

Espectros estelares

Roberto Ortiz
EACH/USP

O tamanho das estrelas

- Vimos que a luminosidade de uma estrela relaciona-se com o seu raio e sua temperatura:

$$L_*/L_{sol} = (R_*/R_{sol})^2 (T_*/5780)^4$$

- onde a temperatura pode ser obtida pela Lei de Wien, por exemplo.
- A luminosidade pode ser calculada a partir da magnitude bolométrica e a distância da estrela, como já vimos.

- podemos isolar o raio da estrela nessa última relação:

$$L_*/L_{sol} = (R_*/R_{sol})^2 (T_*/5780)^4$$

$$\log(L_*/L_{sol}) = 2\log(R_*/R_{sol}) + 4\log(T_*/5780)$$

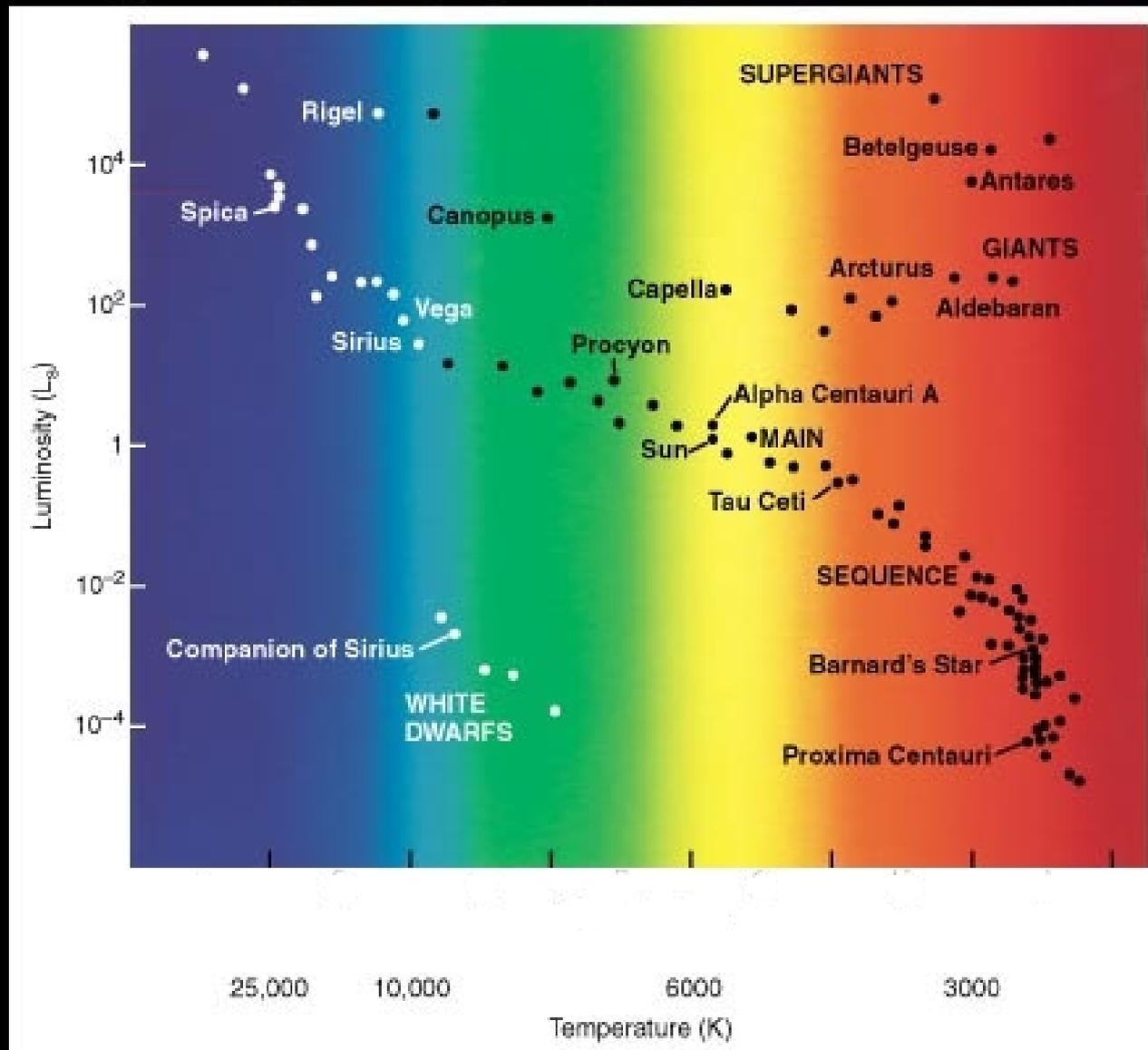
$$\log(R_*/R_{sol}) = 1/2 \log(L_*/L_{sol}) - 2\log(T_*/5780)$$

- Na prática, é muito difícil medir os diâmetros estelares, porque as estrelas estão muito distantes e sempre aparecem como pontos luminosos, mesmo quando vistas através de grandes telescópios.
- A relação acima nos permite calcular o tamanho das estrelas.

