

(Adaptado do curso AGA0215 da **Profa. Thais Idiart**)

PROPRIEDADES DAS ESTRELAS

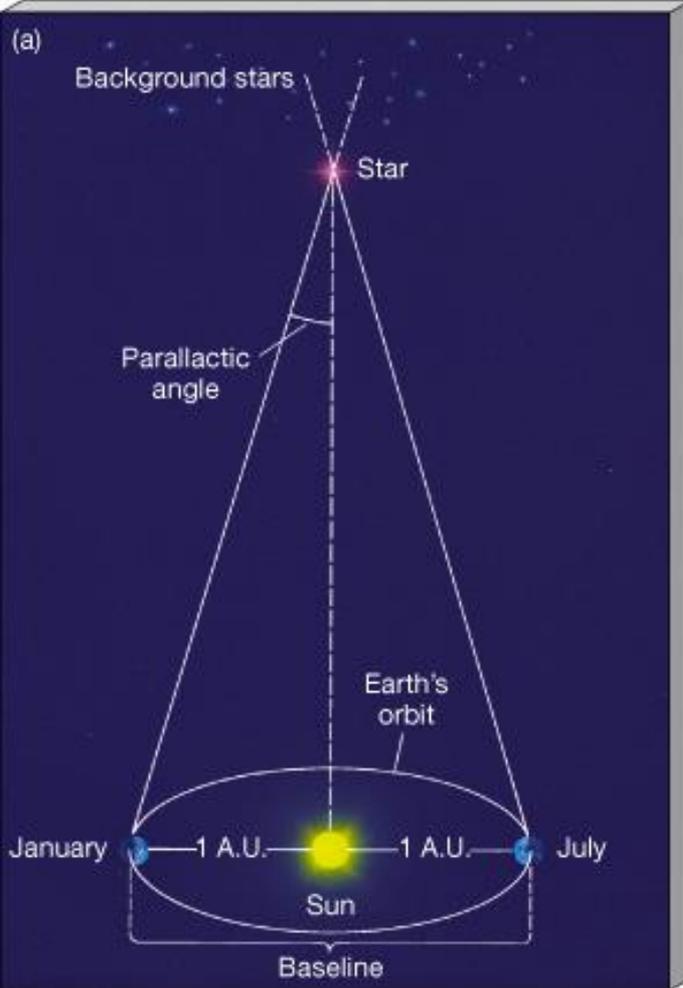
As propriedades físicas das estrelas:

Distância
Luminosidade
Tamanho
Massa

Estrelas são classificadas segundo sua:

Cor
Temperatura superficial
Características espectrais

DISTÂNCIA



PARALAXE ESTELAR

- Estende-se a linha de base para diâmetro da órbita da terra

$$\tan p = \frac{1 \text{ UA}}{\text{distância(Sol-estrela)}}$$

Se $p < 4^\circ$ então $\tan p \sim p(\text{rad})$

$$\text{distância(UA)} = \frac{1}{p(\text{rad})}$$

- definição: 1pc = distância sol-estrela se a paralaxe medida for de 1''

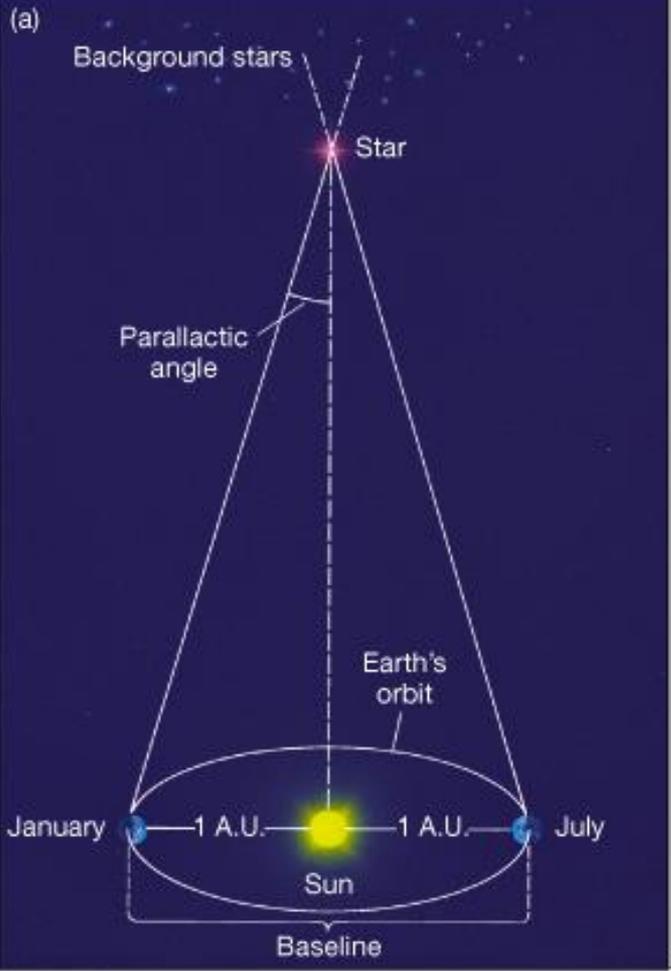
$$D(\text{pc}) = \frac{1}{\text{paralaxe}(\text{'})}$$

