Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

AGA0293 Astrofísica Estelar

Profa. Jane Gregorio-Hetem

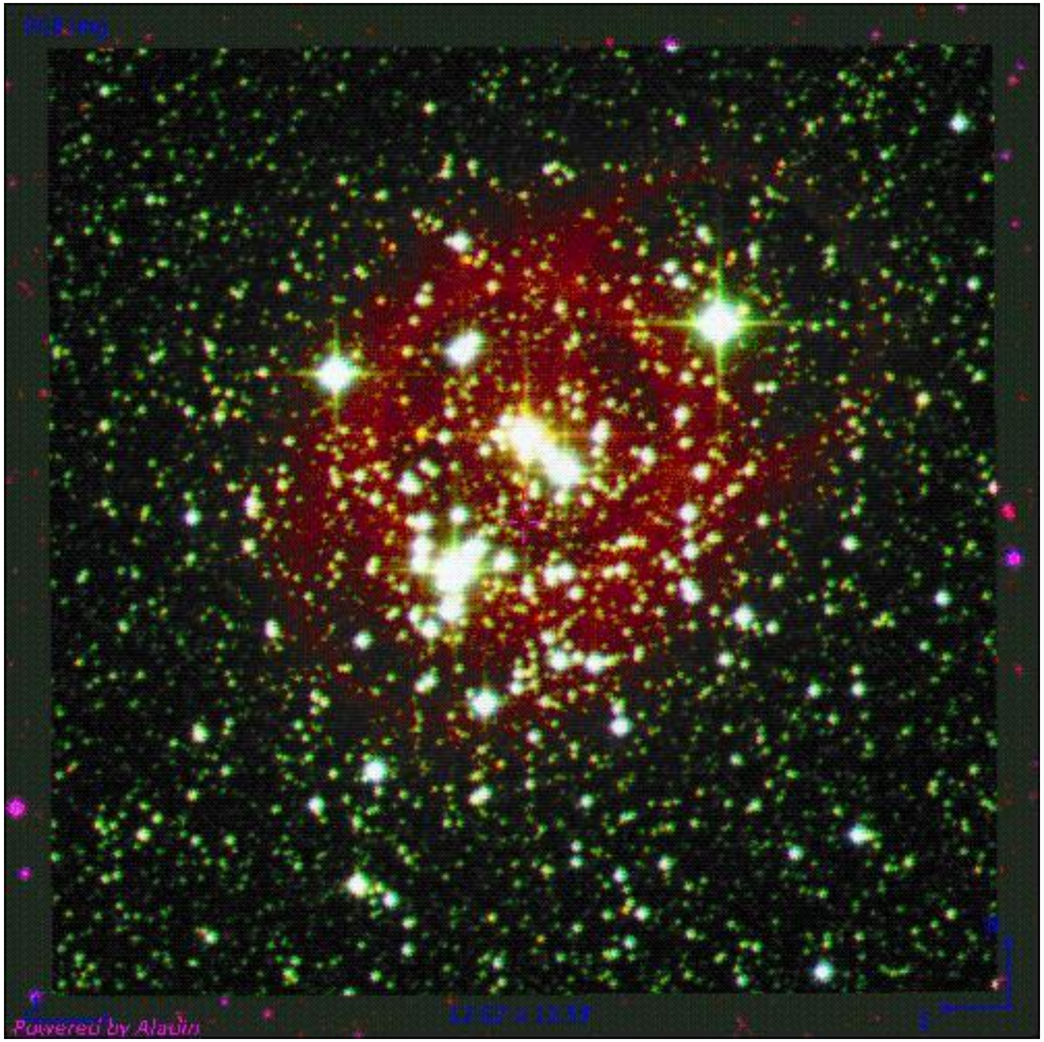
Capítulo 8
Classificação dos Espectros Estelares

8.1 Formação das linhas espectrais

8.2 O Diagrama H-R

Classificação das Estrelas

depende de Luminosidade (L) & Temperatura (T)



Procura-se correlacionar os parâmetros ⇨ comparação entre as estrelas de diferentes tipos.

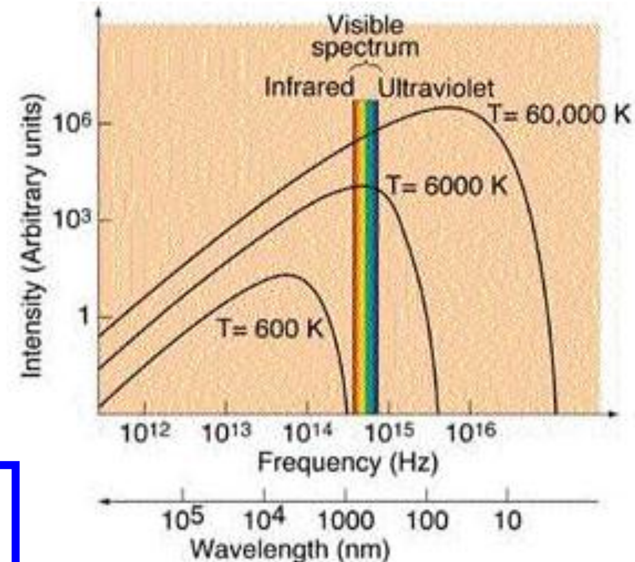
REVISÃO
CONCEITOS BÁSICOS

Brilho Aparente, Luminosidade, Raio e Temperatura da estrela

$$L_* = 4\pi R_*^2 \, \sigma T_*^4$$

$$m(d) \propto -2{,}5 \log F(d) = -2{,}5 \log\left(\frac{L_*}{4\pi d^2}\right)$$

$$M_{abs} = m(d = 10\,pc) \propto -2{,}5 \log L_* + 5$$



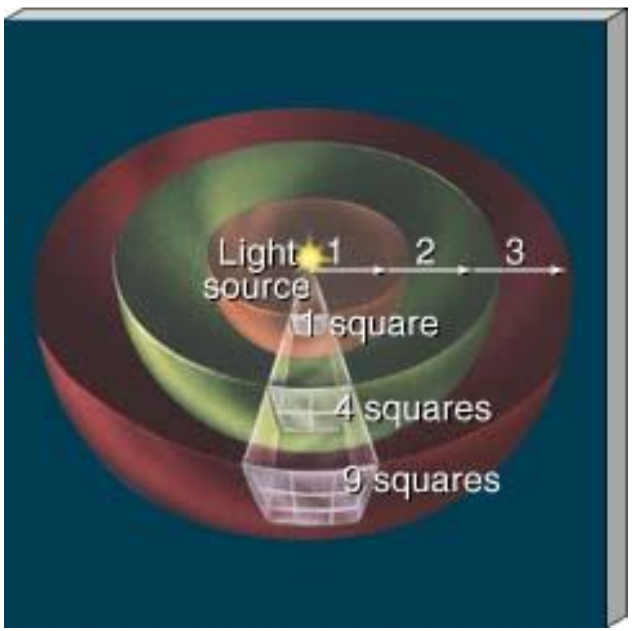
$$F(R_*) = L_* \Big/ 4\pi R_*^2$$

$$F(R_*) = \sigma T_*^4$$

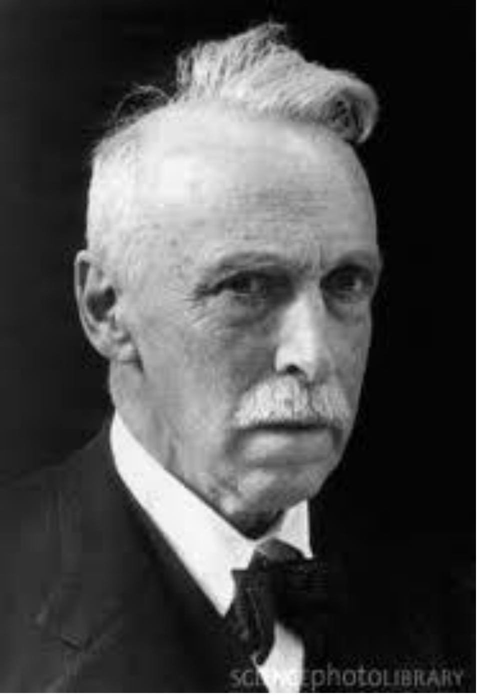
Stefan-Boltzman

Wien

$$\lambda_{\max}(cm) = \frac{0{,}29}{T(K)}$$



$$F(d) = L_* \Big/ 4\pi d^2$$



Ejnar Hertzsprung
(1873 – 1967)

O Diagrama H-R

Em 1905, Hertzsprung descobriu que a largura das linhas espectrais correlacionam-se com o brilho intrínseco das estrelas ⇨ estudo de amostra de estrelas com temperaturas semelhantes.

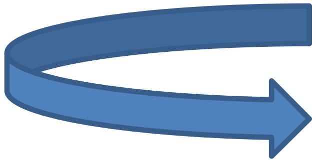
L x T_{ef} (cte)

- Estrelas com linhas mais estreitas ⇨mais brilhantes
- Estrelas com linhas alargadas ⇨ menor brilho.

↳ Deduz-se que as diferenças nas linhas espectrais devam ser causadas pelas diferenças nos raios estelares.

Diagrama H-R

- Russel, utilizando outros dados chegou a interpretação semelhante: magnitude absoluta é bem correlacionada com o tipo espectral.



M x T.S.

Henry Russell
(1877 - 1957)

- Comparou esses parâmetros para as Plêiades e as Híades (aglomerados estelares jovens).

