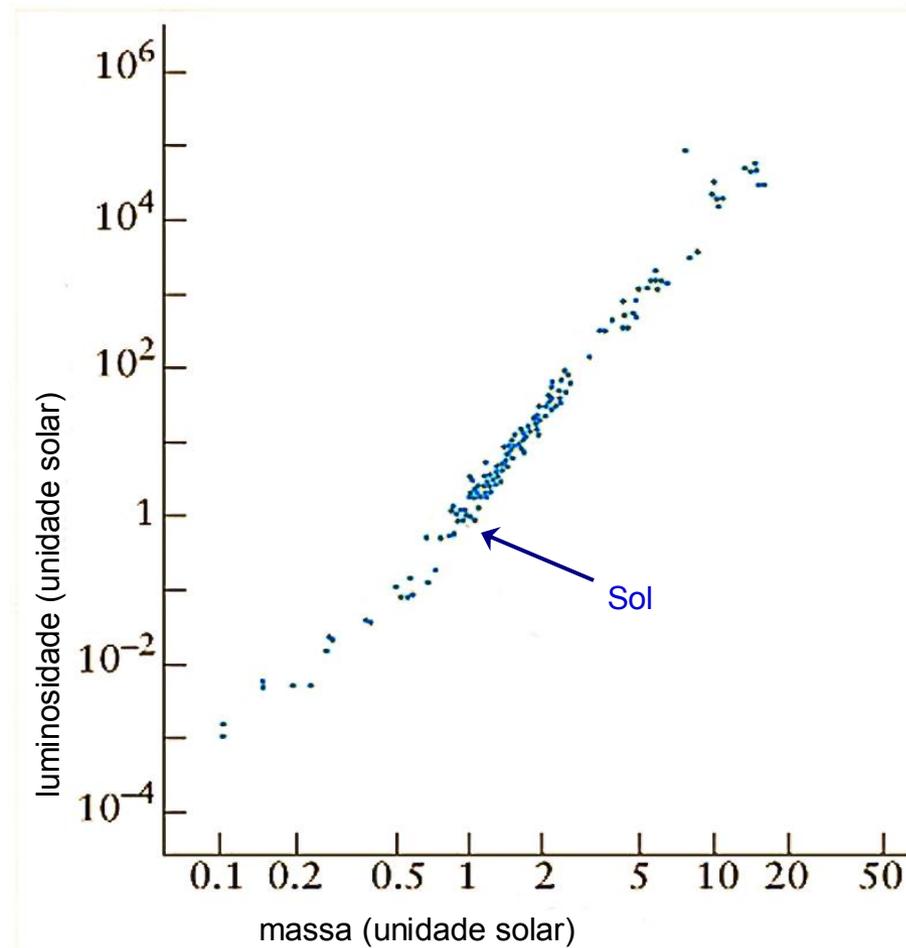
- ASTRONOMIA GERAL
- FIS004
- Prof. Gustavo Guerrero

- 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

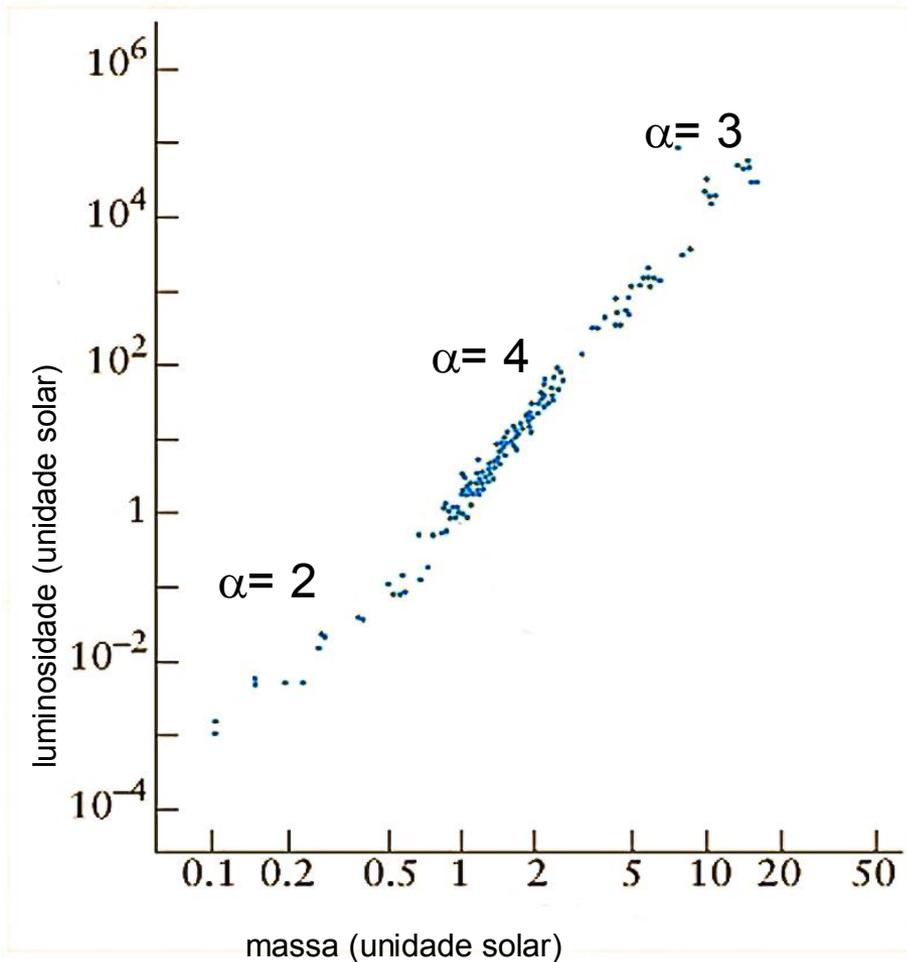
- Em 1924, Eddington sugeriu que a relação entre massa e luminosidade das estrelas* pode ser expressa por:

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

- O expoente α 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 = $10 \times M_{\odot}$.

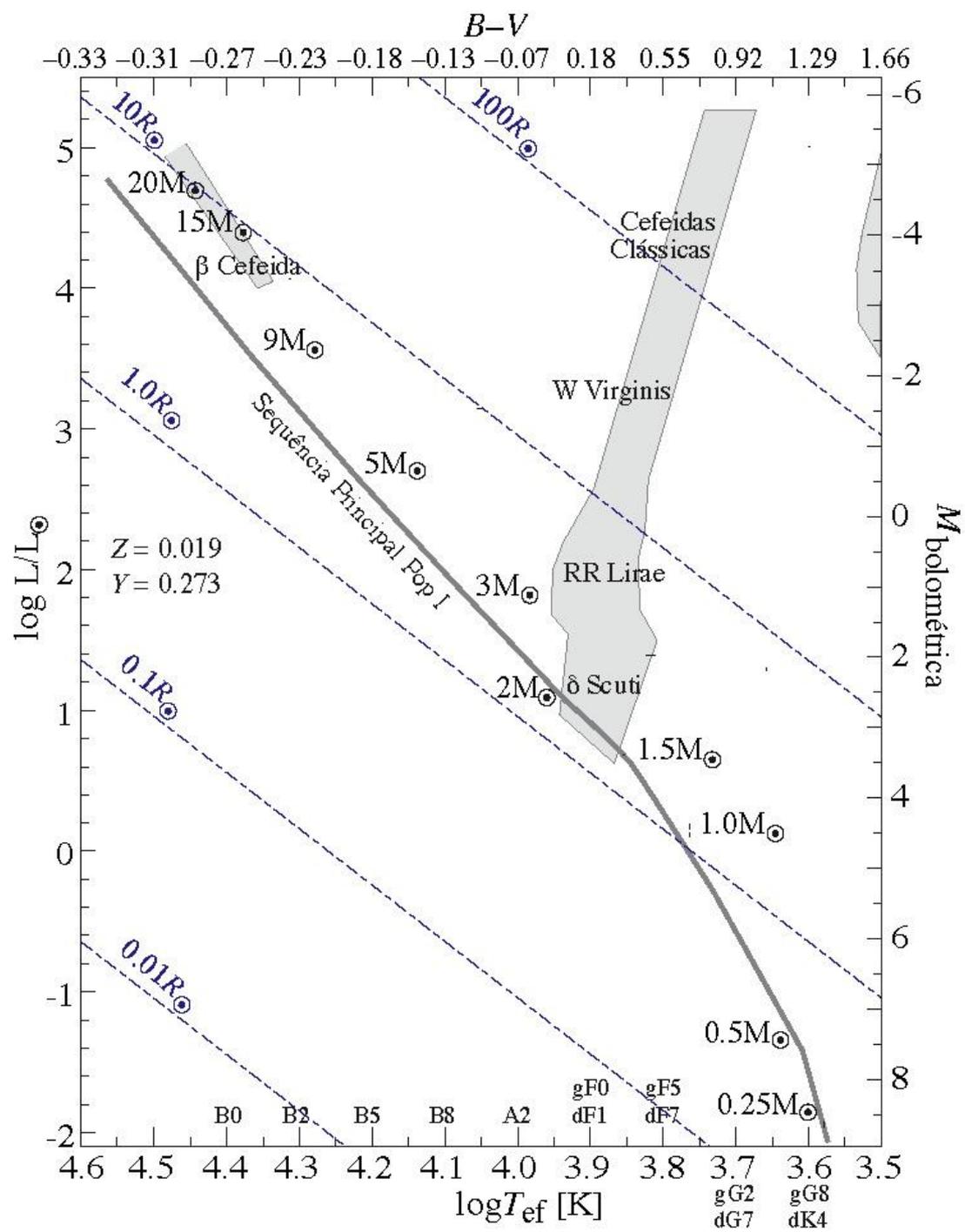
densidade = $1,41 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^3$.