O diagrama Hertzsprung-Russell (ou HR)

- Em 1912, durante uma reunião da Royal Astronomical Society (Reino Unido), Henry Norris Russell apresentou um diagrama que viria a ser chamado de *Diagrama H-R*.
- Nesse diagrama, a luminosidade das estrelas era plotada como uma função de sua temperatura.
- Até hoje, as teorias de evolução estelar são baseadas na posição das estrelas nesse diagrama.

Fraknoi/Morrison/Wolff, *Voyages Through the Universe*, 2/e
Figure 17.15 H-R diagram for a Selected Sample of Stars



Harcourt, Inc. items and derived items copyright ©2000 by Harcourt, Inc.

A maior parte das estrelas do Universo estão arranjadas ao longo de uma diagonal no diagrama: a sequência principal.

- Vamos verificar a distribuição das estrelas no diagrama conforme o seu tamanho:
- Vimos que:

$$\log(L_*/L_{sol}) = 2\log(R_*/R_{sol}) + 4\log(T_*/5780)$$

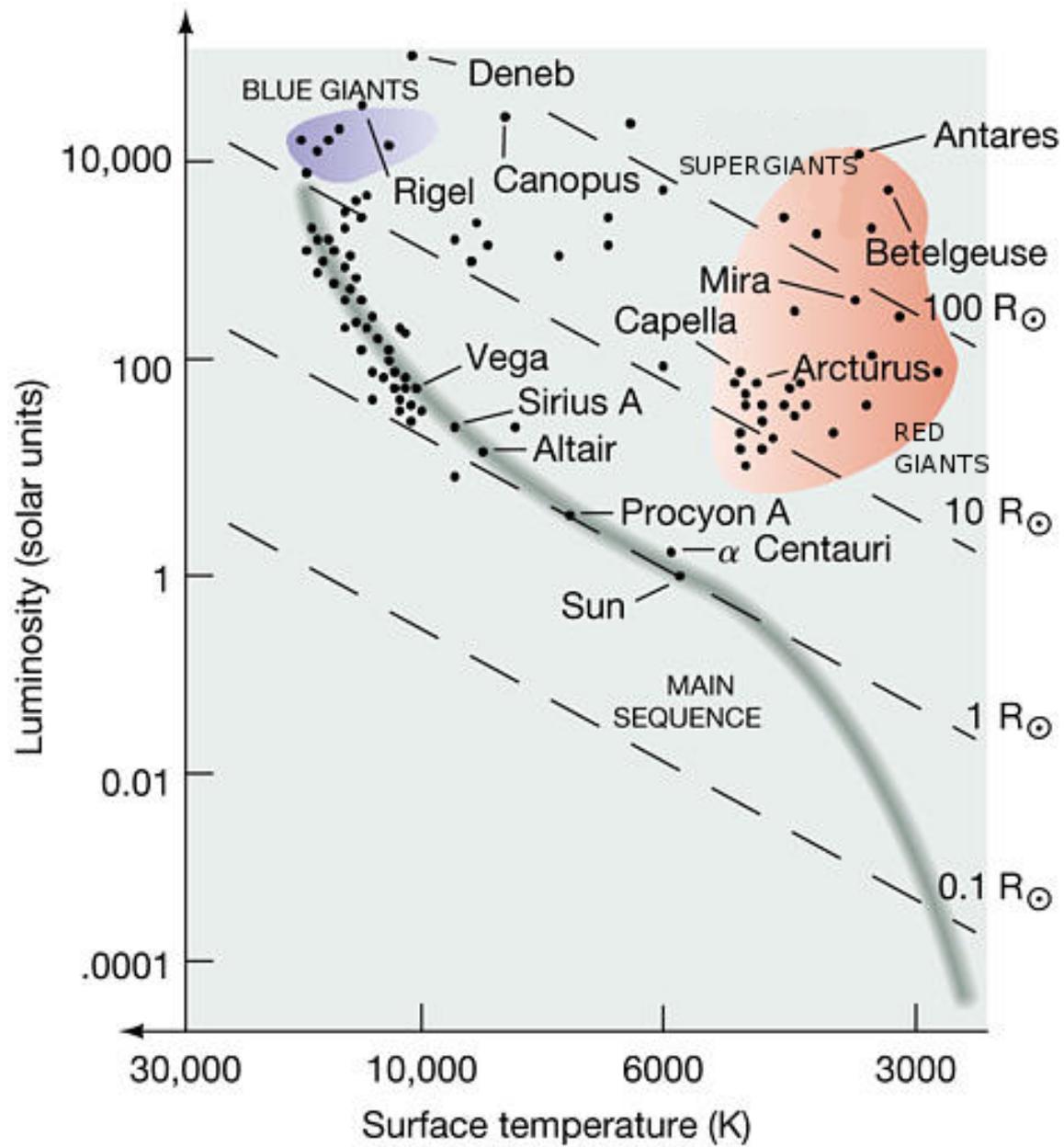
- Para um dado valor de R_* temos que:

$$\log(L_*/L_{sol}) = cte. + 4\log(T_*) - 4\log(5780)$$

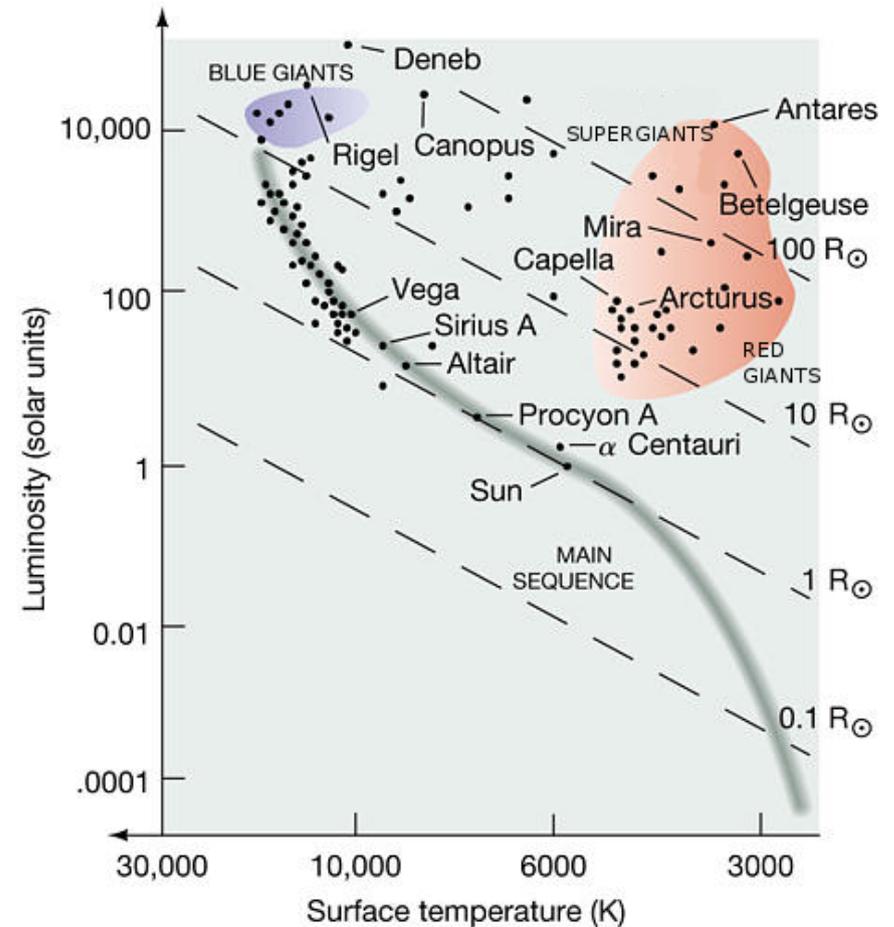
$$\log(L_*/L_{sol}) = cte.' + 4\log(T_*)$$

$$“y = b + a x”$$

- Portanto, as linhas de “iso-raio” no diagrama HR são retas diagonais paralelas.



- Na sequência principal, todas as estrelas possuem mais ou menos o tamanho do Sol.
- Na parte superior do diagrama estão as estrelas supergigantes com raios da ordem de centenas de raios solares.
- As estrelas gigantes possuem um raio da ordem de dezenas de raios solares. A maioria delas são gigantes vermelhas.