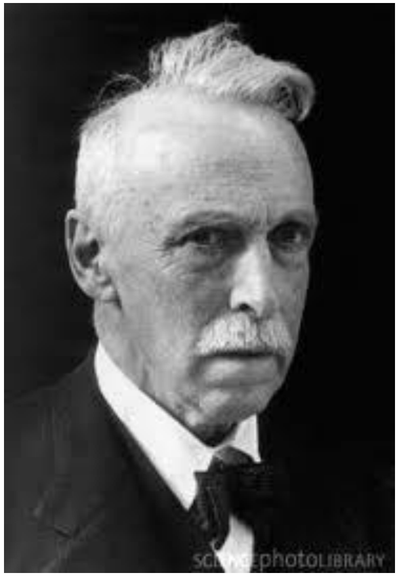


Diagrama H-R

Diagrama Hertzsprung-Russel (H-R)

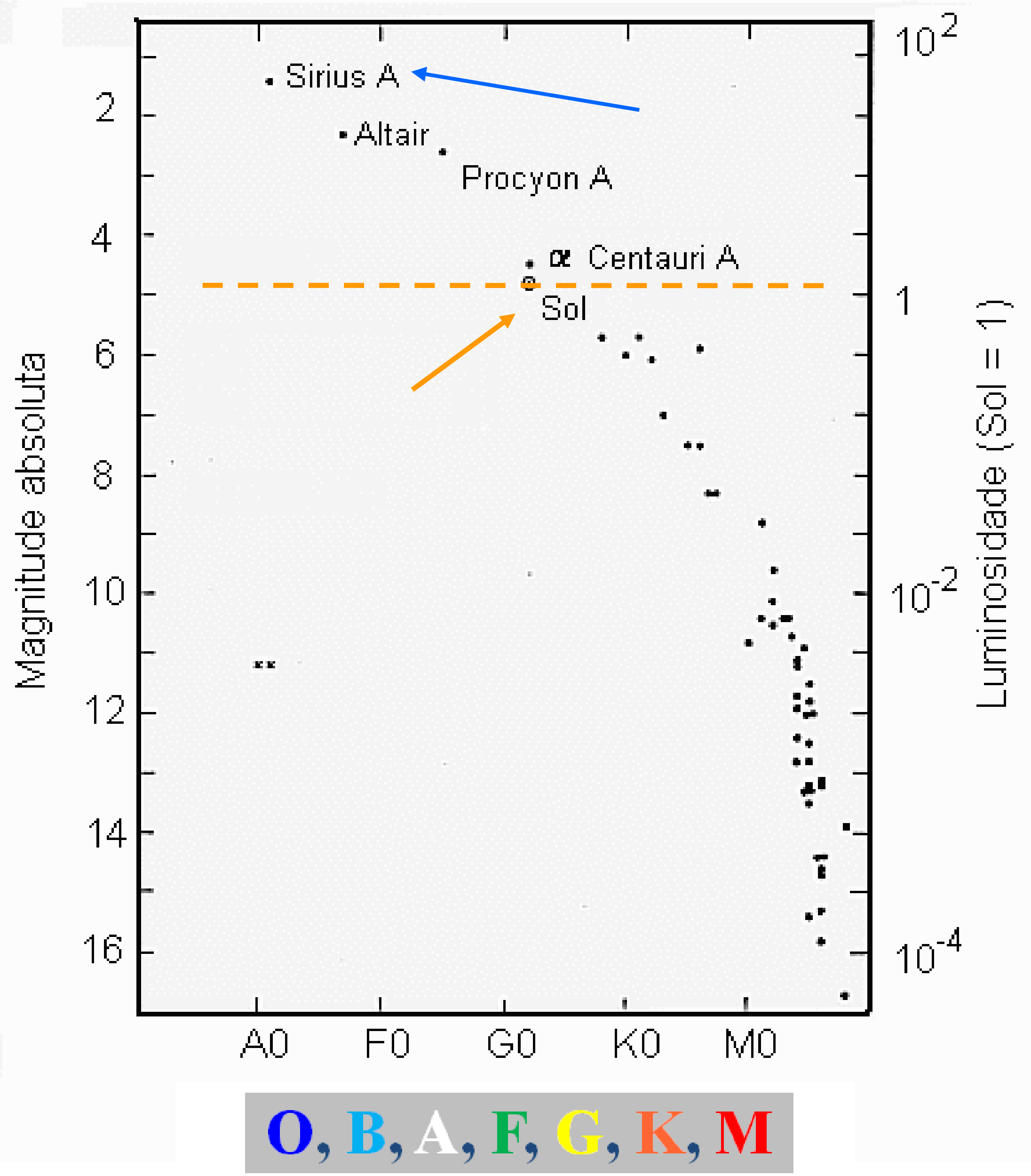
↓

por convenção ⇨ luminosidade no eixo vertical e a sequência de tipos espectrais no eixo horizontal.

Diagrama H-R
estrelas próximas do Sol (**d< 5pc**).

Algumas são menos brilhantes e mais frias que o Sol.

Outras são mais quentes e luminosas (por ex.: Sirius A).



primeiros tipos (*early type*) ★ quentes

últimos tipos (*late type*) ★ frias

Diagrama H-R estrelas próximas do Sol

- Região definida pela posição dessas estrelas é conhecida como sequência principal, a **fase evolutiva** na qual se encontra a maioria das estrelas.

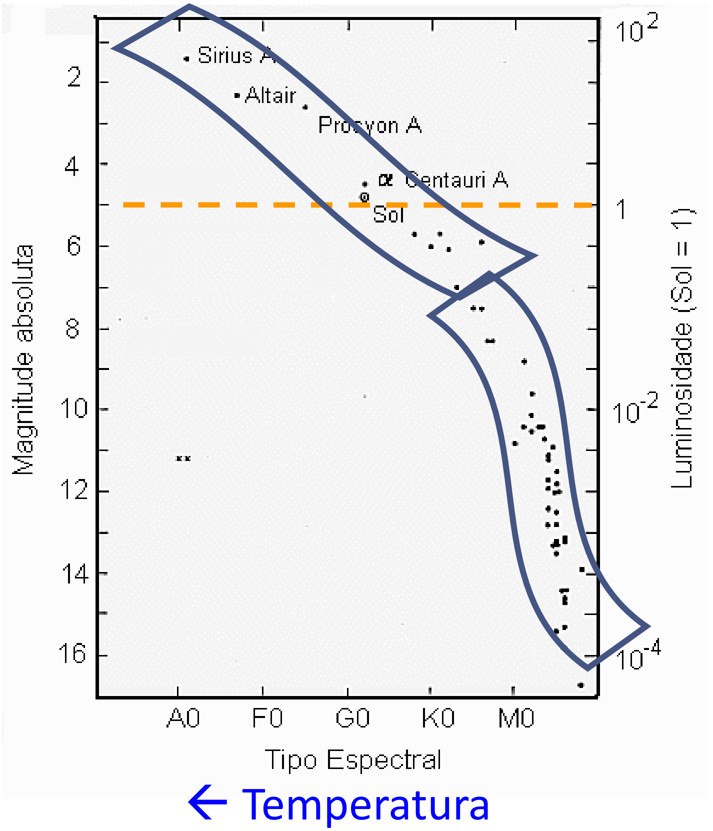
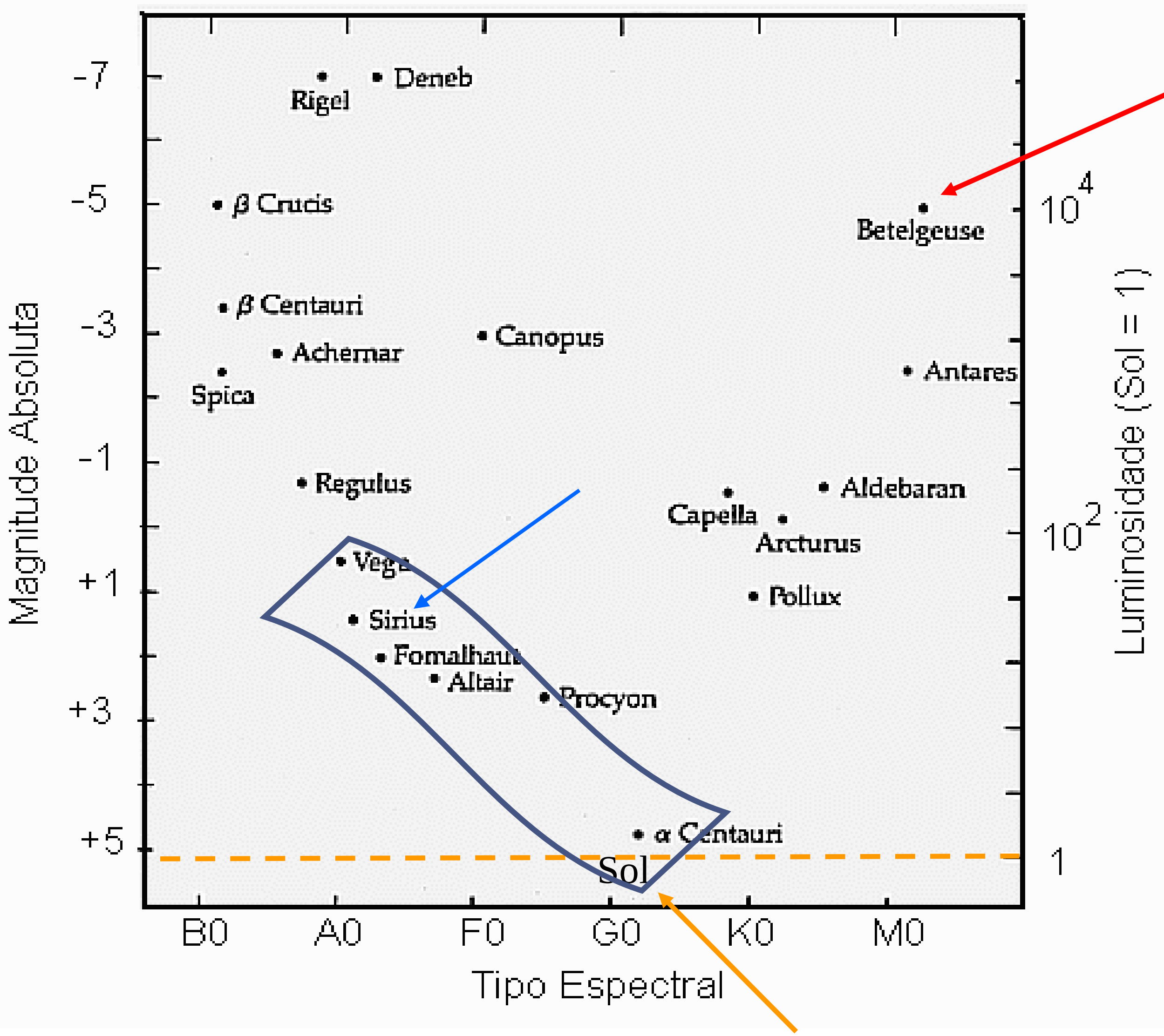
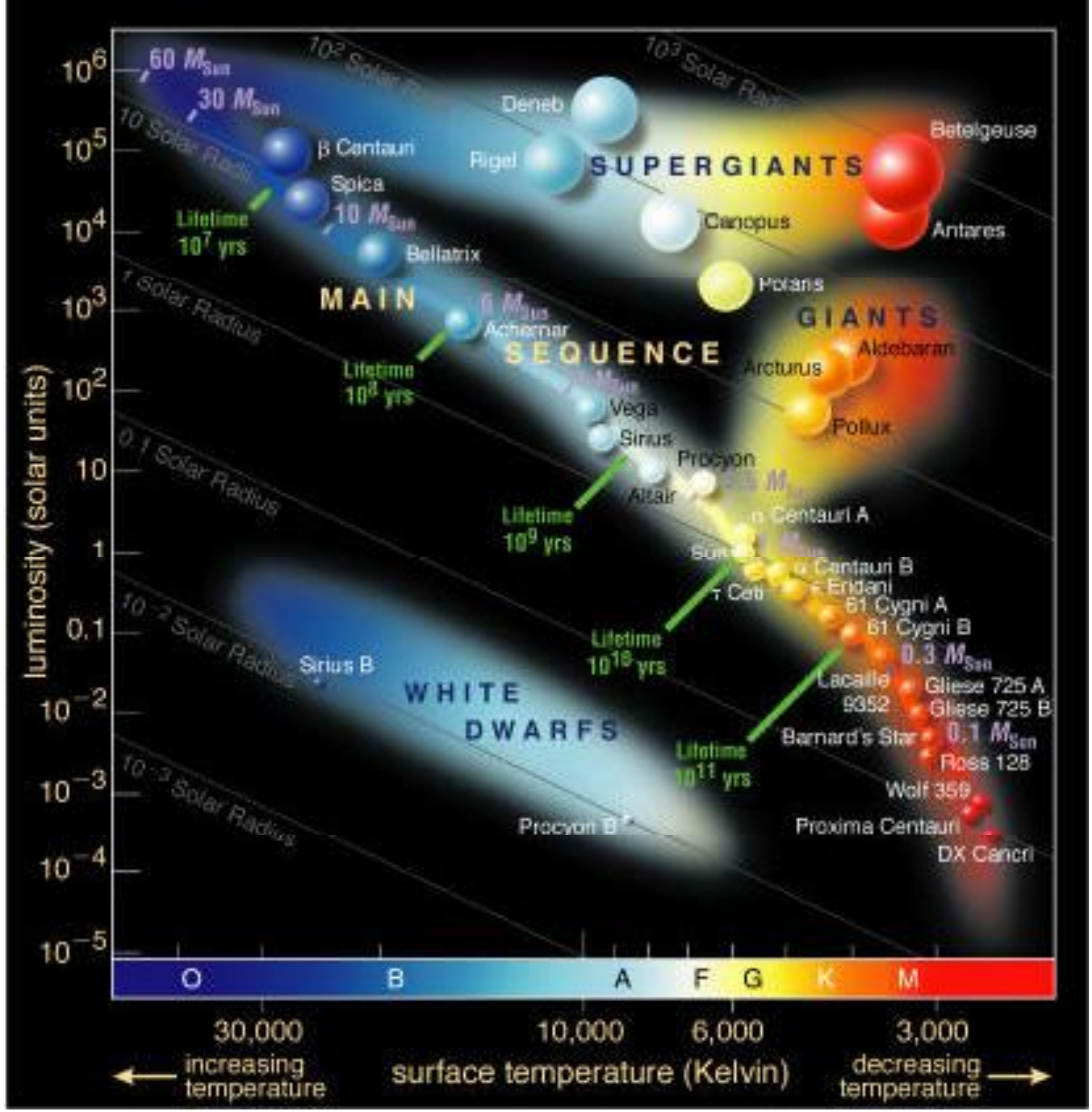