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

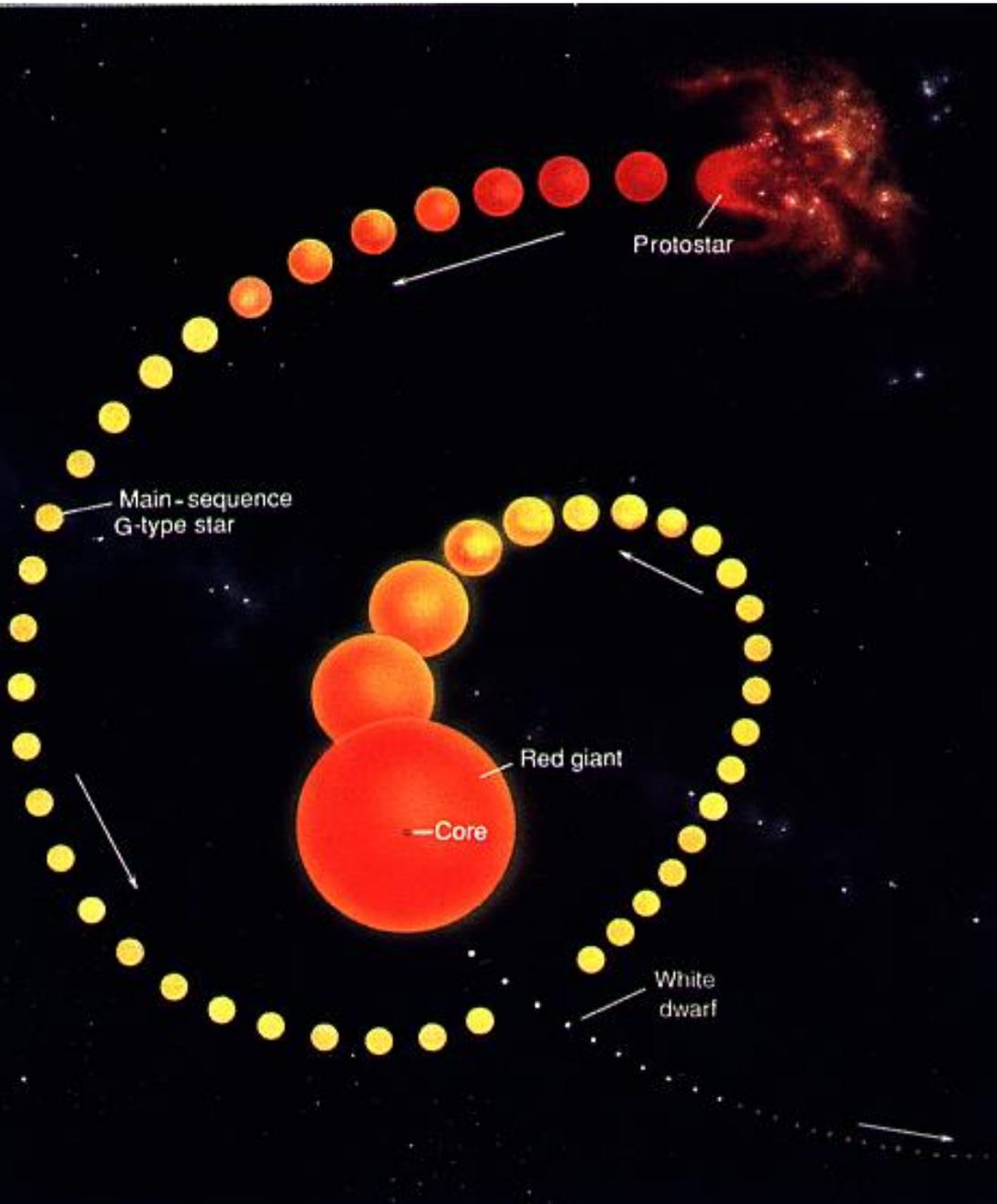
- A massa aumenta ao longo da Seqüência Principal.
- A massa é o fator determinante na posição de uma estrela ao longo da Seqüência Principal.



Evolução Estelar

Mudanças nos
parâmetros
estelares

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



Evolução de uma Protoestrela

- Após alguns milhões de anos de contração:

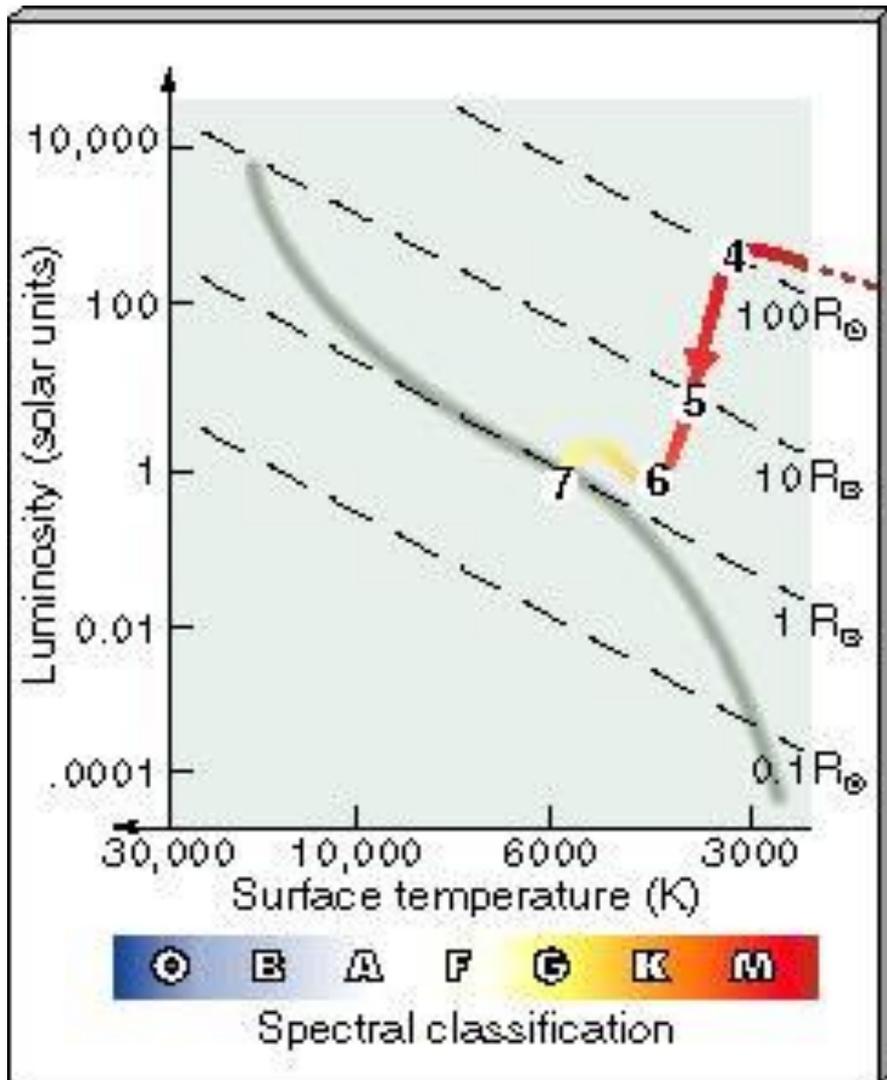
T ~ 2000 a 3000K → protoestrela ainda grande e brilhante → $1M_{\odot}$