Paralaxe em graus, minutos e segundos de arco (° ' '')

$$1^\circ = 60'$$

$$1' = 60''$$

$$1\text{pc} \sim 3,09 \times 10^{13} \text{ Km} \sim 2,06 \times 10^5 \text{ UA} \sim 3,26 \text{ anos-luz}$$



PARALAXE ESTELAR

$$D(\text{pc}) = \frac{1}{\text{paralaxe}(\text{"})}$$

aplicável às estrelas mais próximas (até ~ 30 pc)

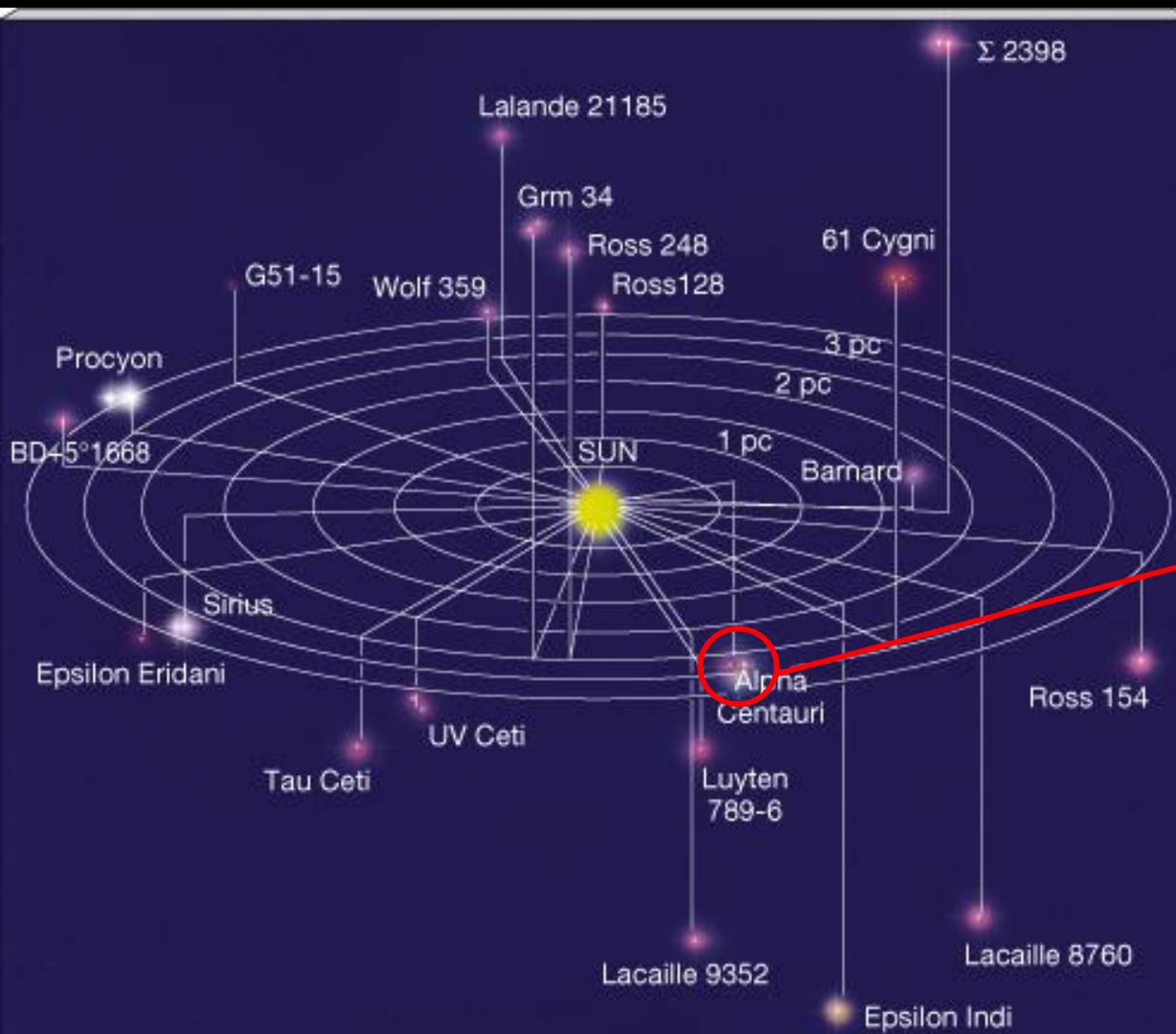


alguns milhares de estrelas



método dependente da turbulência na nossa atmosfera

Exemplos de 30 estrelas + próximas:



**sistema
triplo
~1,3 pc
(4,3 anos-luz)
paralaxe = 0,77''**

**Alfa Cen são as
estrelas mais