Diagrama H-R das estrelas mais brilhantes



Betelgeuse, por ex., muito mais fria e muito mais luminosa que o Sol, aparece na parte direita superior.

Diagrama H-R ilustrando diferentes temperaturas; raios; massa e tempo de vida das estrelas



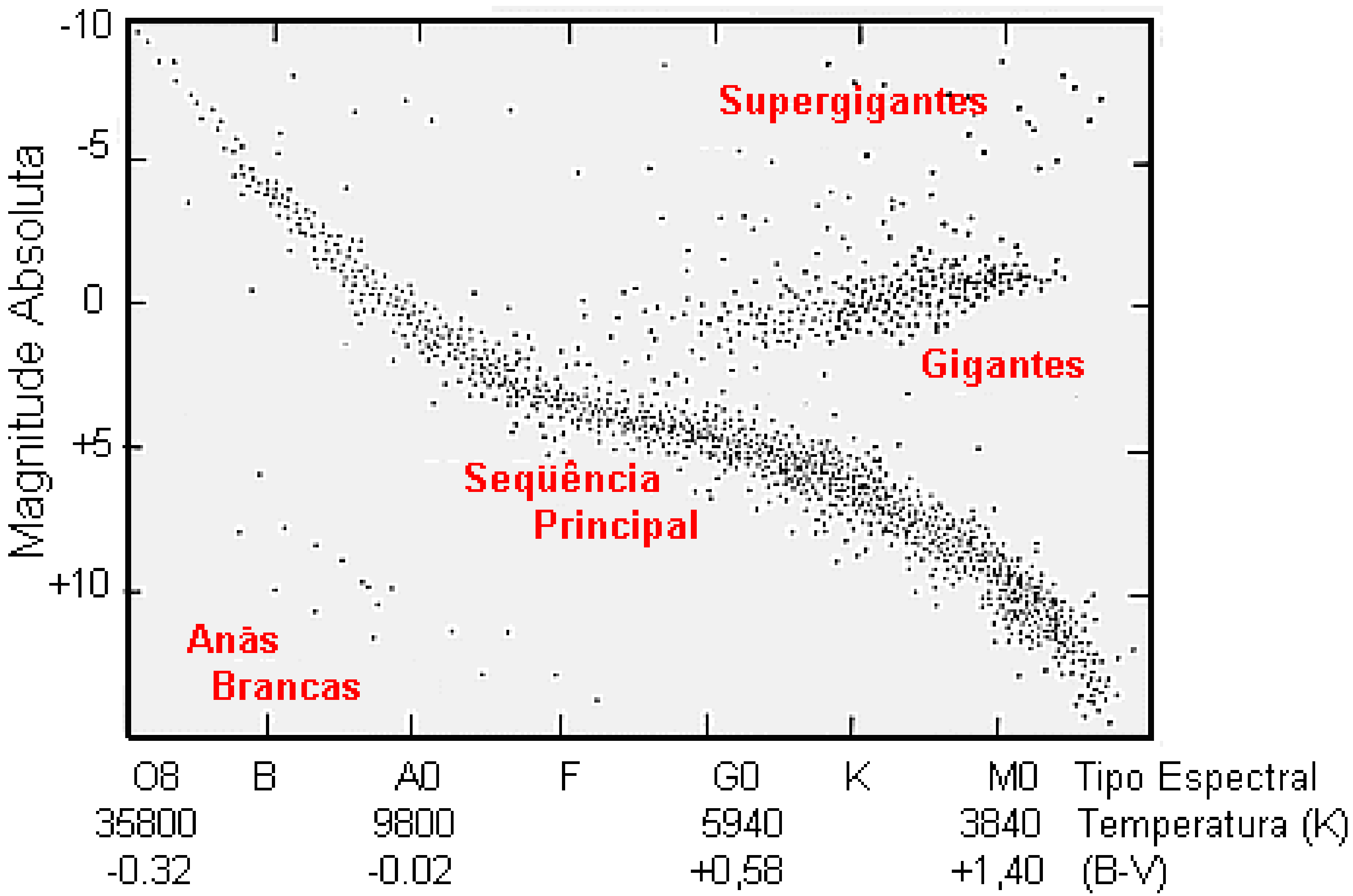
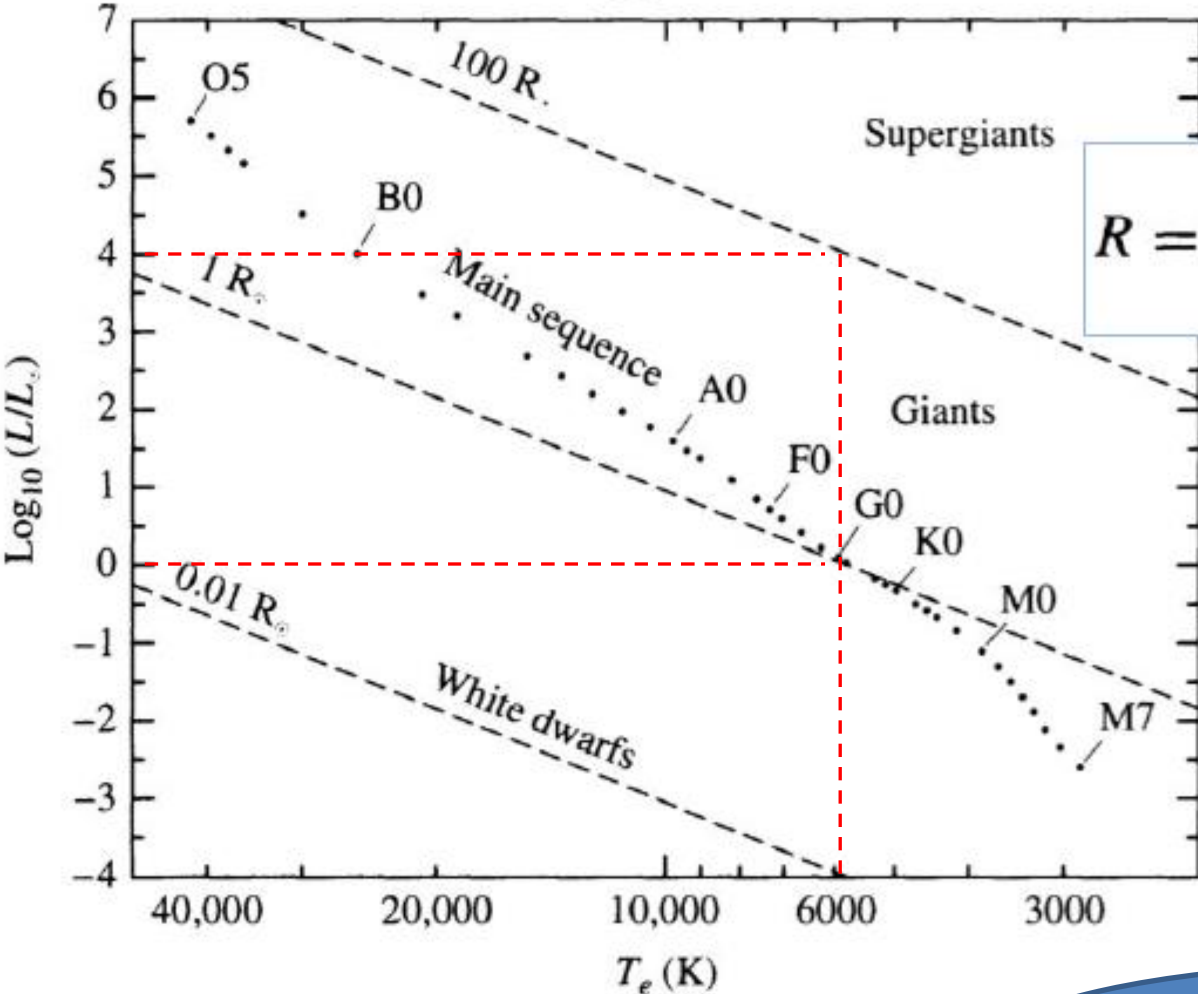