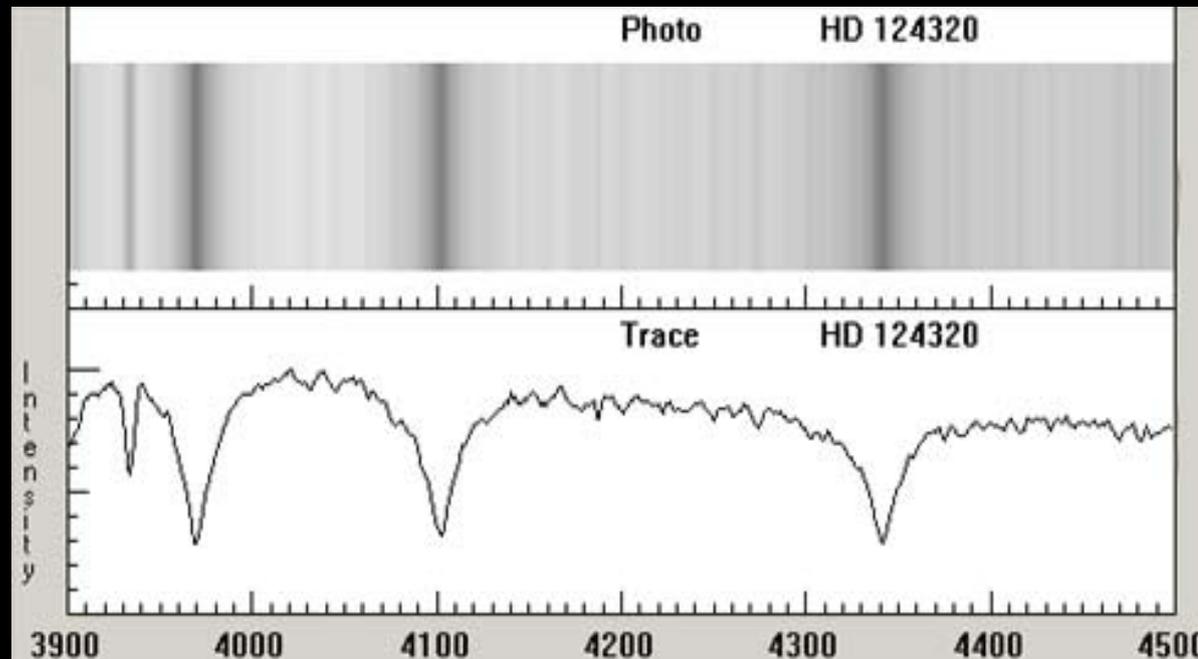


Espectros estelares

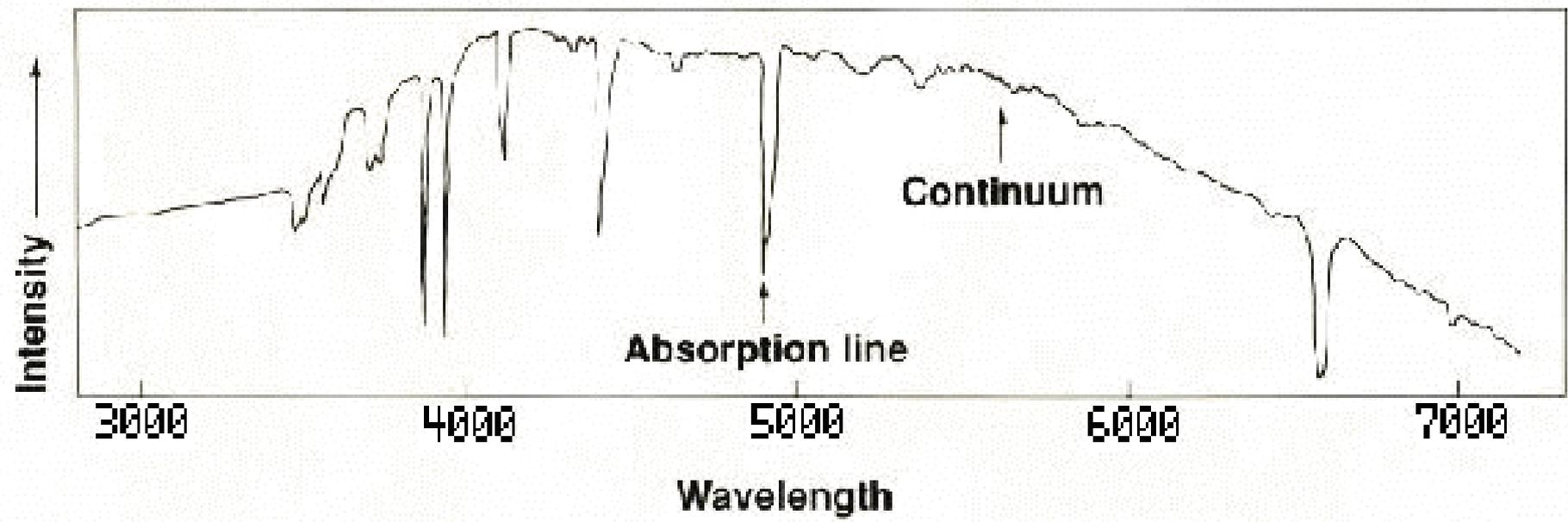
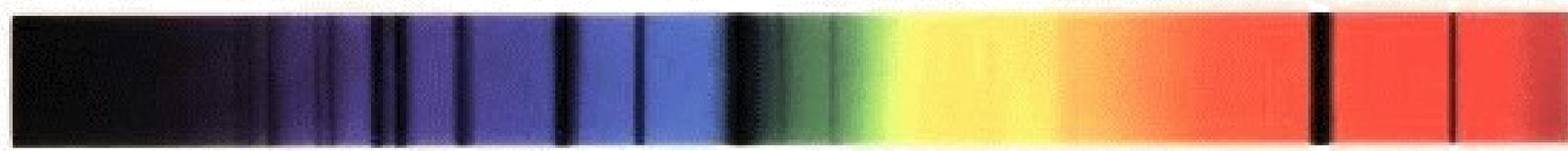
Espectros estelares são geralmente de absorção.

Cada elemento químico gera um conjunto de linhas.

O conjunto de linhas espectrais apresentado pela estrela dependerá da temperatura da estrela e de sua abundância química.



H δ H γ H β H α



Classificação Espectral

- Em 1839 é criada a *fotografia*. Três anos mais tarde o francês Edmond Becquerel (1820-1891), e poucos meses depois o inglês John William Draper (1811-1882), fotografaram o espectro do Sol.
- Somente em 1872 Henry Draper (1837-1882) obteve a primeira foto de um espectro estelar, da estrela Vega.
- Na universidade de Harvard (EUA), Edward Pickering e Annie Cannon classificaram 225 000 estrelas até magnitude 9 entre 1918 e 1924.
- Cannon classificou os espectros de acordo com a intensidade das linhas do hidrogênio, sendo *A* a mais forte, *B* a seguinte, *C* e assim por diante.

- Posteriormente algumas classes espectrais foram extintas e outras adicionadas. Os tipos espectrais foram ordenados de acordo com a *temperatura da estrela*.
- Em ordem decrescente de temperatura, os tipos espectrais são os seguintes:

O B A F G K M (R N S)

Tipo O

- Temperatura: 32 000 a 50 000 K
- Cor: azulada
- Linhas: He uma vez ionizado; linhas do H fracas.
- Contínuo: forte no UV
- Ocorrência: raríssimas, ocorrem com frequência de 0,00003%
- Exemplos: δ Ori (Mintaka), λ Orionis, etc.