próximas do nosso
Sistema solar**

- **Óptica adaptativa ⇒ melhora a imagem
⇒ paralaxe até ~100 pc**

MOVIMENTO PRÓPRIO

Movimento significativo observado que estrelas + próximas possuem em relação as estrelas + distantes. Faz parte do deslocamento real da estrela na Galáxia e é medido pela componente perpendicular à nossa linha de visada (deve ser corrigido do efeito da paralaxe).

Segunda estrela mais próxima: estrela de Barnard

Paralaxe=0,55'' (1,8 pc ou 6 anos-luz)

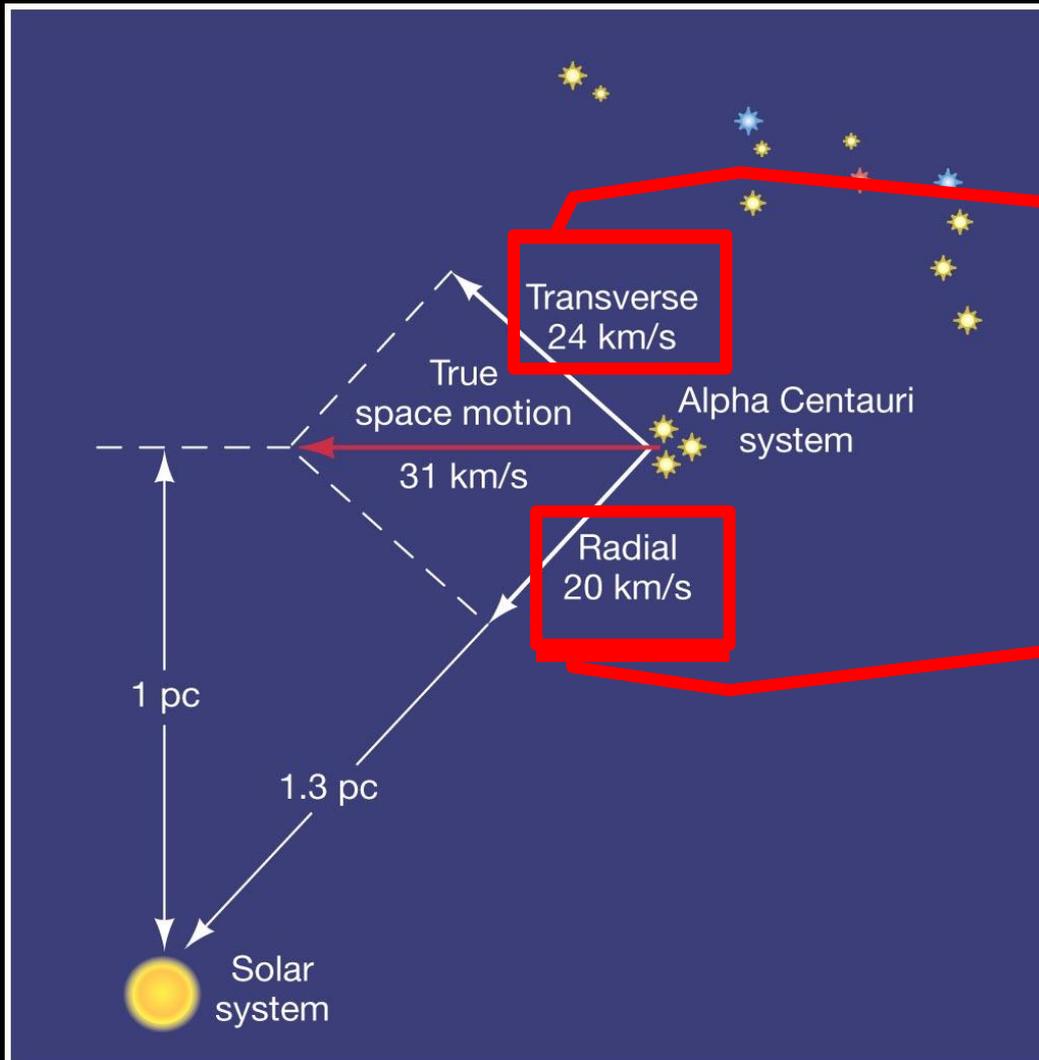
Tem o maior movimento próprio observado.