Diagrama H-R para uma grande amostra de estrelas. No eixo horizontal, além do tipo espectral, são apresentados temperaturas e índices de cor, adotados de Schmidt-Kaler e de de Jager & Nieuwenhuijzen (1987) para a classe V.

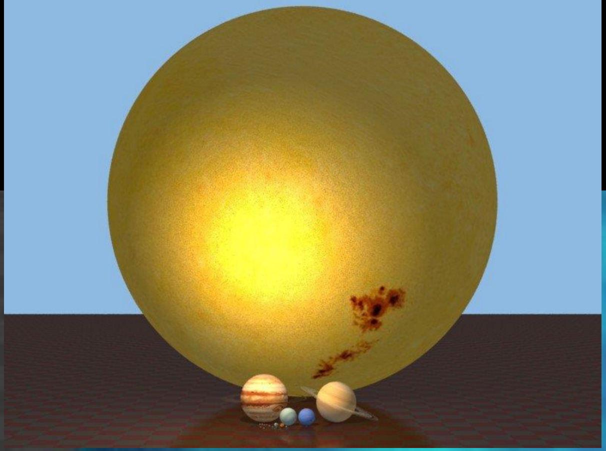
The H-R diagram: theoretical

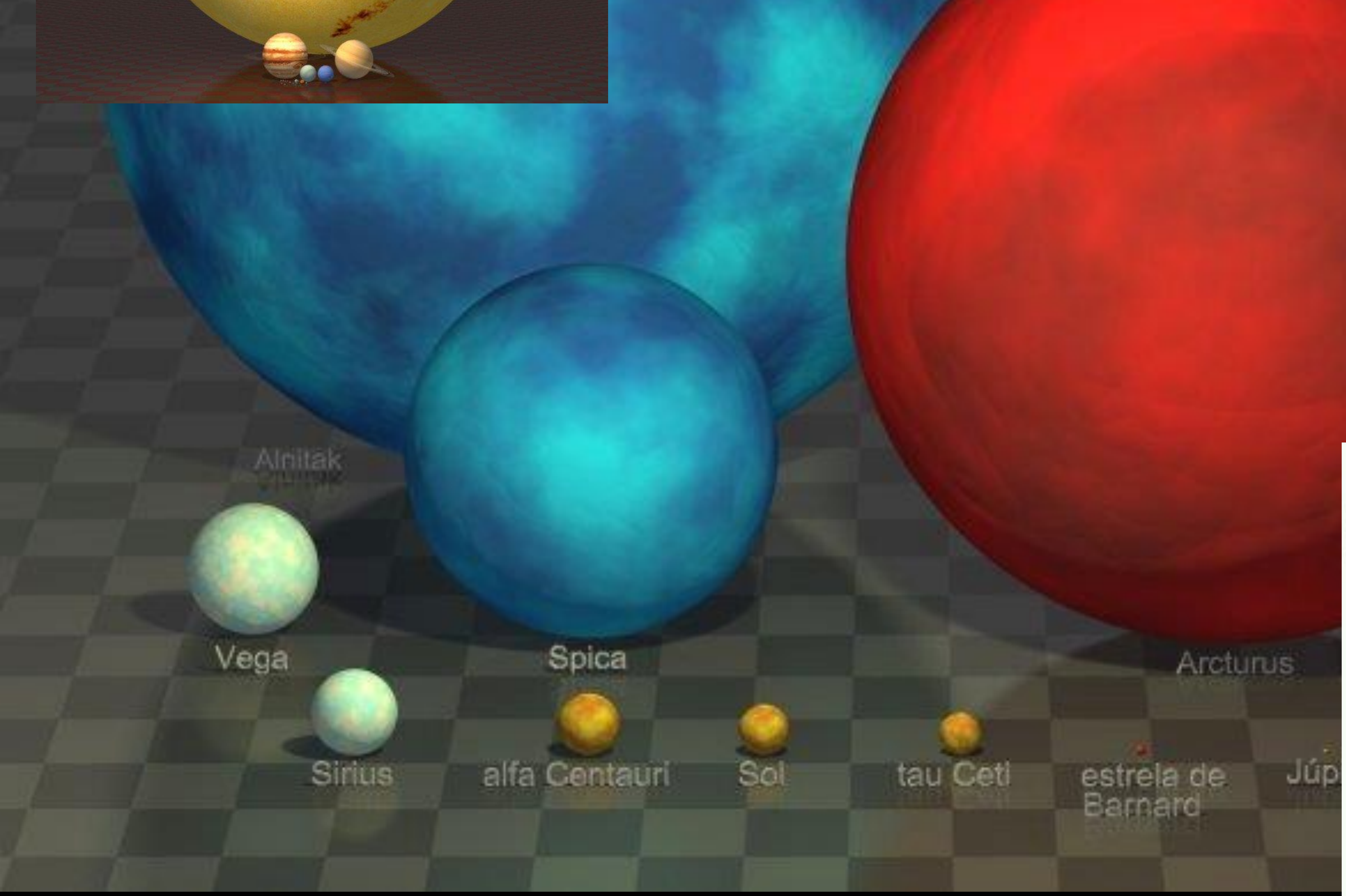


$$R = \frac{1}{T_e^2}\sqrt{\frac{L}{4\pi\sigma}}$$

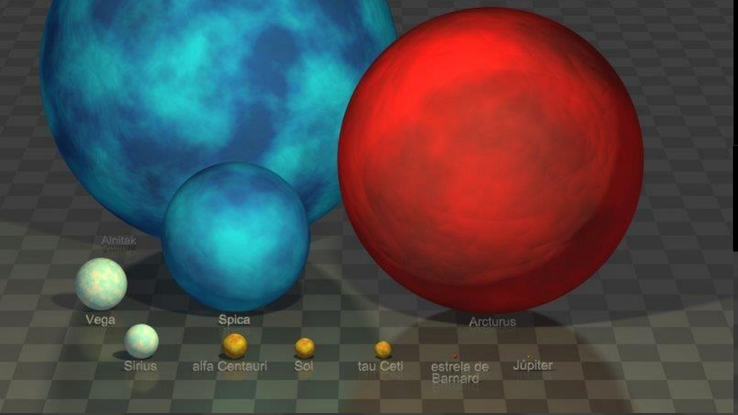
Baseado nas propriedades médias das estrelas da Sequência Principal