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

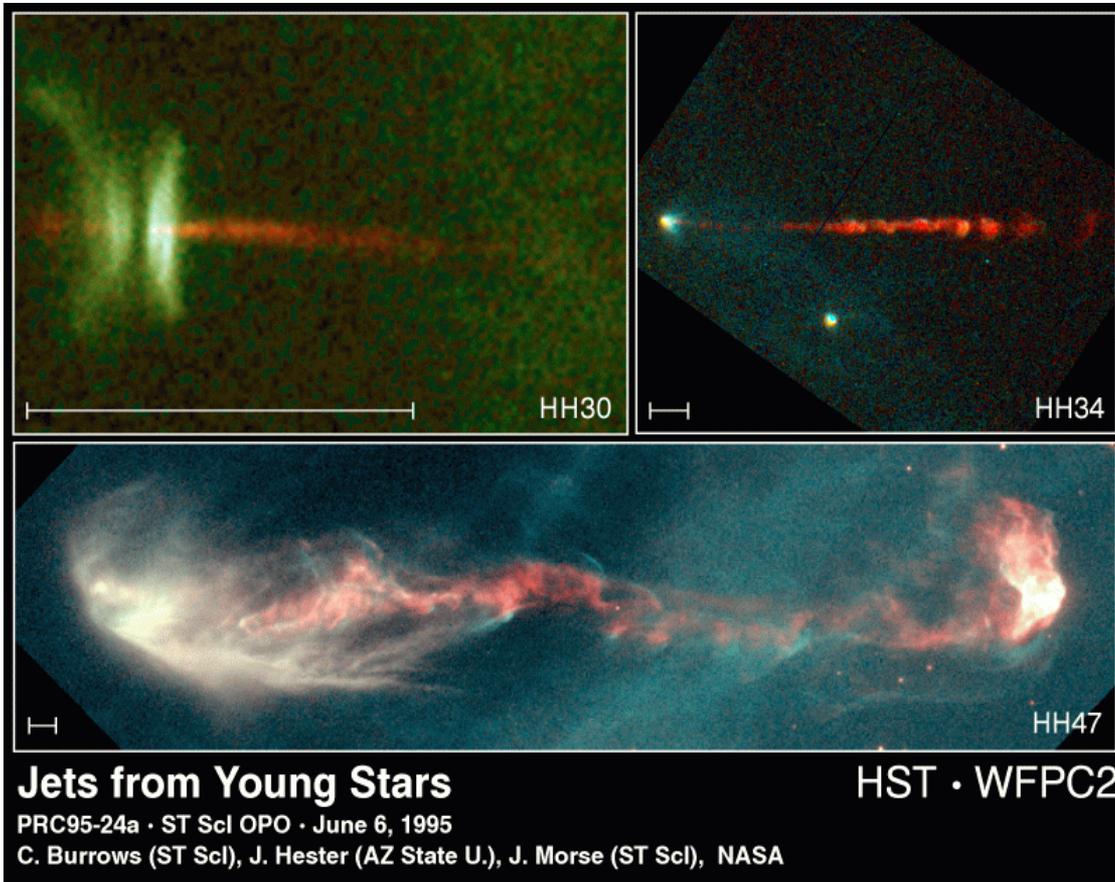
→ **T ↑ e R ↓**

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

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

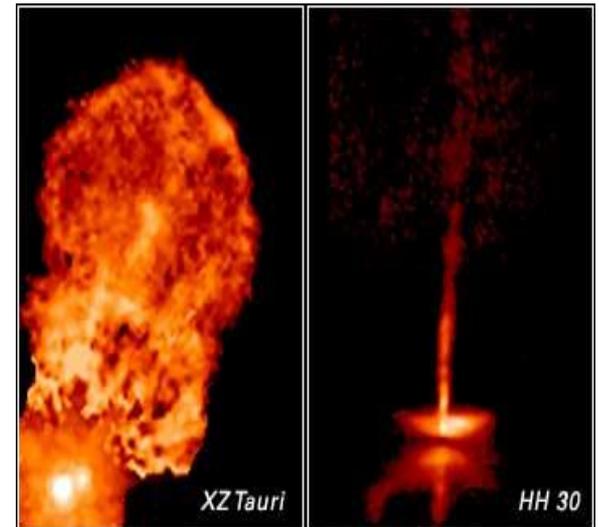
Quando menos energia é irradiada (L <): contração diminui (**fase 5**): atividade violenta com **liberação de ventos e jatos**