1985



movimento próprio
de 10''/ano

Movimento de alpha Centauri:



Movimento próprio
determina a
componente
transversa da
velocidade

Medida através do
deslocamento
Doppler das linhas
do espectro de
alpha Centauri

Satélite Hipparcos

lançado em 1989 e funcionou até 1993

Espelho de 29 cm com o objetivo de medir posições de estrelas

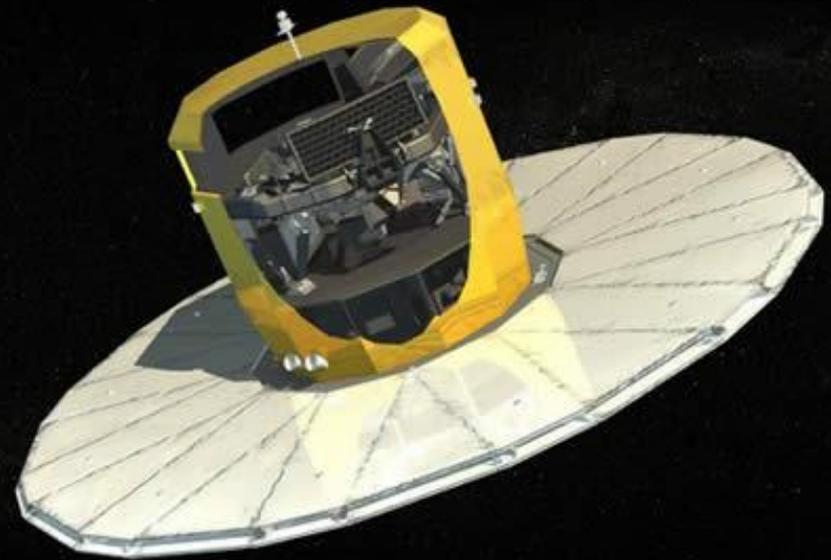
- paralaxes precisas: até ~ 200 pc (milhões de estrelas) revisão de todas as distâncias !



Observatório espacial Gaia

lançamento em dezembro/2013

**catálogo 3D de ~ 1 bilhão de
estrelas + identificação de planetas
extrasolares
(1% das estrelas da nossa Galáxia)**



Tem cerca de 10 espelhos retangulares que são usados em combinação para fazer o catálogo 3D. Maior espelho: 1,49 x 0,54 m

LUMINOSIDADE

LUMINOSIDADE E FLUXO

Fluxo de energia de uma estrela é o que medimos no telescópio+equipamento ou mesmo a olho nu, ou seja, é o brilho aparente de uma estrela.

DEFINIÇÃO: o fluxo de energia (E/t/área)
(ou brilho aparente) é dado por:

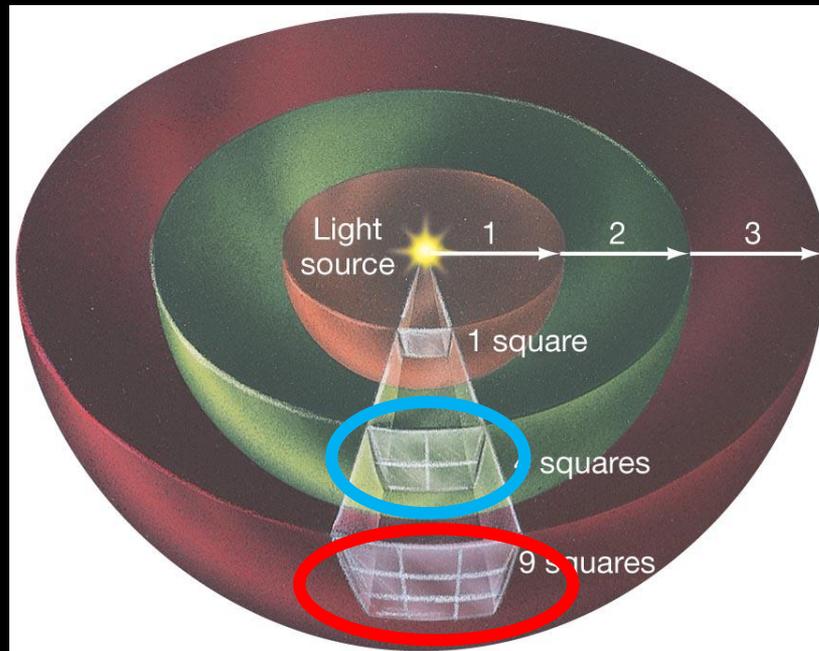
$$\text{fluxo} \propto \frac{\text{Luminosidade}}{D^2}$$



dependente da distância

L = brilho intrínseco
ou luminosidade

$$\text{fluxo (brilho aparente)} \propto \frac{\text{Luminosidade (brilho intrínseco)}}{D^2}$$



se duplicarmos a distância ($2 \times D$)
o brilho aparente fica 2^2 ou 4 vezes mais fraco

se triplicarmos a distância ($3 \times D$)
o brilho fica 3^2 ou 9 vezes mais fraco

etc.....

$$\text{fluxo (brilho aparente)} \propto \frac{\text{Luminosidade (brilho intrínseco)}}{D^2}$$

Mais comum: escala de **magnitude** ao invés de fluxo

MAGNITUDE APARENTE

A primeira definição desta escala data do século II AC pelo astrônomo grego Hiparcos.

mag=1 \Rightarrow mais brilhante (m_1)

mag=6 \Rightarrow mais fraca (m_6)

Pogson (1856) adaptou a escala para que fosse igual a de Hiparcos.

Quando se começou a usar aparelhos para medir a luz vinda das estrelas, viu-se que a fisiologia do olho humano é tal que:

- 1. a mudança de 1 mag, corresponde a um fator de 2,5 em brilho aparente (fluxo).**
- 2. a diferença entre uma mag e outra corresponde a diferença entre os logarítmos dos fluxos.**