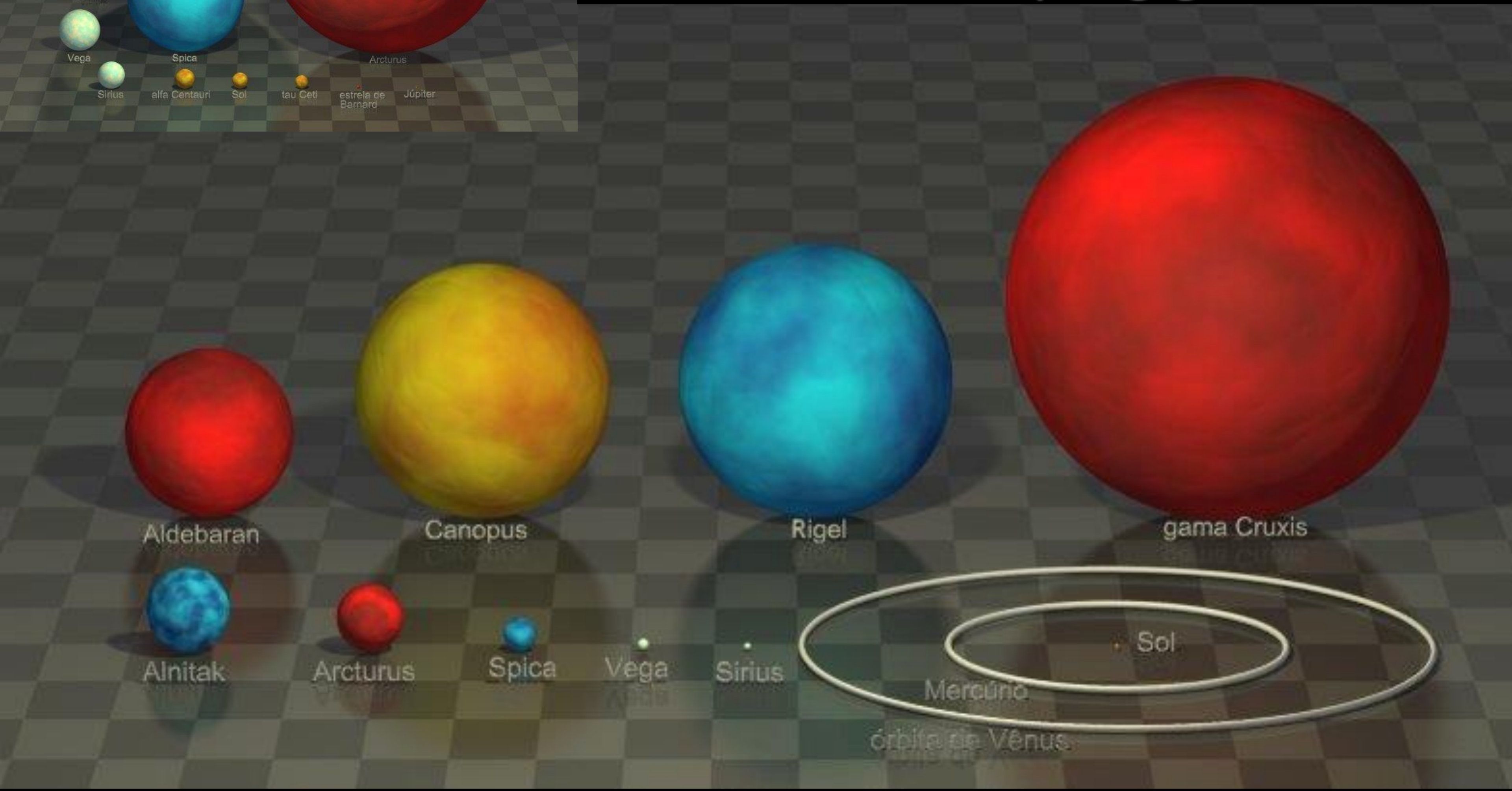
Estrelas anãs e gigantes





Estrelas supergigantes





CLASSIFICAÇÃO

Example 8.2.1. The Sun, a G2 main-sequence star, has a mass of $M_\odot = 1.9891 \times 10^{30}$ kg and a radius of $R_\odot = 6.95508 \times 10^8$ m. Its average density is thus

$$\overline{\rho}_\odot = \frac{M_\odot}{\frac{4}{3}\pi R_\odot^3} = 1410 \text{ kg m}^{-3}.$$

Sirius, the brightest-appearing star in the sky, is classified as an A1 main sequence star with a mass of 2.2 $M_\odot$ and a radius of 1.6 $R_\odot$. The average density of Sirius is

$$\overline{\rho} = \frac{2.2\ M_\odot}{\frac{4}{3}\pi (1.6\ R_\odot)^3} = 760 \text{ kg m}^{-3} = 0.54\,\overline{\rho}_\odot,$$

which is about 76 percent of the density of water. However, this is enormously dense compared to a giant or supergiant star. The mass of Betelgeuse is estimated to lie between 10 and 15 $M_\odot$; we will adopt 10 $M_\odot$ here. For illustration, if we take the maximum radius of this pulsating star to be about 1000 $R_\odot$, then the average density of Betelgeuse (at maximum size) is roughly

$$\overline{\rho} = \frac{10\ M_\odot}{\frac{4}{3}\pi (1000\ R_\odot)^3} = 10^{-8}\,\overline{\rho}_\odot!$$

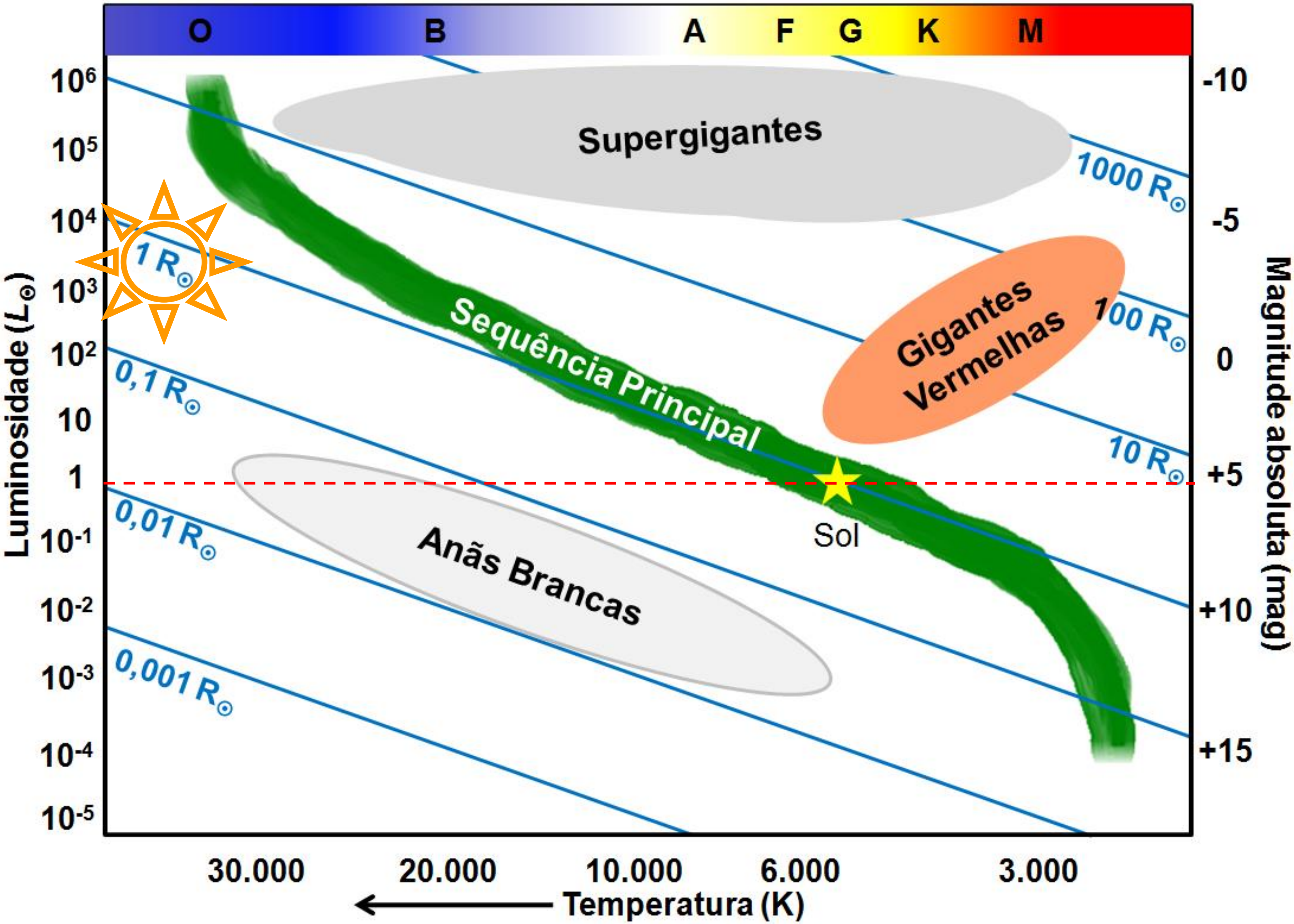
Classes de luminosidade

As estrelas podem ser separadas no Diagrama H-R de acordo com sua categoria.

Exemplos:

- Sol é considerado uma estrela anã da Sequência Principal.
- Betelgeuse é uma super-gigante.
- Anãs Brancas são estrelas muito quentes, mas muito menores que o Sol.

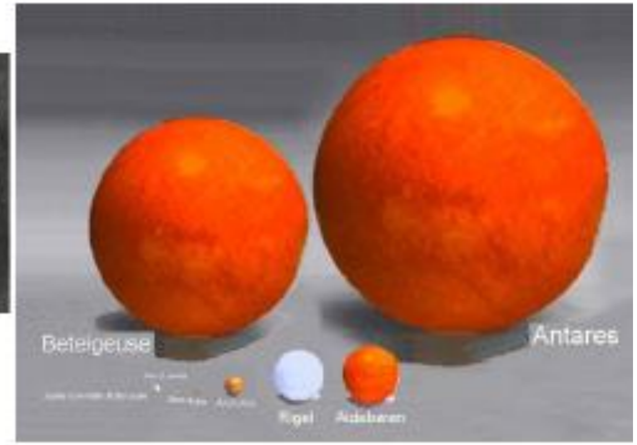
A distribuição de um grande número de estrelas no Diagrama H-R define claramente as regiões onde se encontram diferentes categorias de estrelas.