Evidencias de discos, jatos e ventos em estrelas Pré-SP

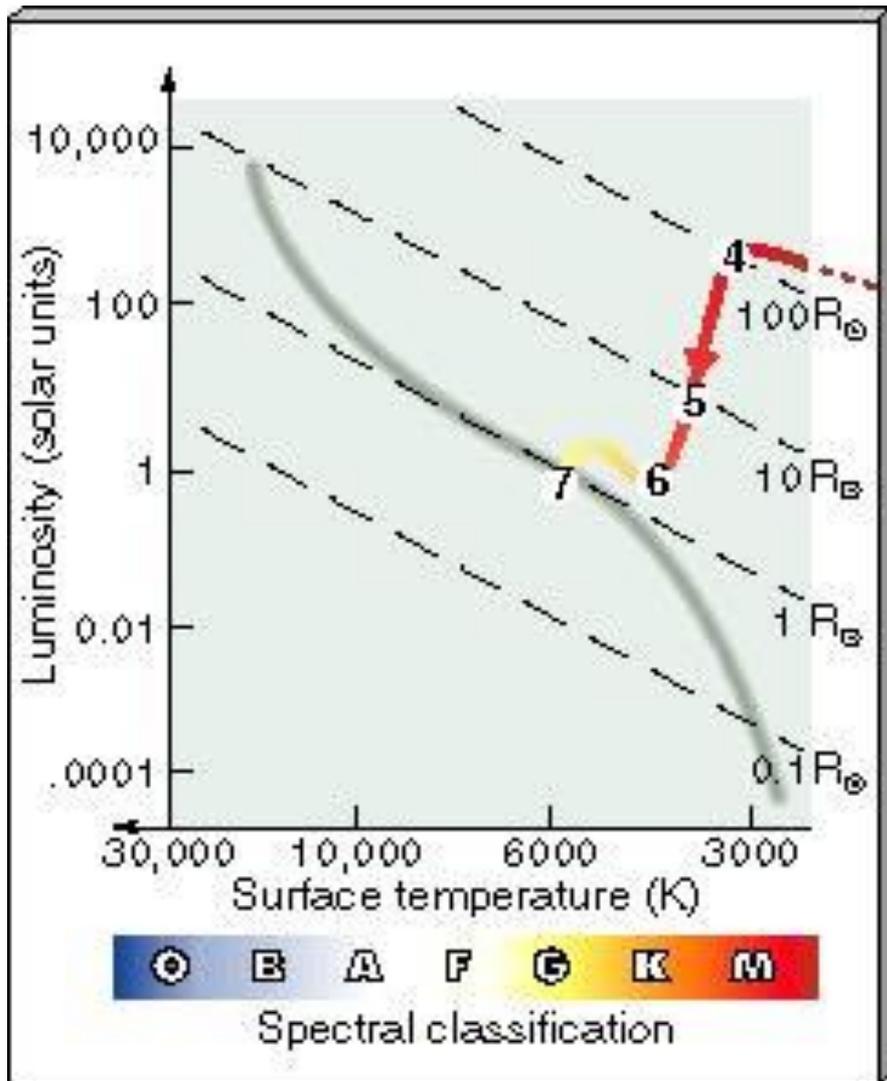


Estrelas Pré-SP

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

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

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

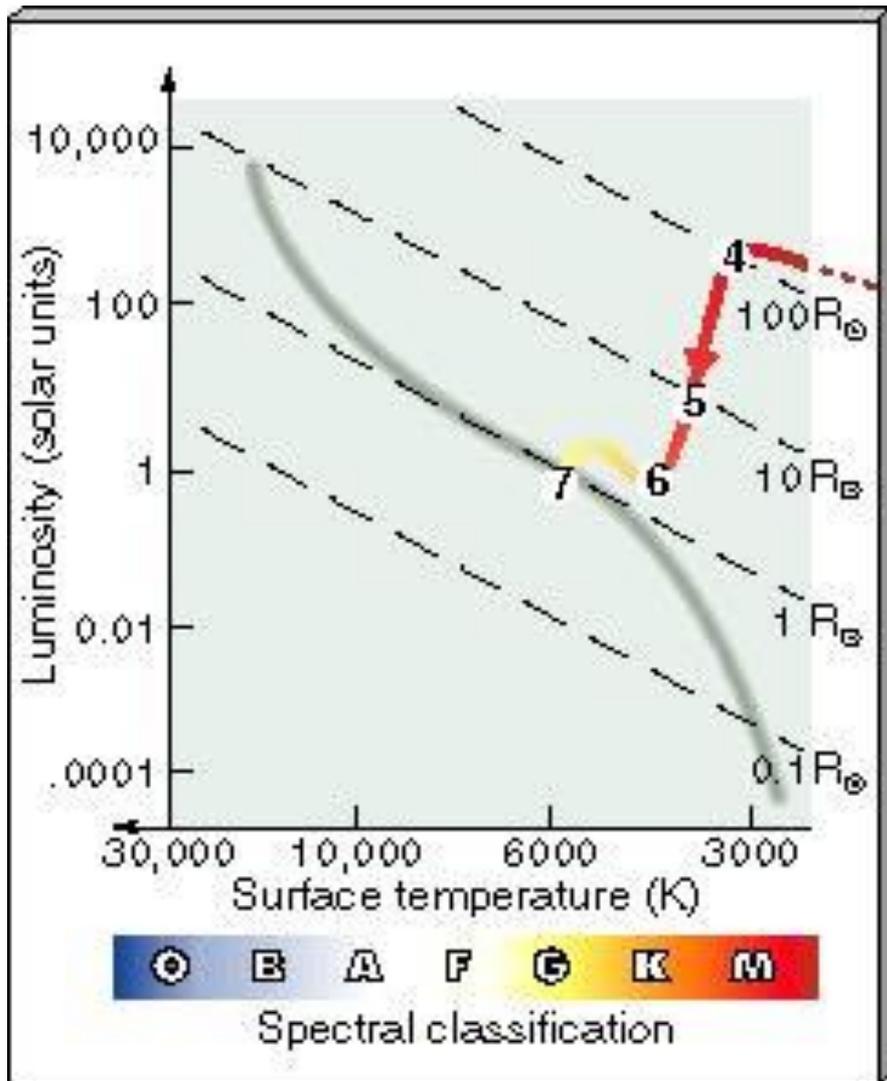
$$T_c \approx 10^7 \text{ K}$$

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

Suficiente para iniciar reações nucleares:



Trajectoria Evolutiva da Protoestrela no Diagrama HR



30 x 10⁶ 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:

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



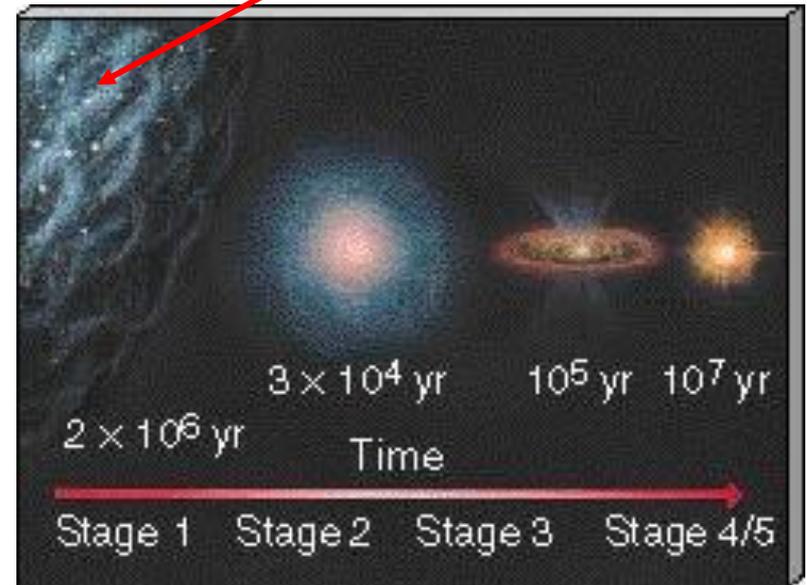
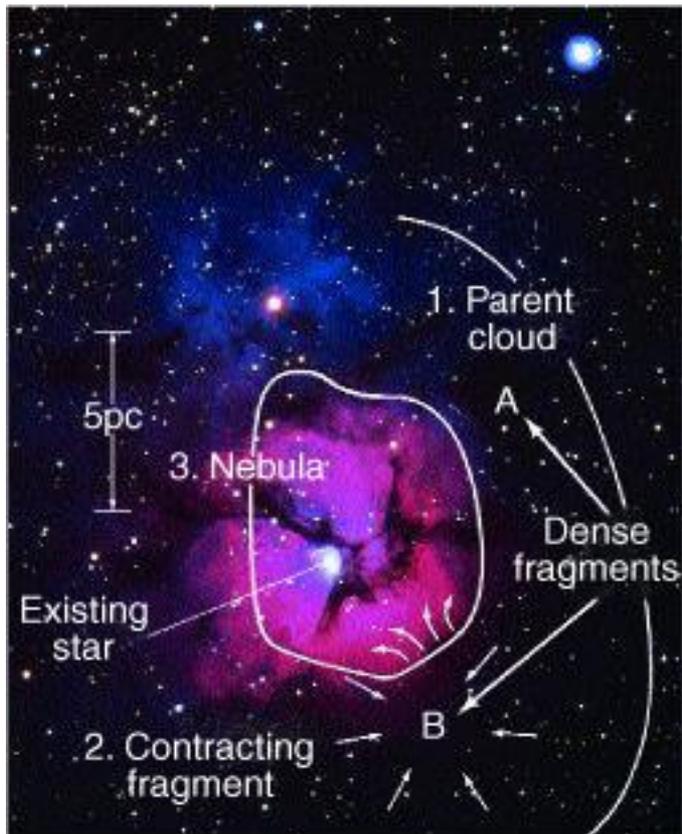
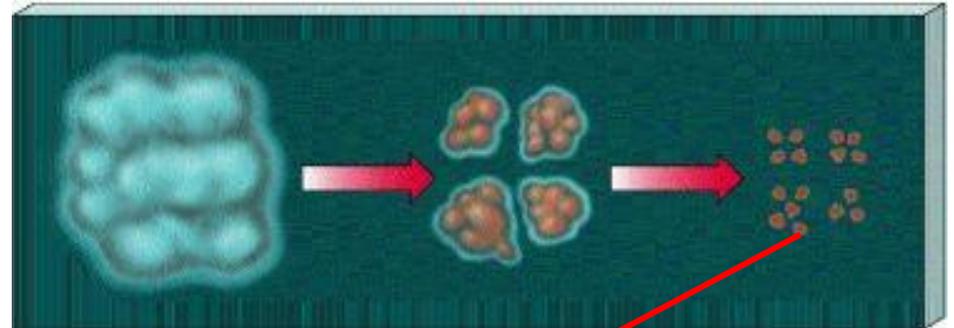
Entra na SP

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

Estrela como o SOL: leva ao todo **40-50 x 10⁶ anos** para chegar na SP

NASCE UMA ESTRELA !