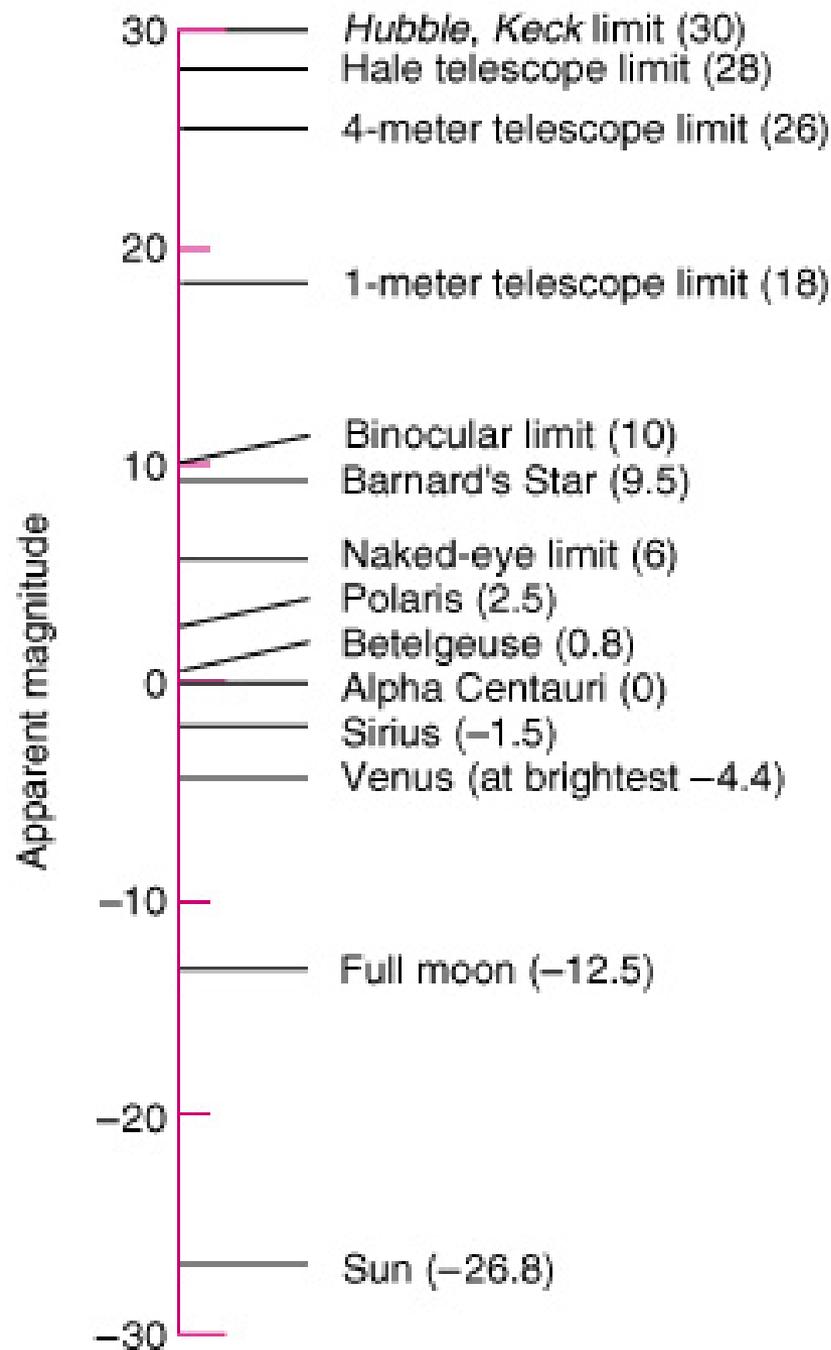
$$m_1 - m_2 = -2,5 \log(f_1 / f_2)$$

O sinal de “-” tem a ver com o fato da escala definida por Hiparcos ser invertida (magnitude numericamente menor = mais brilhante).

MAGNITUDES APARENTES DE ALGUNS OBJETOS

O ponto zero de magnitude é a estrela Vega ($m=0$)

MAGNITUDE É UMA ESCALA LOGARÍTMICA DO FLUXO DE LUZ



MAGNITUDE ABSOLUTA

É uma escala logarítmica da luminosidade
(brilho intrínseco de uma estrela = energia/tempo)

Supondo um conjunto de estrelas que estão a uma mesma distância da Terra, a diferença entre as suas magnitudes aparentes reflete a diferença entre os seus brilhos intrínsecos (ou luminosidades).

Supondo esta distância como sendo um valor fixo de 10 pc (valor escolhido convenientemente), pode-se definir a **magnitude absoluta como sendo a magnitude aparente se a  estiver a uma distância conhecida padrão de $D = 10$ pc.**

Sabendo que:

$$F = \frac{L}{4\pi D^2} \quad e \quad m_1 - m_2 = -2.5 \log \left(\frac{F_1}{F_2} \right)$$

Podemos escrever uma relação entre magnitude aparente, magnitude absoluta e distância, supondo duas estrelas de mesma luminosidade localizadas a distâncias “d” e 10 pc (mag definida como M) :

$$M - m = 2,5 \times \log \left(\frac{F_{10}}{F} \right) \quad \longrightarrow \quad 10^{\frac{m-M}{2,5}} = \frac{F_{10}}{F} = \left(\frac{D}{10pc} \right)^2$$

$$m - M = 5 \times \log D - 5 \times \log(10pc)$$

Esta expressão é conhecida como **MÓDULO DE DISTÂNCIA**

$$m - M = 5 \log D(pc) - 5$$

conhecendo-se **M** e **m** têm-se **D** (em pc)