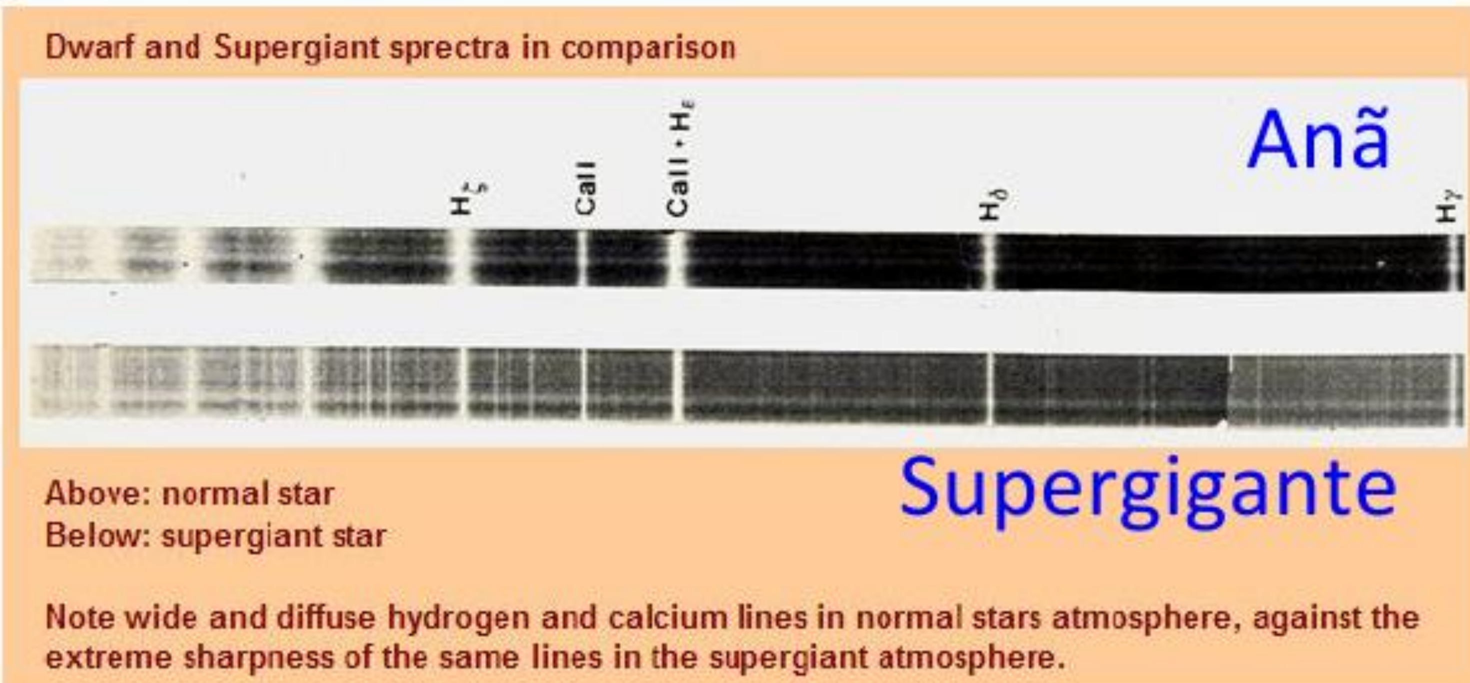

O
B
A
F
G
K
M
10⁶
10⁵
10⁴
10³
10²
10
1
10⁻¹
10⁻²
10⁻³
10⁻⁴
10⁻⁵
Luminosidade ($L_\odot$)
-10
-5
0
+5
+10
+15
Magnitude absoluta (mag)
Supergigantes
1000 $R_\odot$
100 $R_\odot$
10 $R_\odot$
1 $R_\odot$
0,1 $R_\odot$
0,01 $R_\odot$
0,001 $R_\odot$
Gigantes Vermelhas
Sequência Principal
Sol
Anãs Brancas
30.000
20.000
10.000
6.000
3.000
Temperatura (K)

Classe de luminosidade

Antonia Maury : foi contratada em 1888 por E. Pickering (Harvard) para classificar espectros. Ela propôs um novo sistema de classificação levando em conta tb a forma das linhas, mas foi ignorado por Pickering.

Antonia Caetana de Paiva Pereira Maury





Créditos: Prof. Jorge Meléndez

Raio x Densidade

- Como diferenciar tamanhos de estrelas que tenham mesmo tipo espectral?
- As características das linhas espectrais, que são formadas sob diferentes condições físicas, indicam: densidades nas atmosferas estelares

$$\rho_{\text{gigantes}} << \rho_{\text{anãs}} << \rho_{\text{anãs brancas}}$$

Astron. Astrophys. 333, 231–250 (1998)

ASTRONOMY
AND
ASTROPHYSICS

Model atmospheres broad-band colors, bolometric corrections and temperature calibrations for O - M stars*

M.S. Bessell[1], F. Castelli[2], and B. Plez[3,4]

[1] Mount Stromlo and Siding Spring Observatories, Instit
Weston Creek P.O., ACT 2611, Australia
[2] CNR-Gruppo Nazionale Astronomia and Osservatorio
[3] Astronomiska Observatoriet, Box 515, S-75120 Uppsa
[4] Atomspektroskopi, Fysiska Institution, Box 118, S-221

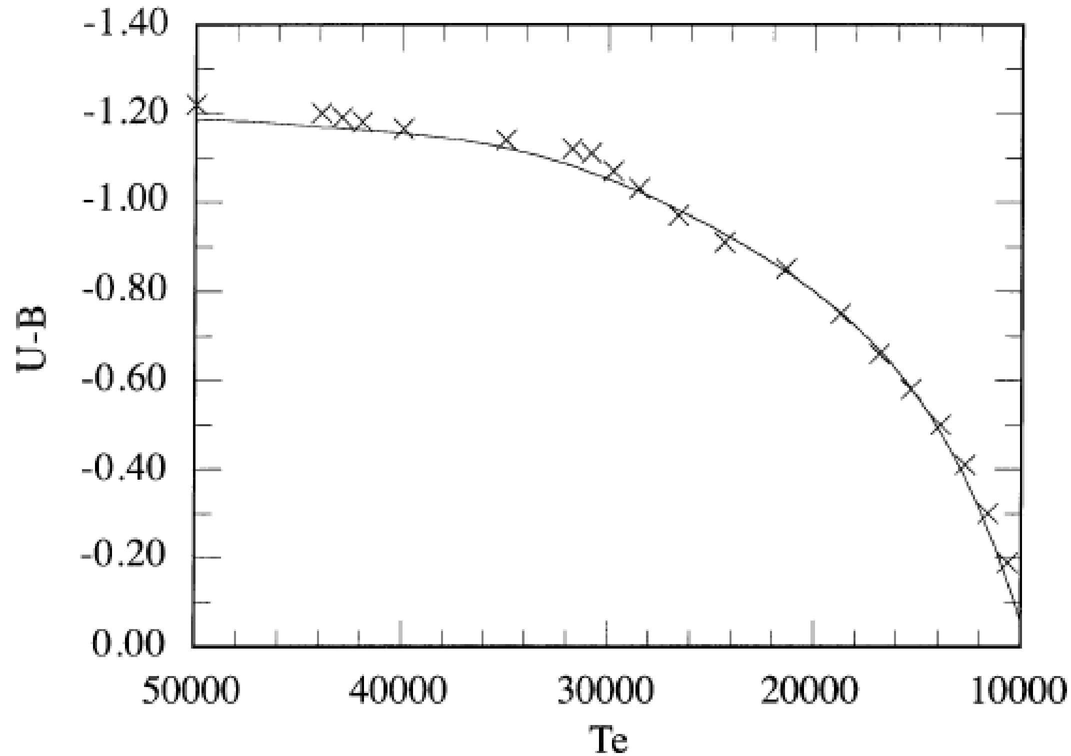


Fig. 4. The T_{eff} versus U-B diagram from the model atmospheres (full line) compared with the empirical relation from Crowther (1997) (crosses)

Variação da gravidade

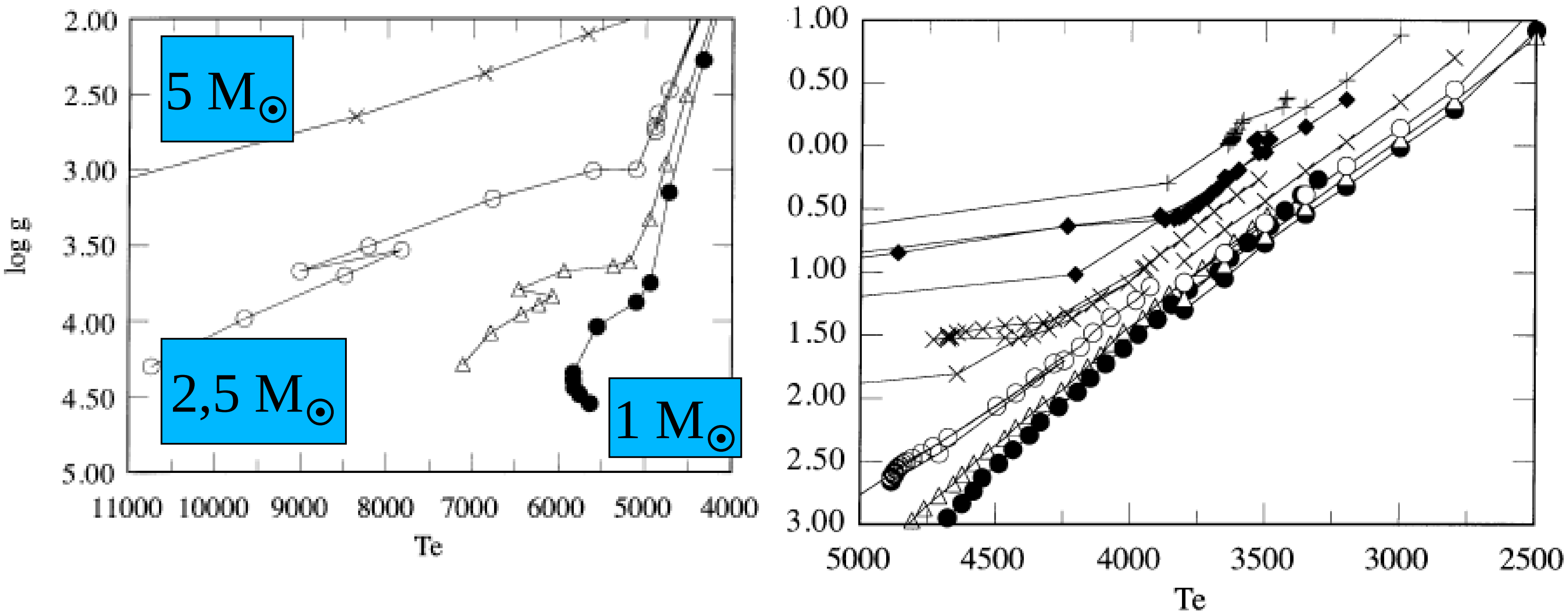


Fig. 3. a Theoretical evolutionary tracks near the main sequence for 1 (filled circles), 1.5 (triangles), 2.5 (open circles), 5 (crosses) $M_\odot$ models with Z = 0.02 from Schaller et al (1992). **b** Theoretical giant branch tracks for 1 (filled circles), 1.5 (open triangles), 2.5 (open circles), 5 (crosses), 9 (filled diamonds) and 15 (pluses) $M_\odot$ models with Z = 0.02 from Schaller et al (1992) together with extensions to higher luminosities and cooler temperatures from Bessell et al. (1991).

Classes de Luminosidade (cont.)

As linhas espectrais são muito sensíveis à densidade nas fotosferas estelares ⇨ pelas diferenças nas linhas pode-se identificar se a estrela encontra-se na sequência principal ou no ramo das gigantes, por exemplo.

Esquema de identificação para as diferentes categorias ⇨ classe de luminosidade (M-K).

Table 13. Absolute magnitudes of the MK system. For references, see text p. 17.