Gravidade > Forças de Pressão:
COLAPSO & fragmentação



Estrelas de outras massas

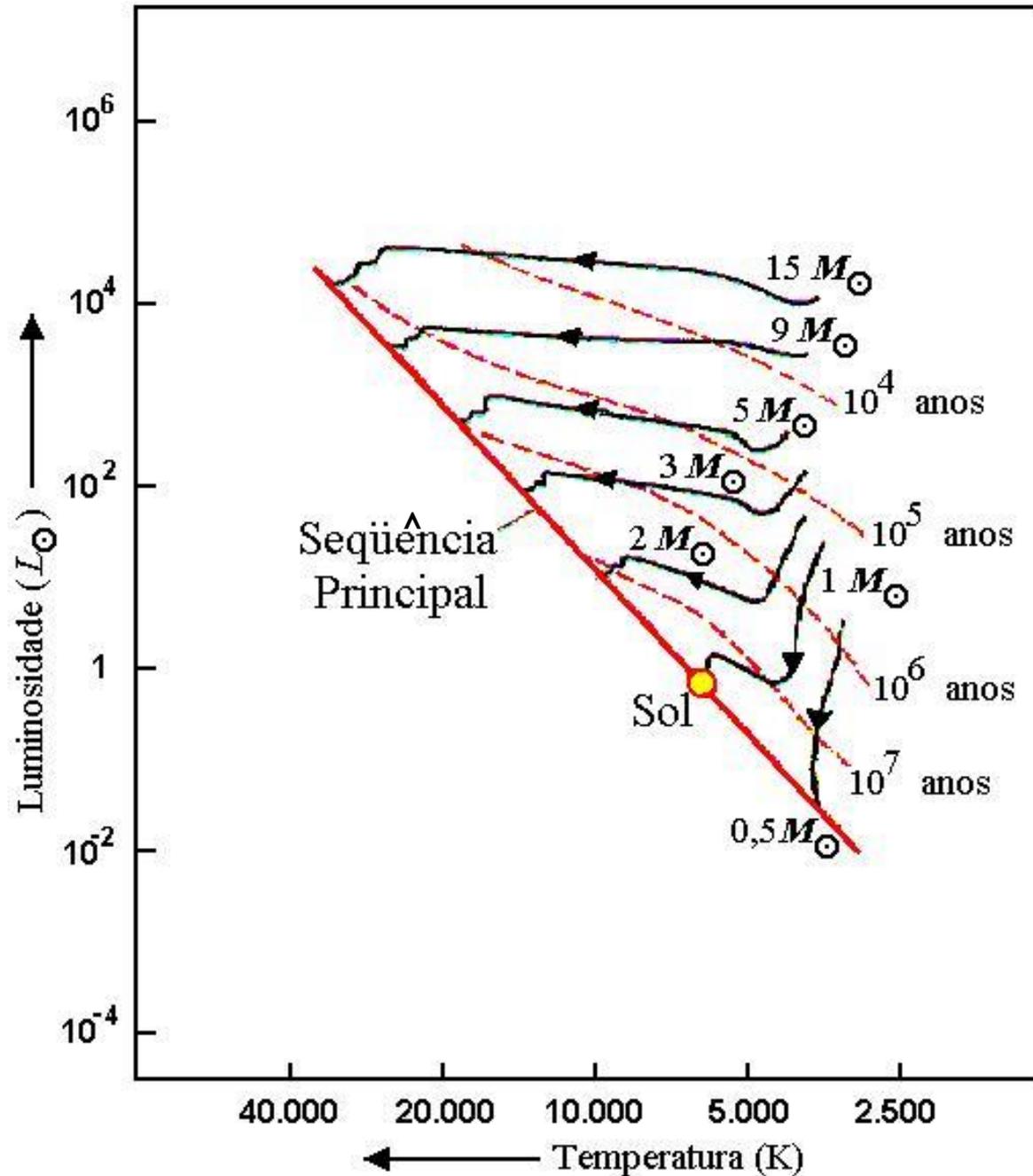
Trajectoria evolutiva depende da massa da protoestrela:

- 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[^]rias evolutivas pr[^]seq[^]ncia principal (PSP):

para estrelas de diferentes massas

a protoestrela caminha p/ esquerda ($T \uparrow$) e p/ baixo ($L \downarrow$).



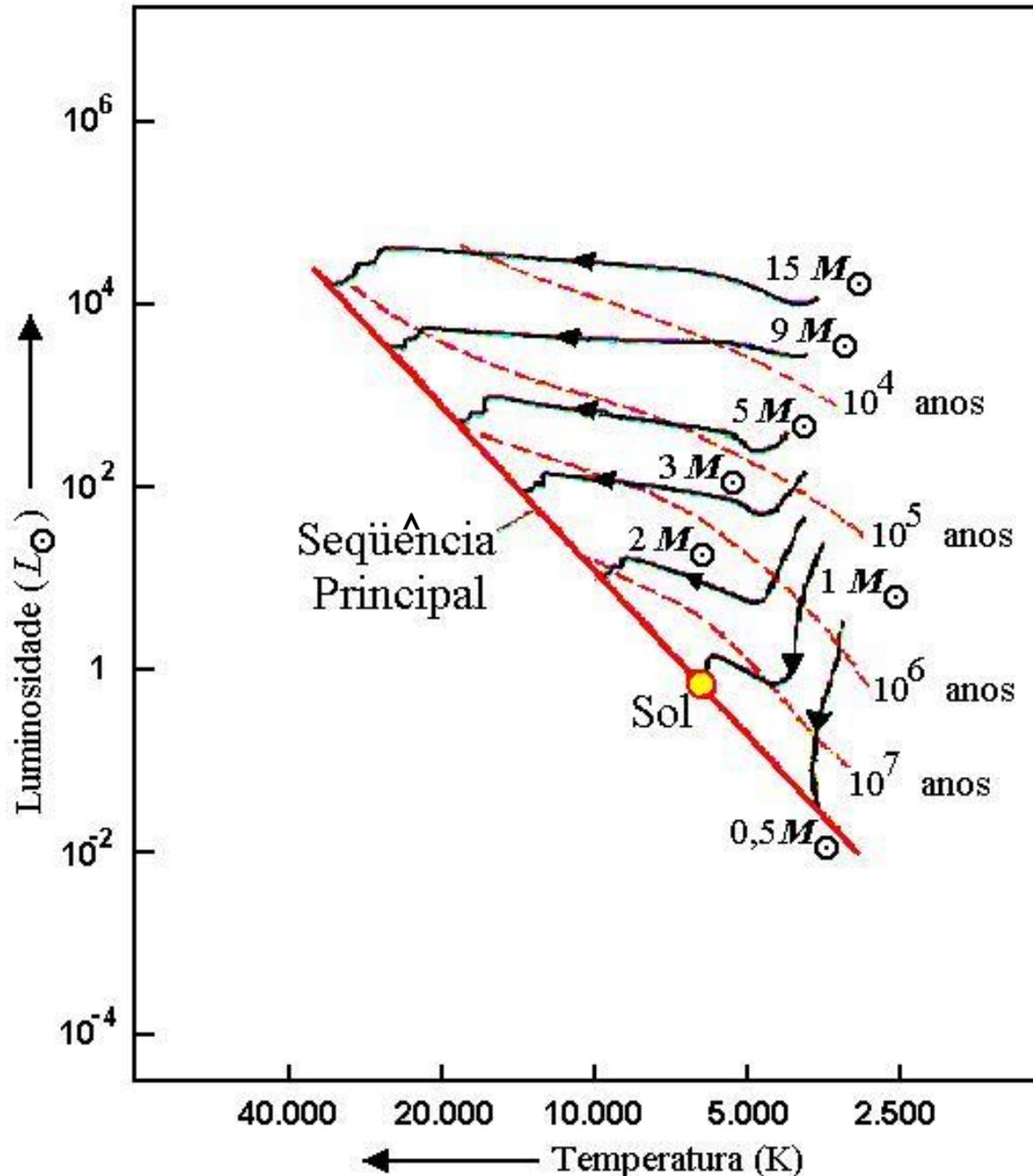
Trajatórias evolutivas pré-seqüência principal (PSP)