Tipo B

- Temperatura: 10 500 a 32 000 K
- Cor: branco-azulada
- Linhas: He neutro; linhas do He ionizado ausentes; linhas do H com intensidade moderada.
- Contínuo: forte no UV
- Ocorrência: raras, ocorrem com frequência de 0,13%
- Exemplos: β Ori (Rigel), α Vir (Spica).

Tipo A

- Temperatura: 7 100 a 10 000 K
- Cor: branca
- Linhas: linhas do He neutro e ionizado ausentes; linhas do H com intensidade máxima.
- Contínuo: forte no azul
- Ocorrência: relativamente raras, ocorrem com frequência de 0,6%
- Exemplos: α CMa (Sirius), α Lyr (Vega).

Tipo F

- Temperatura: 6 000 a 7 000 K
- Cor: branco-amarelada
- Linhas: linhas do H com intensidade moderada; linhas do Ca uma vez ionizado (linhas *H* & *K* no UV) fortes.
- Contínuo: forte na região central do espectro visível.
- Ocorrência: 1 em 33 (3%)
- Exemplos: α Pup (Canopus), α CMi (Procyon).

Tipo G

(ou tipo solar)

- Temperatura: 5 300 a 6 000 K
- Cor: amarelada
- Linhas: linhas do H discretas; linhas *H* e *K* do Ca uma vez ionizado fortes
- Contínuo: forte na região do amarelo.
- Ocorrência: 7%
- Exemplos: α Cen, Sol.

Tipo K

- Temperatura: 4 200 a 5 300 K
- Cor: alaranjada
- Linhas: linhas do H muito fracas; muitas linhas de metais neutros (Mn, Mg, Fe).
- Contínuo: forte na região do vermelho.
- Ocorrência: 12%
- Exemplos: α Tau (Aldebaran), α Boo (Arcturus).

Tipo M

- Temperatura: 2 500 a 4 000 K
- Cor: vermelha
- Linhas: linhas do H praticamente ausentes; muitas linhas de moléculas (bandas moleculares), principalmente TiO.
- Contínuo: forte na região do infravermelho.
- Ocorrência: 76% (imensa maioria das estrelas do Universo)
- Exemplos: α Ori (Betelgeuse), o Ceti (Mira).

Sub-tipos espectrais

- Cada tipo espectral é sub-dividido em subtipos, numerados do mais quente para o mais frio.
 - Exemplos:
 - O5, O6, O7, O8, O9, B0, B1, B2... B9, A0, A1...

Sub-tipos espectrais

- Cada tipo espectral é sub-dividido em subtipos, numerados do mais quente para o mais frio.
 - Exemplos:
 - O5, O6, O7, O8, O9, B0, B1, B2... B9, A0, A1...



Temperatura decrescente

Ionização

- Na atmosfera de uma estrela os átomos podem estar em seu estado “neutro” ou ionizados (quando lhes faltam 1 ou mais elétrons).
- A “energia de ionização” é a energia que deve ser cedida a um átomo para arrancar-lhe 1 elétron em seu estado fundamental no átomo.
- Exemplos:
 - H^0 (HI) + 13,6 eV \rightarrow H^+ (HII) + e^-
 - He^0 (HeI) + 24,59 eV \rightarrow He^+ (HeII) + e^-
 - He^+ (HeII) + 54,42 eV \rightarrow He^{2+} (HeIII) + $2e^-$

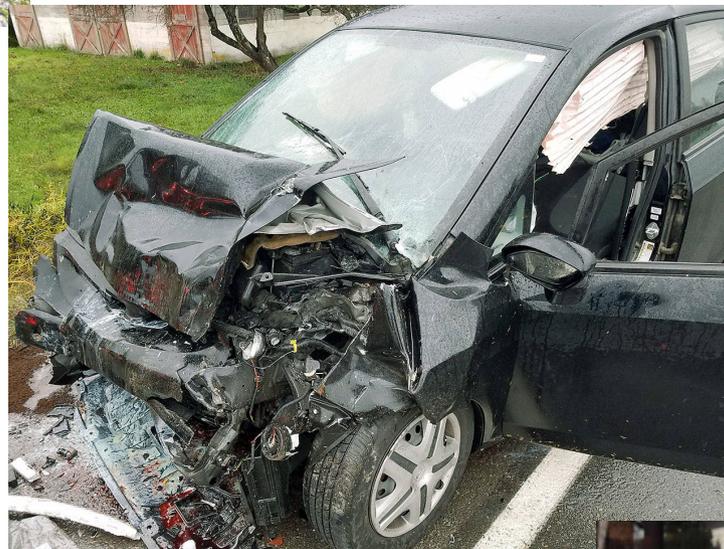
- A energia cedida ao átomo pode vir sob a forma de um fóton ou por colisões com outras partículas do meio.
- Em geral, quanto mais quente for a estrela, seus átomos estarão em estados mais ionizados pois:



Maior ionização

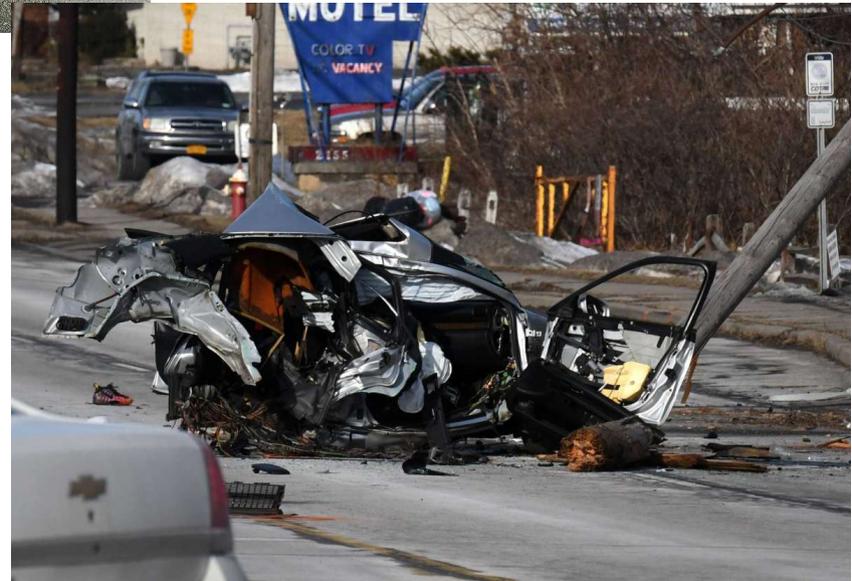


Colisão em baixa velocidade
Pouca energia cedida ao átomo
Apenas 1 e^- é arrancado.

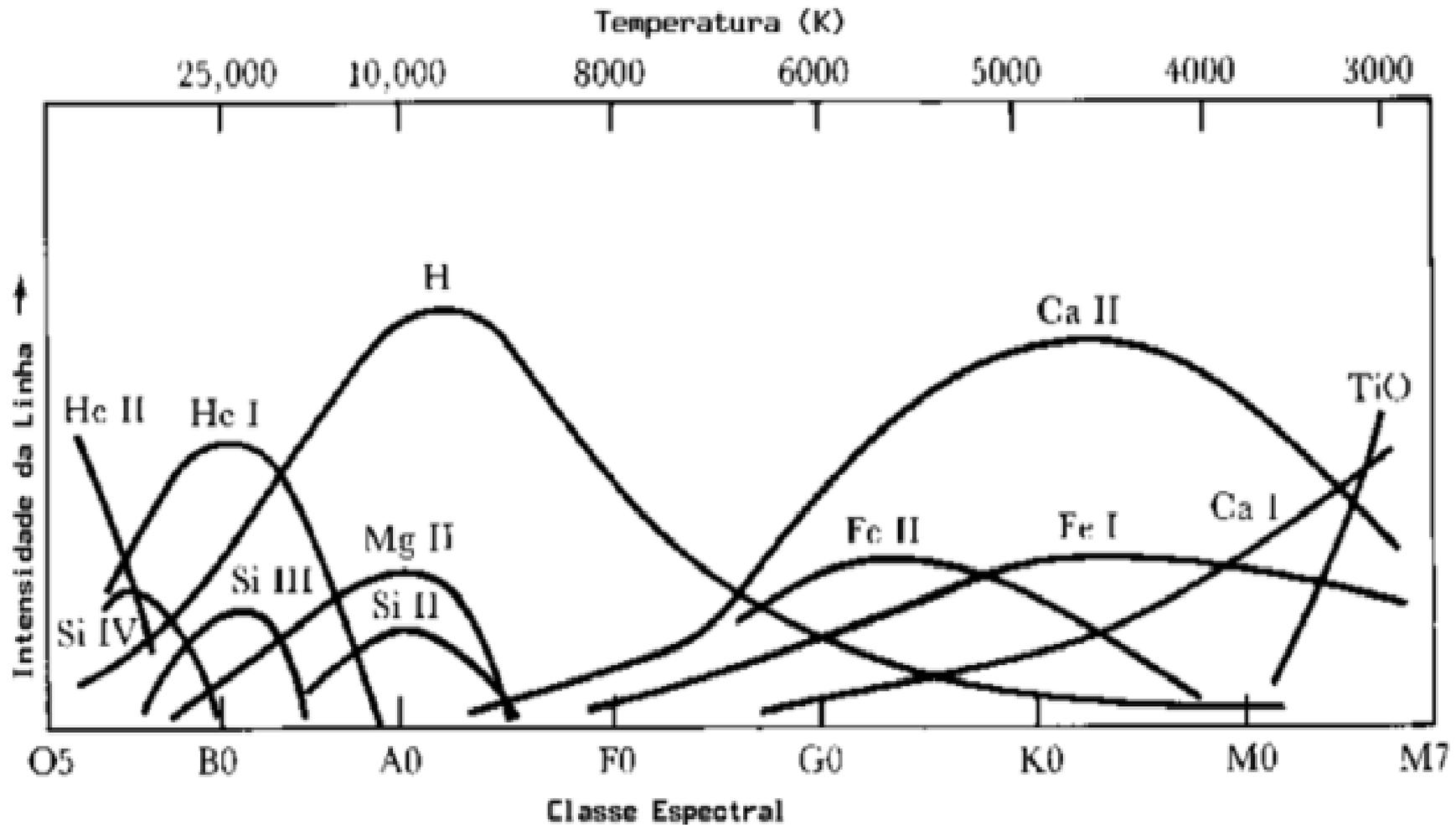


Se a velocidade (energia)
cedida ao átomo for maior
(maior T) \rightarrow 2 e^- podem
ser arrancados.