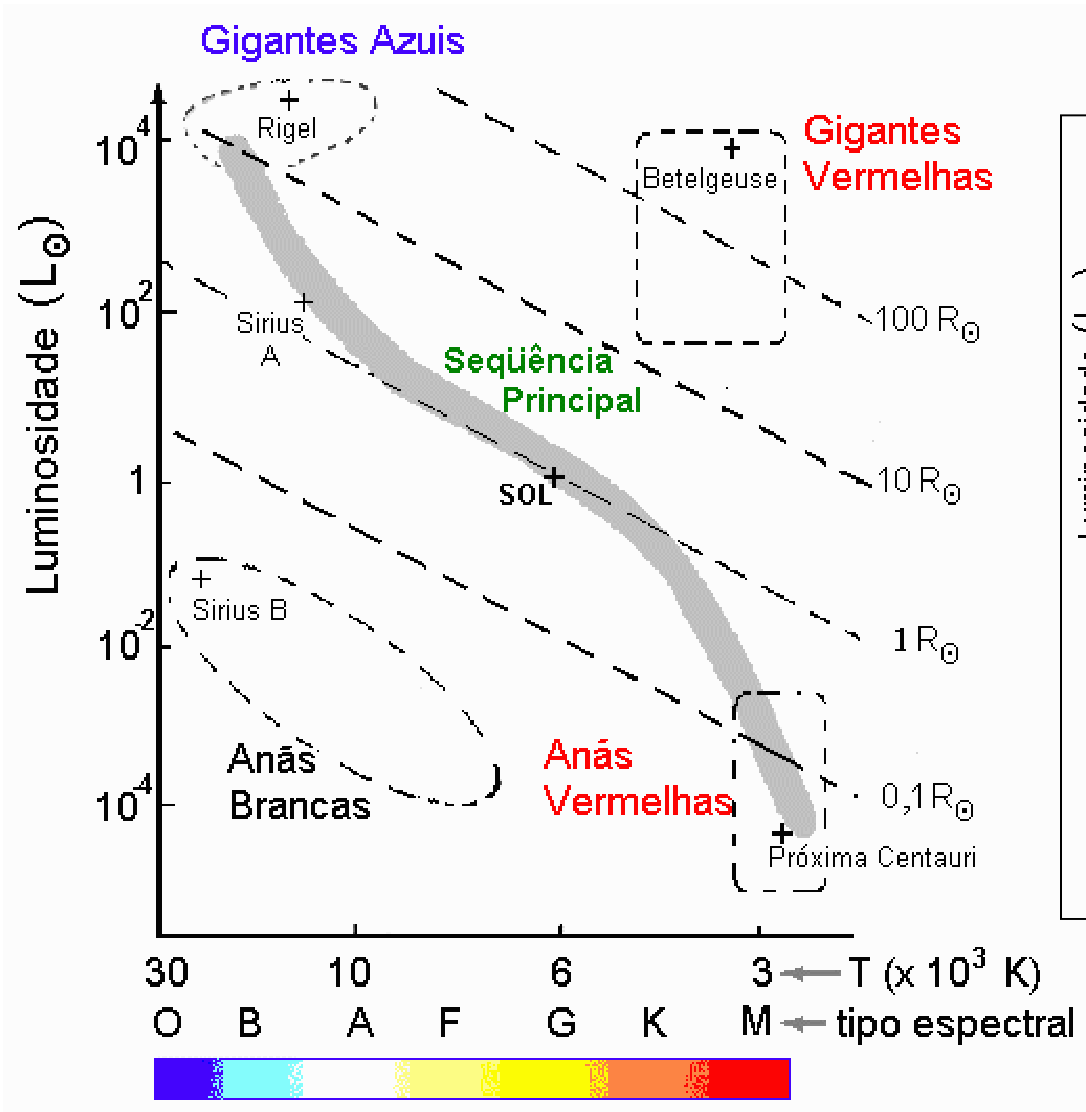
LC	V	IV	III	II	Ib	Iab	Ia	Ia – 0
Sp	M_v							
O 3	$-6^{\mathrm{M}}0$						$-6^{\mathrm{M}}8$	
4	−5.9	$-6^{\mathrm{M}}1$	$-6^{\mathrm{M}}5$				−6.8	
5	−5.7	−6.0	−6.3				−6.8	
6	−5.5	−5.8	−6.1			$-6^{\mathrm{M}}5$	−6.8	
7	−5.2	−5.5	−5.9	$-6^{\mathrm{M}}0$	$-6^{\mathrm{M}}3$	−6.5	−6.8	
8	−4.9	−5.4	−5.8	−6.0	−6.2	−6.5	−6.8	
9	−4.5	−5.2	−5.6	−5.9	−6.2	−6.5	−6.8	
B 0	−4.0	−4.7	−5.1	−5.7	−6.1	−6.4	−6.9	$-8^{\mathrm{M}}2$
1	−3.2	−3.8	−4.4	−5.4	−5.8	−6.4	−6.9	−8.3
2	−2.45	−3.1	−3.9	−4.8	−5.7	−6.4	−6.9	−8.3
3	−1.6	−2.4	−3.0	−4.5	−5.5	−6.3	−7.0	−8.3
5	−1.2	−1.7	−2.2	−4.0	−5.4	−6.2	−7.0	−8.4
7	−0.6	−1.1	−1.5	−3.5	−5.3	−6.2	−7.1	−8.4
8	−0.25	−0.7	−1.2	−3.1	−5.2	−6.2	−7.1	−8.5
9	+0.2	−0.2	−0.6		−5.2	−6.2	−7.1	−8.5
A 0	+0.65	+0.3	+0.0	−3.0	−5.2	−6.3	−7.1	−8.5
1	+1.0	+0.7	+0.2	−3.0	−5.2	−6.4	−7.2	−8.5
2	+1.3	+1.0	+0.3	−2.9	−5.2	−6.5	−7.2	−8.6
3	+1.5	+1.2	+0.5	−2.8	−5.2	−6.5	−7.2	−8.7
5	+1.95	+1.3	+0.7	−2.8	−5.1	−6.6	−7.4	−8.8
7	+2.2	+1.7	+1.1	−2.7	−5.1		−7.7	−8.9
8	+2.4	+2.0	+1.2	−2.6	−5.1		−7.8	−8.9
F 0	+2.7	+2.2	+1.5	−2.5	−5.1	−6.6	−8.0	−9.0
2	+3.6	+2.4	+1.7	−2.4	−5.1	−6.6	−8.0	−9.0
5	+3.5	+2.5	+1.6	−2.3	−5.1	−6.6	−8.0	−9.0
8	+4.0	+2.8		−2.3	−5.1	−6.5	−8.0	−9.0

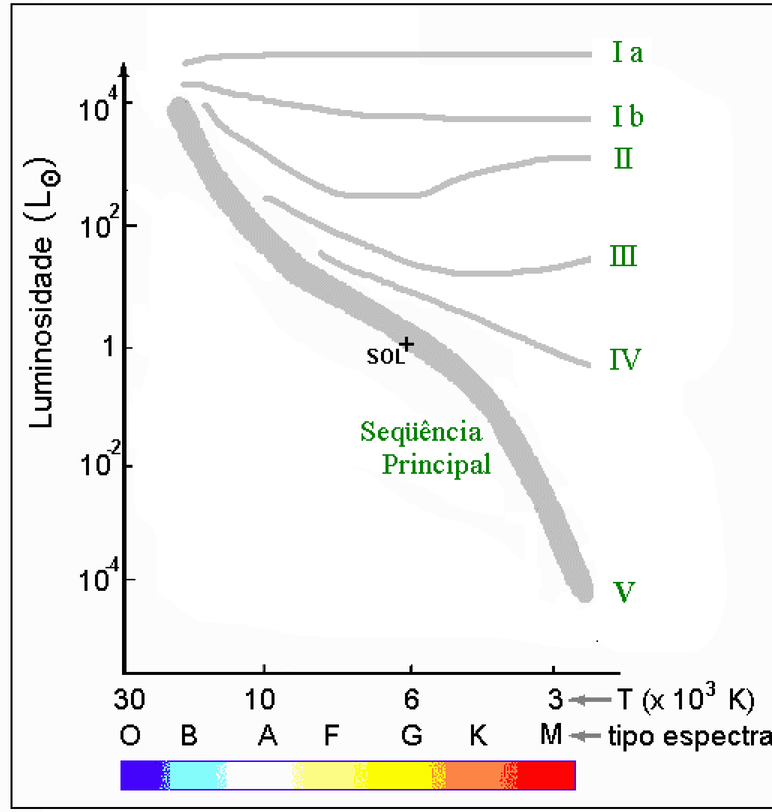
Schmidt-Kaler

F 0	+ 2.7	+2.2	+1.5	−2.5	−5.1	−6.6	−8.0	−9.0
2	+ 3.6	+2.4	+1.7	−2.4	−5.1	−6.6	−8.0	−9.0
5	+ 3.5	+2.5	+1.6	−2.3	−5.1	−6.6	−8.0	−9.0
8	+ 4.0	+2.8		−2.3	−5.1	−6.5	−8.0	−9.0
G 0	+ 4.4	+3.0	+1.0	−2.3	−5.0	−6.4	−8.0	−8.9
2	+ 4.7	+3.0	+0.9	−2.3	−5.0	−6.3	−8.0	−8.8
5	+ 5.1	+3.1	+0.9	−2.3	−4.6	−6.2	−7.9	−8.6
8	+ 5.5	+3.1	+0.8	−2.3	−4.4	−6.1	−7.8	−8.5
K 0	+ 5.9	+3.1	+0.7	−2.3	−4.3	−6.0	−7.7	−8.5
1	+ 6.15	+3.1	+0.6	−2.3	−4.3	−6.0	−7.6	
2	+ 6.4		+0.5	−2.3	−4.3	−5.9	−7.6	
3	+ 6.65		+0.3	−2.3	−4.3	−5.9	−7.5	
4	+ 7.0		0.0	−2.3	−4.3	−5.8	−7.5	
5	+ 7.35		−0.2	−2.3	−4.4	−5.8	−7.5	
7	+ 8.1		−0.3	−2.3	−4.4	−5.7	−7.4	
M 0	+ 8.8		−0.4	−2.5	−4.5	−5.6	−7.0	−8.0
1	+ 9.3		−0.5	−2.5	−4.6	−5.6	−7.0	−8.0
2	+ 9.9		−0.6	−2.6	−4.7	−5.6	−6.9	−8.0
3	+10.4		−0.6	−2.6	−4.8	−5.6	−6.9	−8.0
4	+11.3		−0.5	−2.6	−4.8	−5.6	−6.8	−8.0
5	+12.3		−0.3		−4.8	−5.6	−6.8	

Schmidt-Kaler

Diagrama H-R e as Classes de Luminosidade.