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

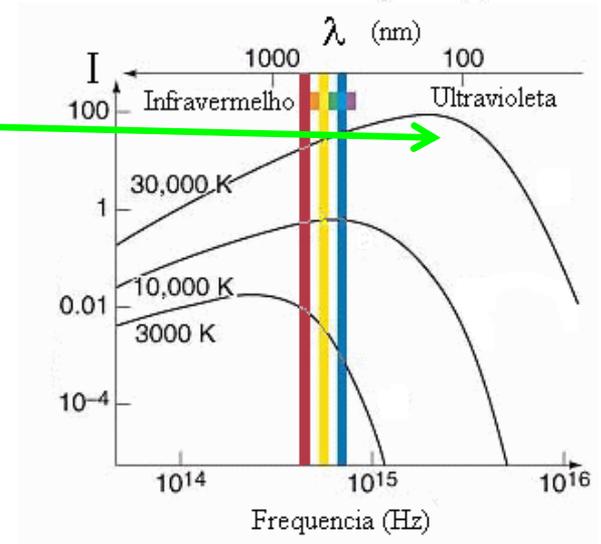
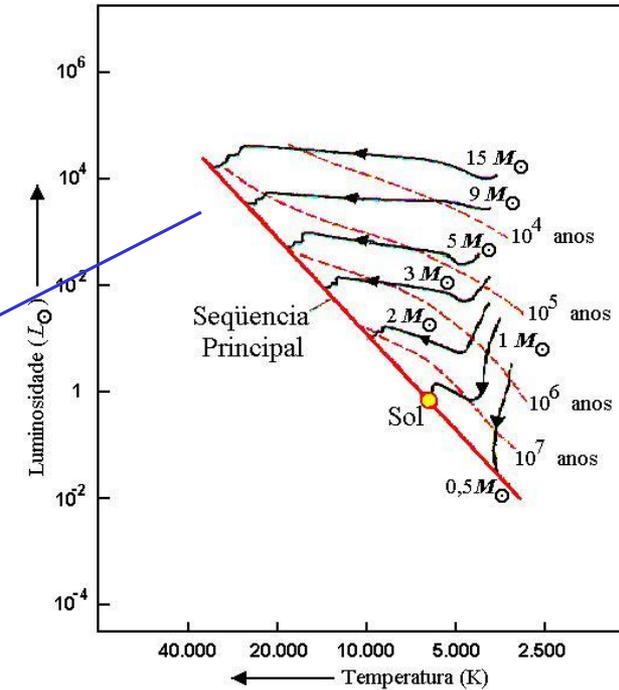
Ae/Be de Herbig

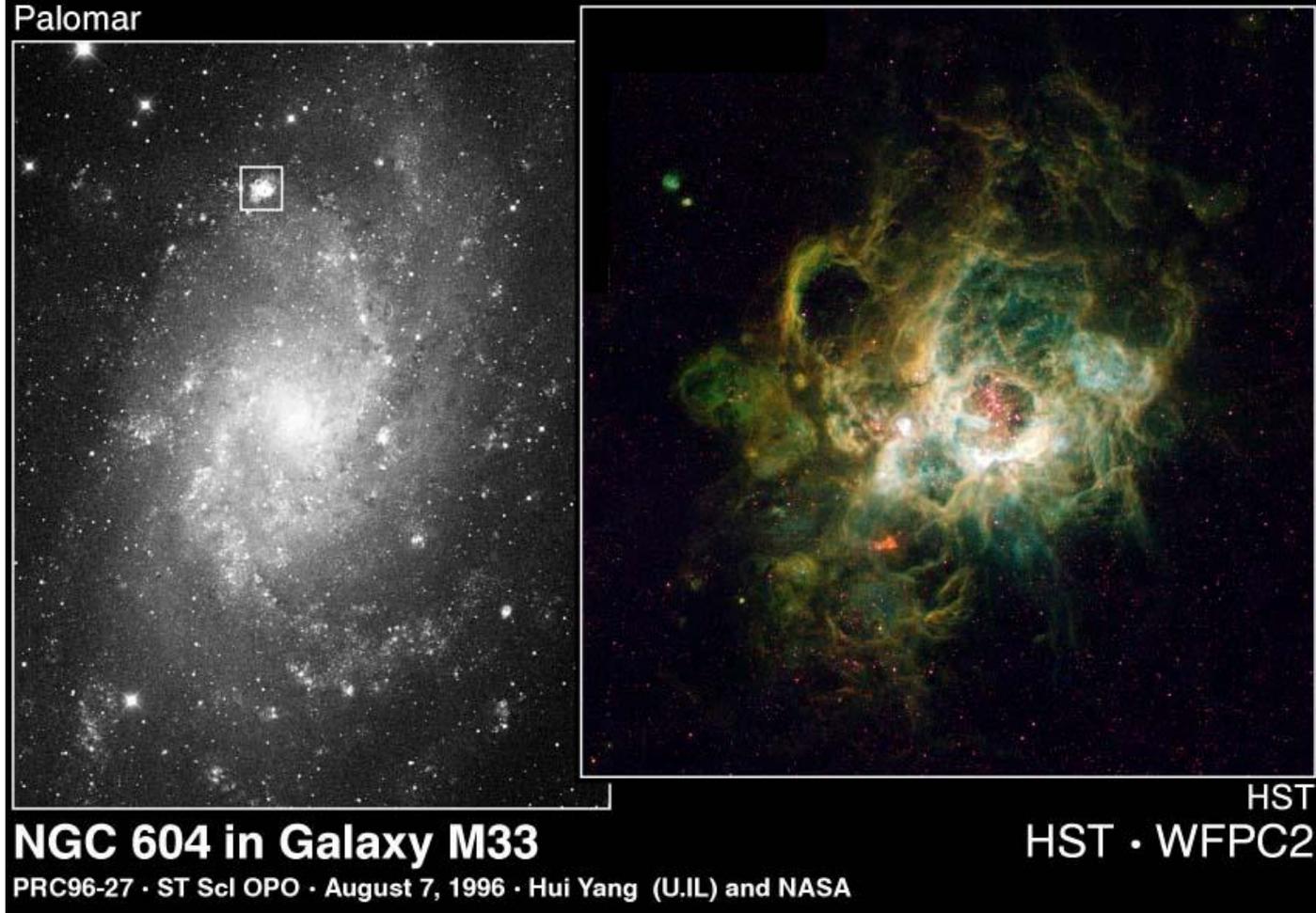
$\sim 2-8 M_{\odot}$

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.