Se o gás for muito quente \rightarrow alta
velocidade das partículas \rightarrow 3 ou
mais e^- são arrancados do átomo.



A intensidade das linhas espectrais dos diversos estágios de ionização dos elementos depende da temperatura da estrela:



Mais ionizados

Menos ionizados

O tamanho das estrelas

- Conforme já vimos, pode-se calcular o tamanho das estrelas.
- Estrelas da sequência principal têm tamanho *semelhante ao Sol* e são chamadas de *anãs*.
- Estrelas *gigantes* possuem diâmetro *dezenas* de vezes maior do que o Sol.
- Estrelas *supergigantes* possuem diâmetro *centenas* de vezes maior do que o do Sol.



Em 1943, William Morgan, Philip Keenan e Edith Kellman, do observatório de Yerkes, introduziram as seis diferentes classes de luminosidade, de acordo com as larguras das linhas:

Ia - Supergigantes luminosas. Exemplo: Rigel (B8Ia): $L=40550 L_s$

Ib - Supergigantes. Exemplo: Betelgeuse (M2Iab): $L=12246 L_s$

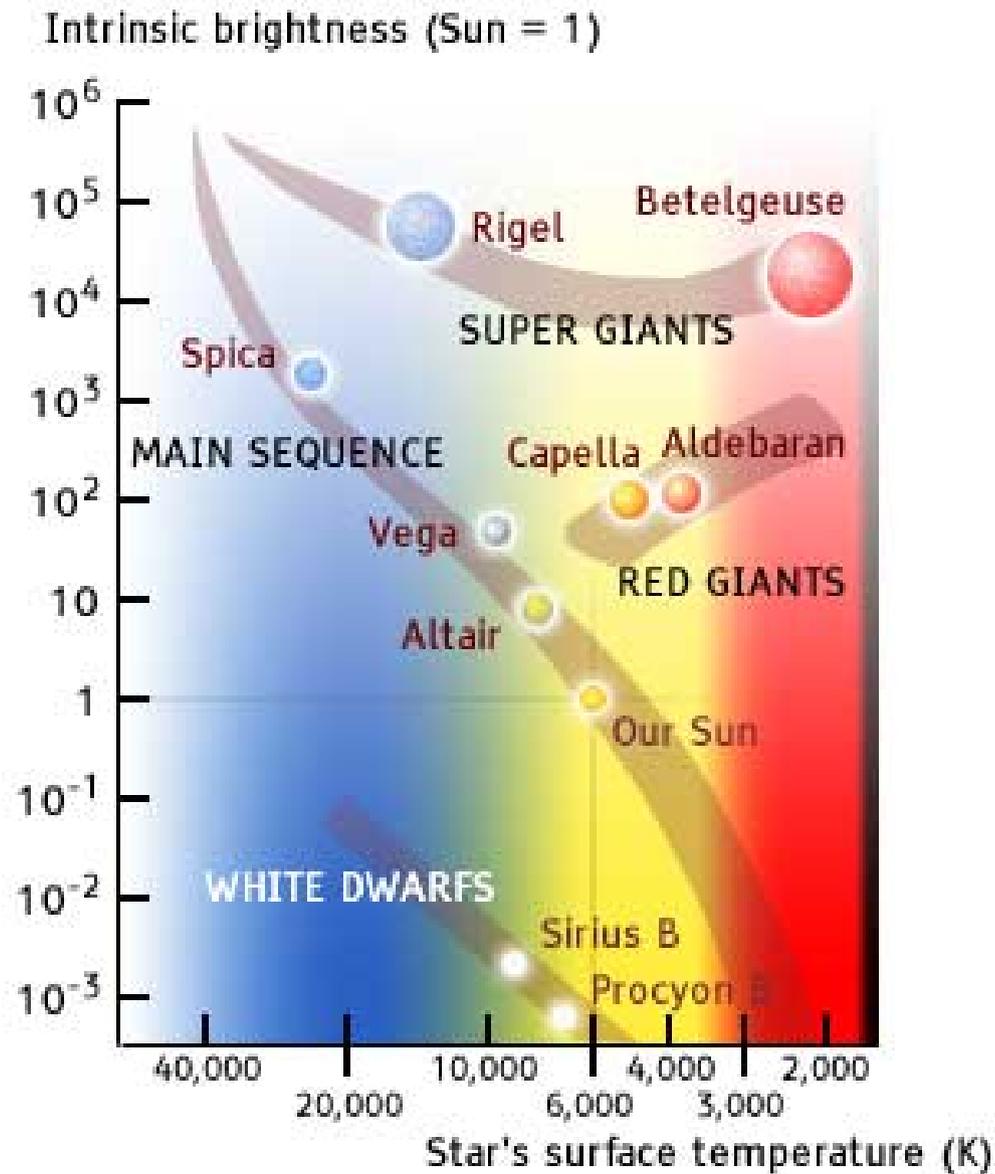
II - Gigantes luminosas. Exemplo: Antares (M1.5II): $L=4875 L_s$