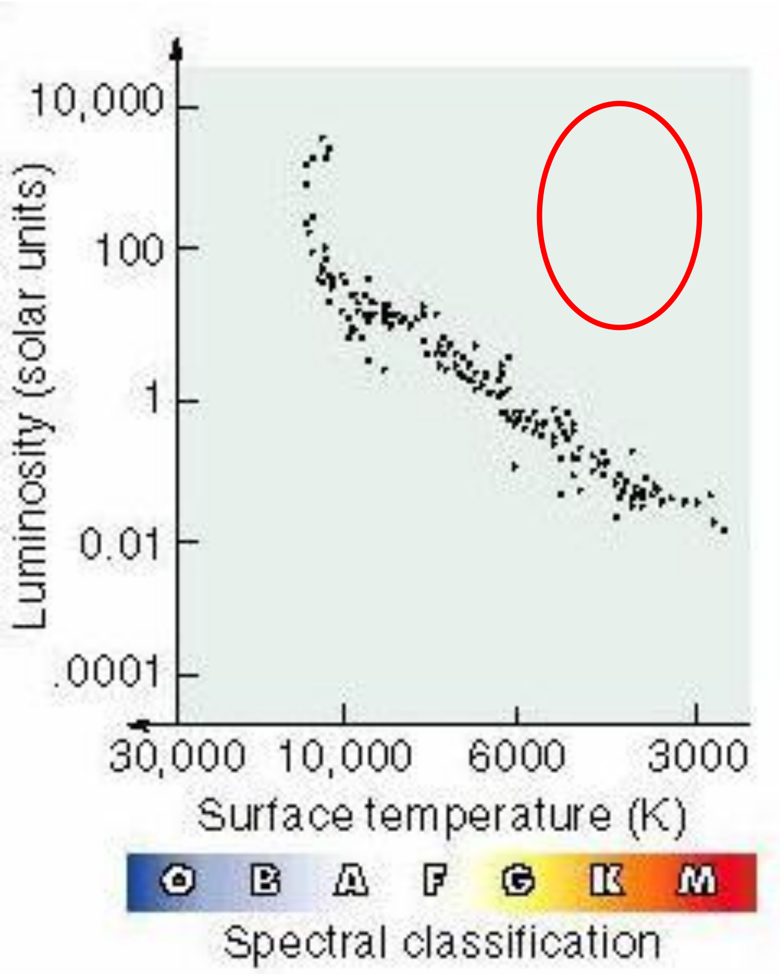


Class	Type of Star
Ia-O	Extreme, luminous supergiants
Ia	Luminous supergiants
Ib	Less luminous supergiants
II	Bright giants
III	Normal giants
IV	Subgiants
V	Main-sequence (dwarf) stars
VI, sd	Subdwarfs
D	White dwarfs

Tab. 8.3 Morgan-Keenan Luminosity Classes

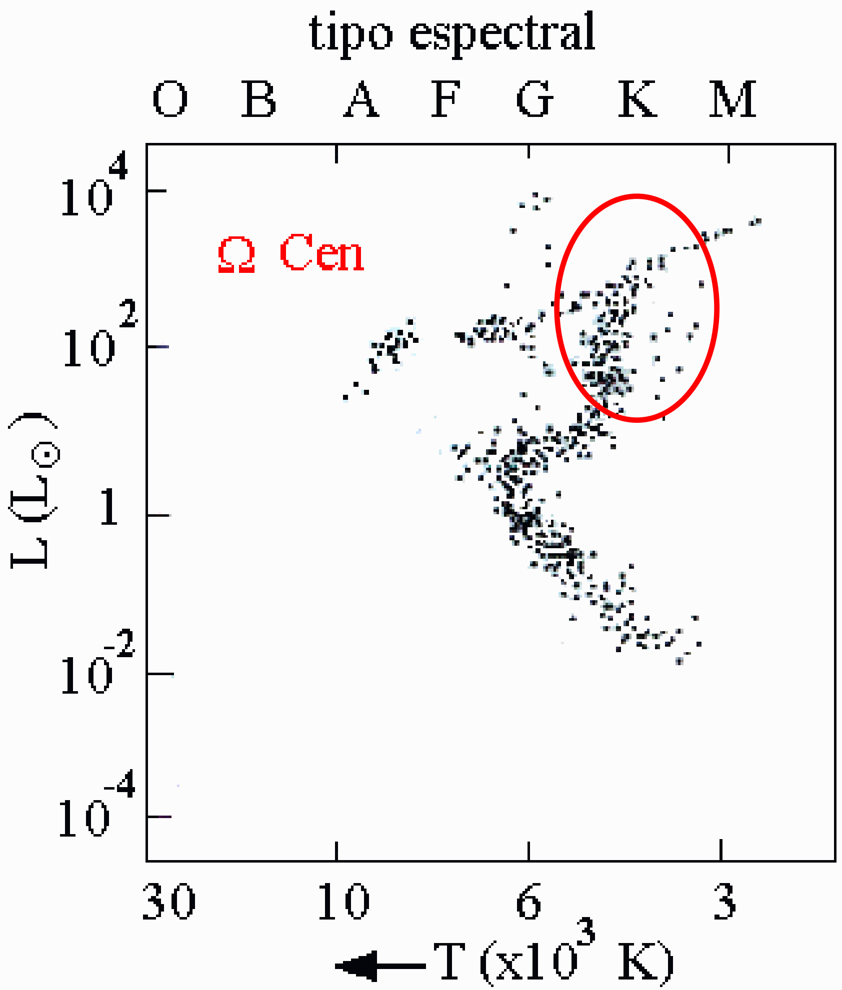
Aglomerado aberto (jovem)

Plêiades (~10 milhões de anos)



Neste caso, somente estrelas na Sequência Principal e nenhuma na região das gigantes.

Aglomerado globular (velho)



Ômega Centauri

(12 bilhões de anos)

8.16 The blue-white star Fomalhaut ("the fish's mouth" in Arabic) is in the southern constellation of Pisces Austrinus. Fomalhaut has an apparent visual magnitude of $V = 1.19$. Use the H–R diagram in Fig. 8.16 to determine the distance to this star.

$m_V = 1{,}19$ mag

$M_V = 2{,}0$ mag

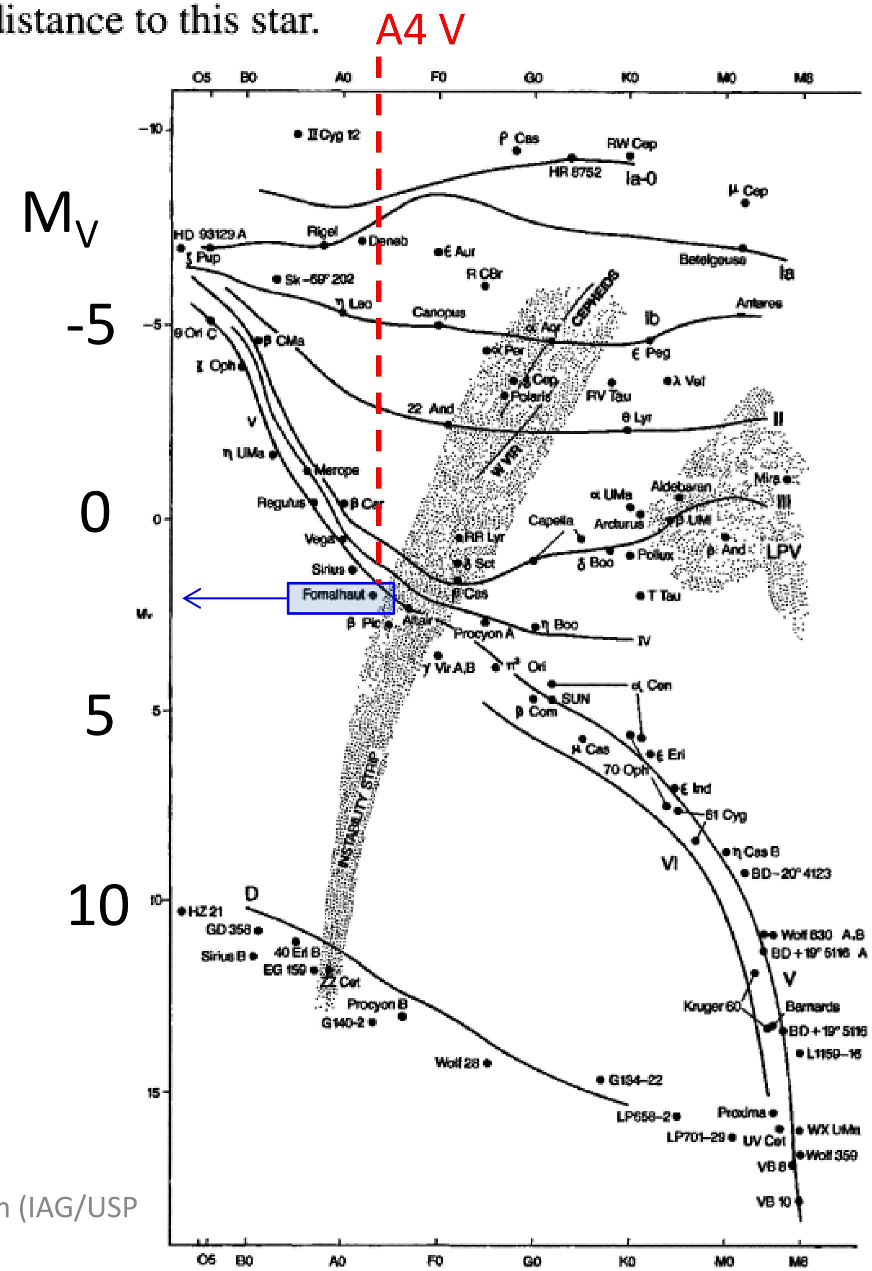
$$m_V - M_V = 5 \log\left(\frac{d}{10}\right)$$

$$\frac{m_V - M_V}{5} = \log\left(\frac{d}{10}\right)$$

$$10^{\frac{m_V - M_V}{5}} = \left(\frac{d}{10}\right)$$

$$10^{\frac{1{,}19-2}{5}} = 10^{-0{,}162} = 0{,}689 = \left(\frac{d}{10}\right)$$

$$\boxed{d = 6{,}89\ pc}$$



Próxima Aula:

Capítulo 9

Atmosferas Estelares

ENTREGAR LISTA 1