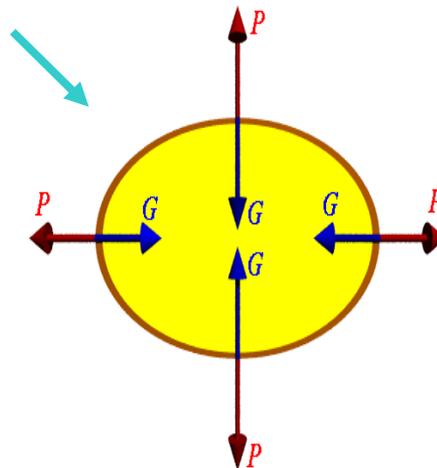
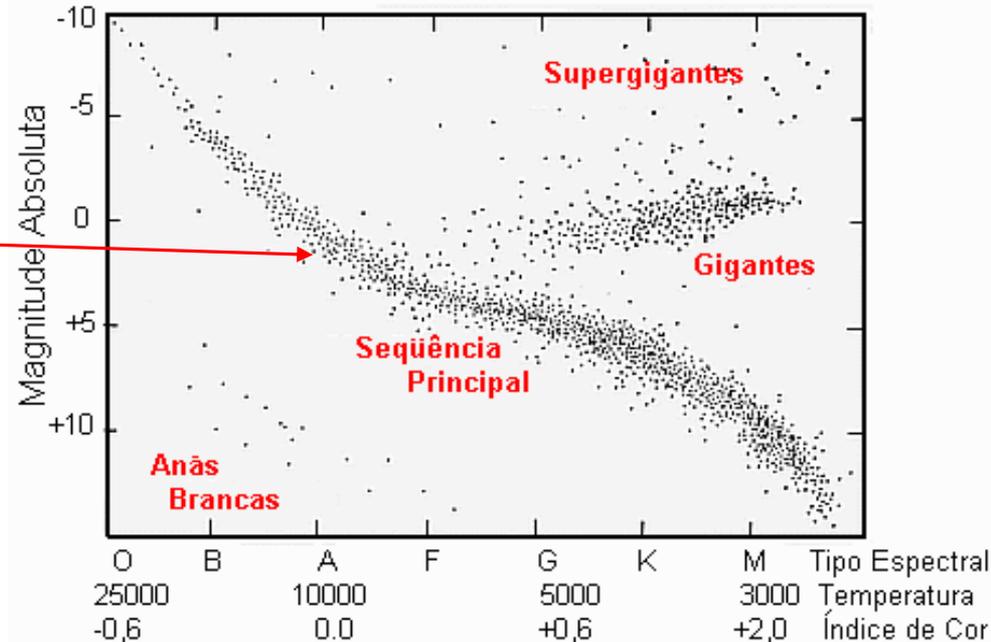
Sequencia Principal

- 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)

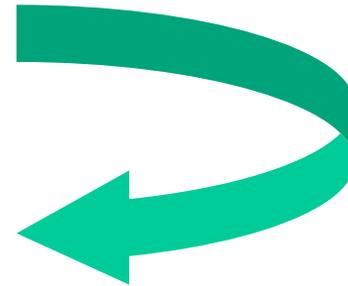
- O tempo de vida na SP depende da massa e da taxa de produção de energia da estrela dE/dt (=luminosidade).

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

- 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

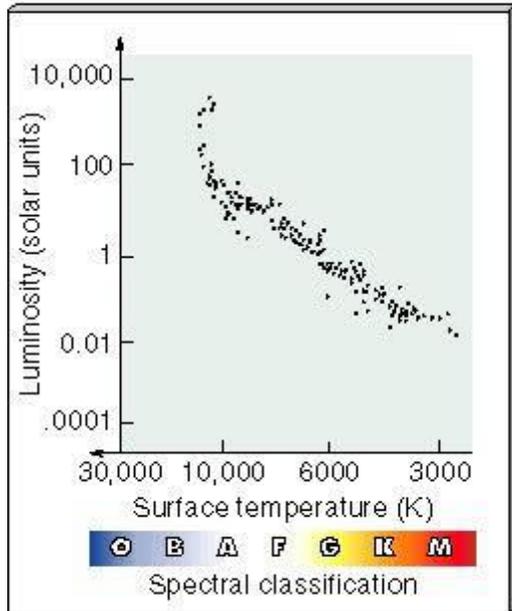
Buraco Negro

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

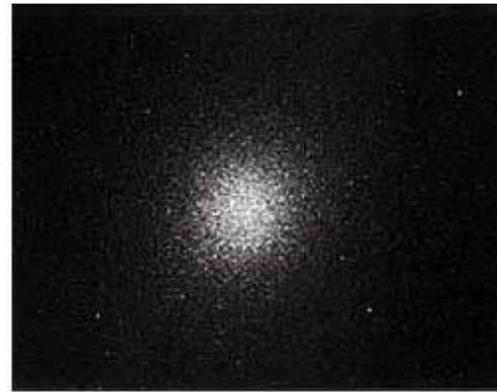


(a)

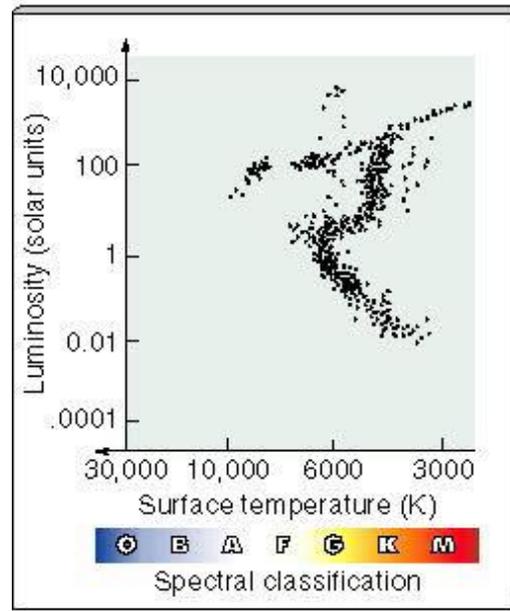


(b)

Agl. Pleiades: Jovem



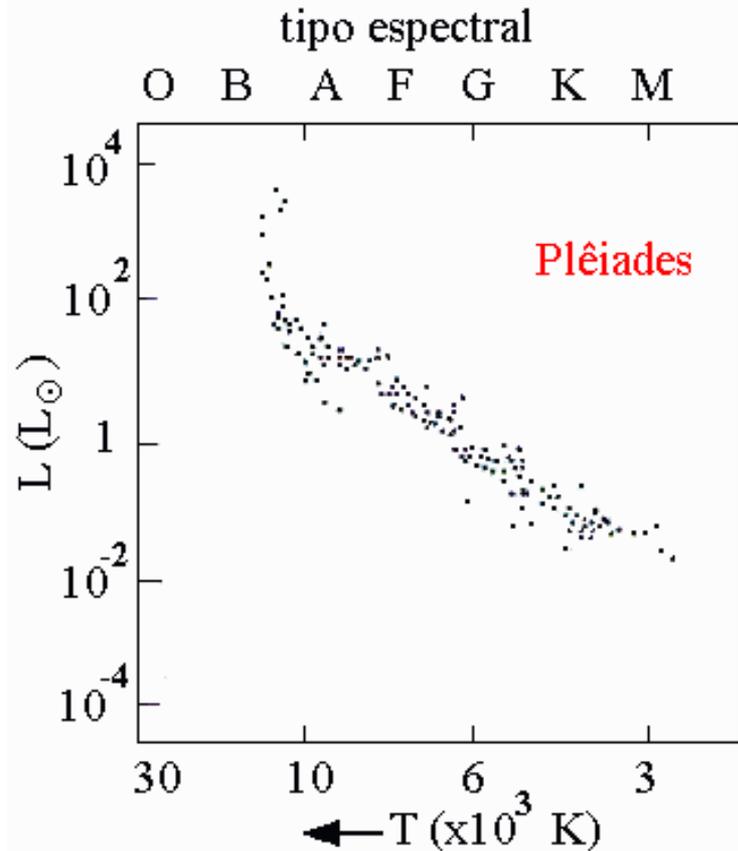
(a)



(b)

Agl. Omega Cen: Velho

Aglomerado aberto (jovem)