III - Gigantes. Exemplo: Aldebaran (K5III): $L=100 L_s$

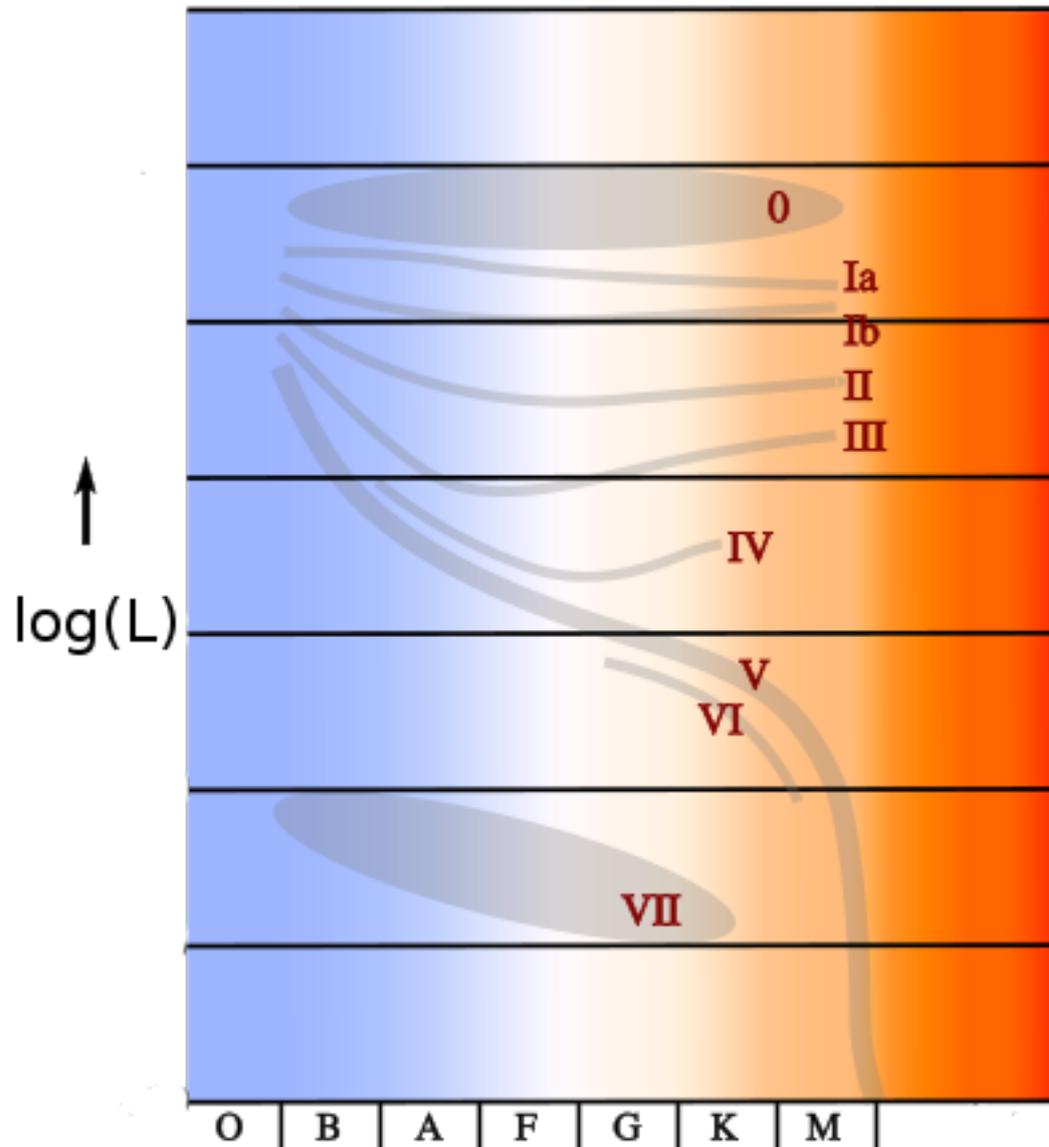
IV - Subgigantes. Exemplo: Acrux (α Crucis - B1IV): $L=3076 L_s$

V - Anãs ou de Sequência Principal. Exemplo: Sol (G2V): $L=1 L_s$

Classes de luminosidade



Classes de luminosidade



Exemplo: Mintaka

O9II



Exemplo: Mintaka

O9II



- Estrela quente, cor azulada
- Espectro com linhas do HeII, série de Balmer fraca
- Contínuo forte no UV
- Grande diâmetro (“gigante brilhante”)

Exemplo: Procyon A

F5V



Exemplo: Procyon A

F5V



- Temperatura entre 6 e 7 mil kelvin, cor branco-amarelada
- Espectro com série de Balmer de intensidade moderada, linhas do CaII no UV fortes
- Contínuo forte no verde ~ amarelo
- Estrela anã, tamanho semelhante ao Sol

Para saber mais...

“A Via-Lactea, nossa ilha no Universo”

Jacques Lépine

p.p. 63-71

“À luz das estrelas”

Lilia Irmeli Arany-Prado

p.p. 129-132

“Astronomia e Astrofísica”

Kepler S. Oliveira & Maria de Fatima O.
Saraiva

Capítulo 22, seções 22.1 a 22.5