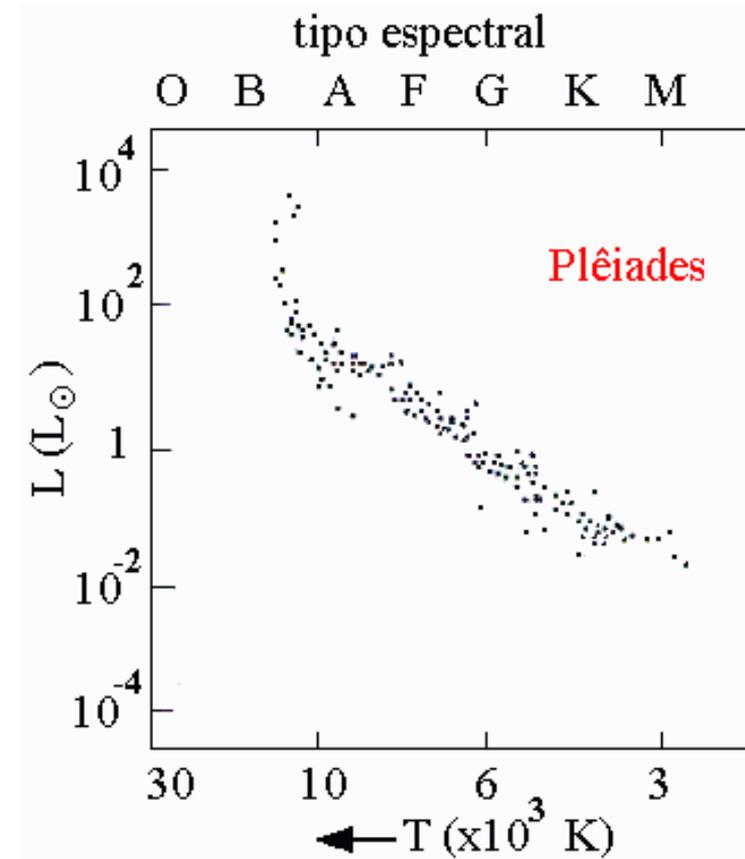


Plêiades

Aglomerado aberto (jovem)

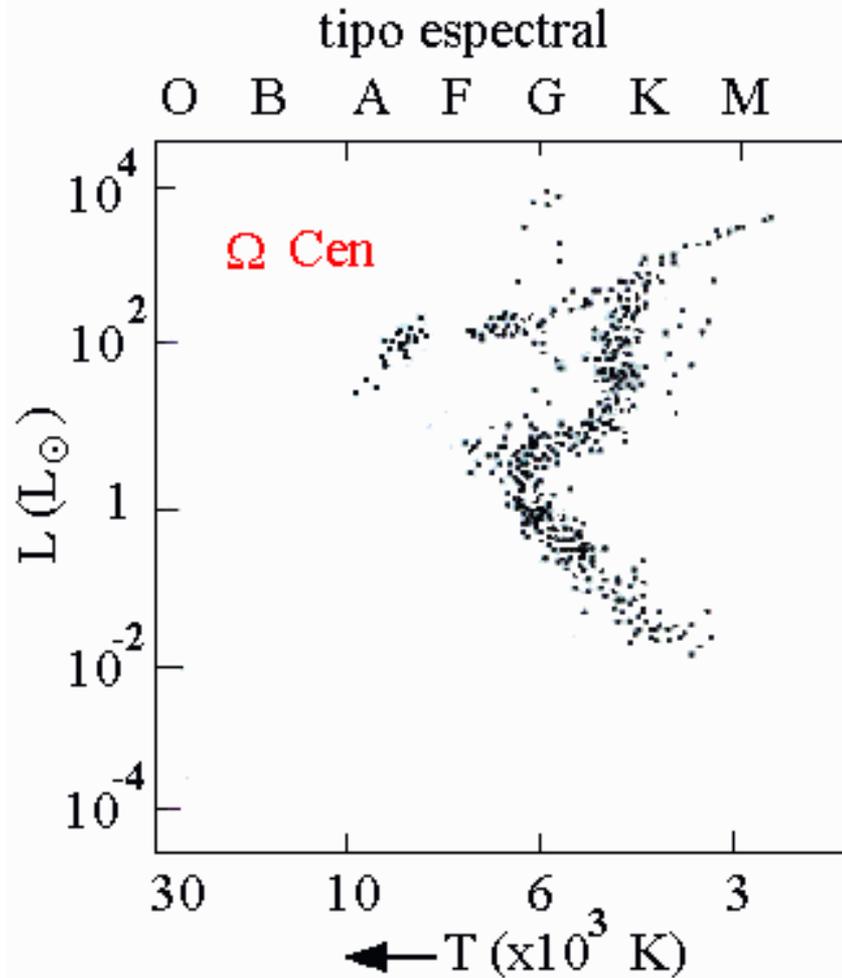
- **Estrelas em toda SP**
- **As estrelas azuis O (alto, esquerda do diagrama HR):** ainda **jovens** pois entram na SP rapidamente e vivem nesta apenas **dezenas de milhões de anos**
- Como todas as estrelas formaram-se ao mesmo tempo: estimar idade do aglomerado:

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



Plêiades

Aglomerado globular (velho)



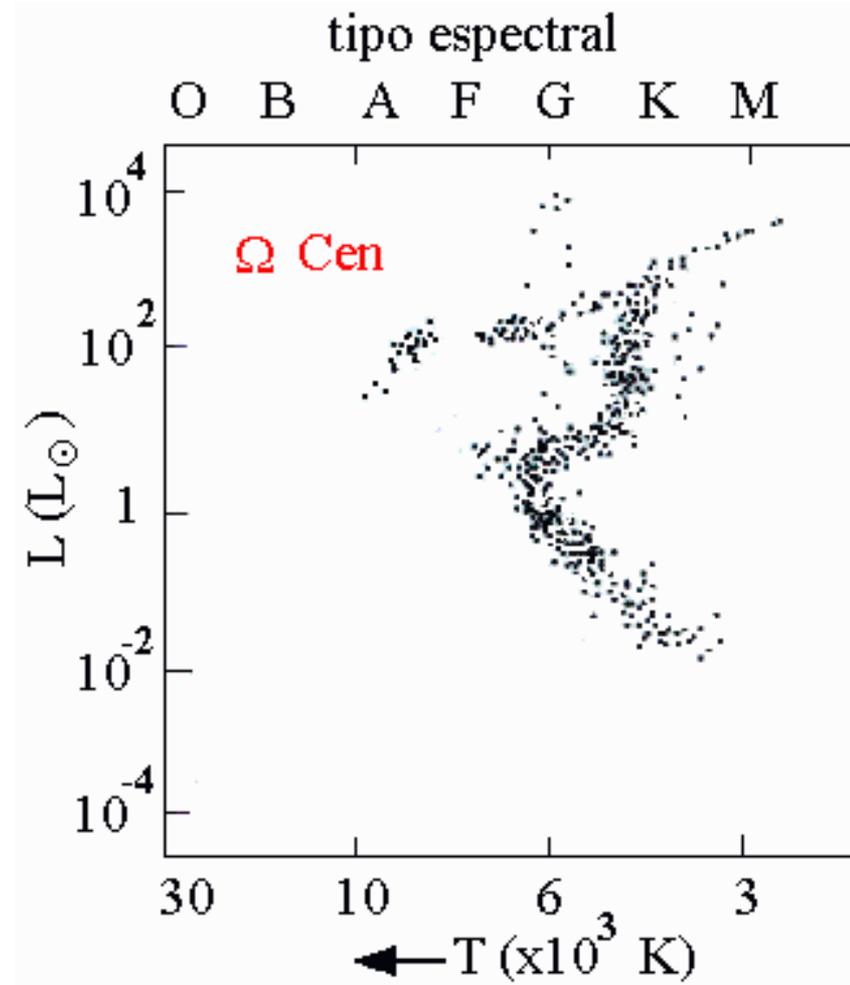
Ômega Centauro:

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