DETERMINAÇÃO DA MAGNITUDE ABSOLUTA DO SOL

Parâmetros da estrela Vega (zero de magnitude):

$$T_{\text{eff}}=10105\pm 230 \text{ K}, R=2,69\pm 0,25R_{\odot} \text{ e } d=7,76 \text{ pc}$$

$$\text{Fluxo de Vega no raio } R: F(R)=\sigma T^4=5,9\times 10^8 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Luminosidade de Vega: } L=4\pi R^2 \times F(R)=2,62\times 10^{28} \text{ W}$$

$$\text{Fluxo de Vega na Terra: } F(d)=L/(4\pi d^2)=3,6\times 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

$$\text{Aplicando: } m_{\odot} - m_{\text{VEGA}} = -2,5 \times \log(f_{\odot}/f_{\text{VEGA}})$$

$$m_{\odot} - 0 = -2,5 \times \log(1379/3,6 \times 10^{-8})$$

cte solar

$$m_{\odot} = -26,8$$

Usando o módulo de distância:

$$m_{\odot} - M_{\odot} = 5 \log D_{\odot} - 5$$

$$-26,8 - M_{\odot} = 5 \log(4,85 \times 10^{-6} \text{ pc}) - 5$$

$$M_{\odot} = +4,77$$

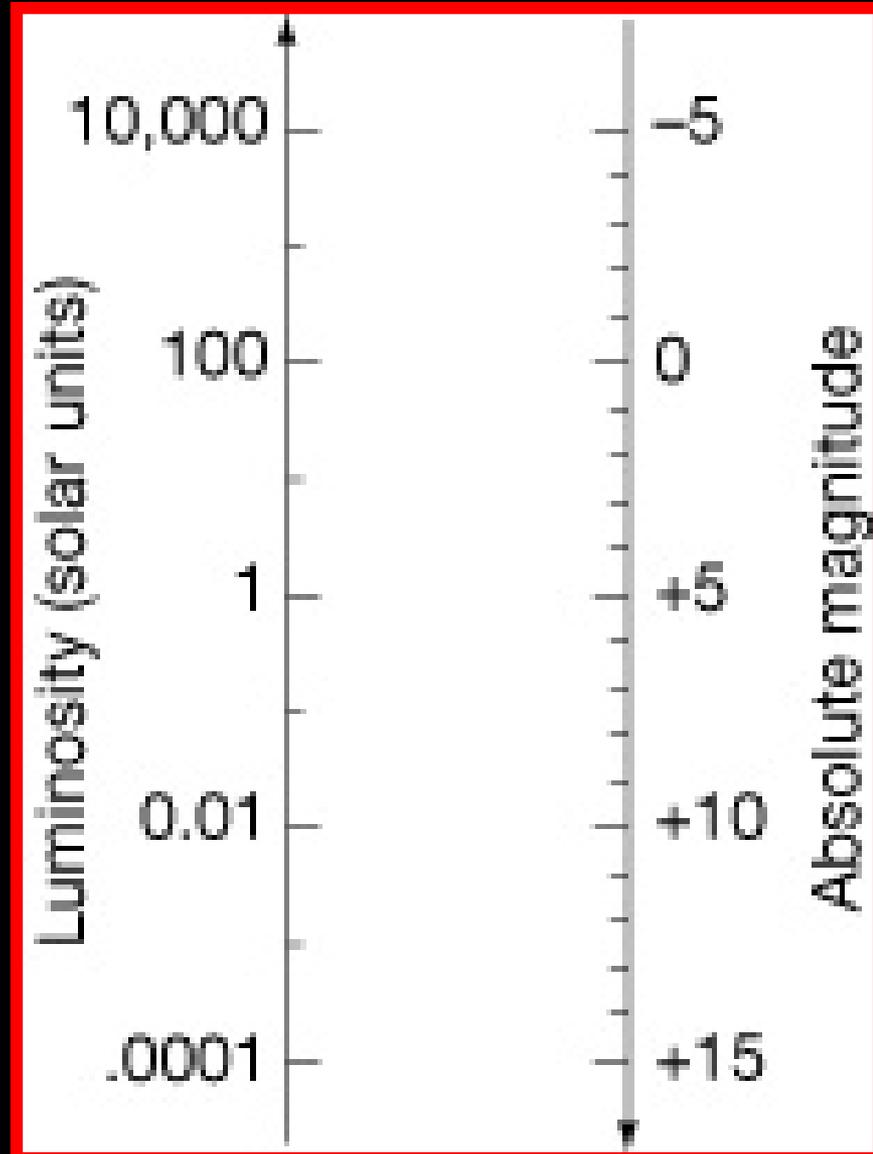
A magnitude absoluta M é uma escala logarítmica da luminosidade

Fazendo a diferença entre magnitudes absolutas de uma dada estrela e o Sol ($M_{\odot} = +4,77$), podemos escrever:

$$M - M_{\odot} = -2,5 \log(L/L_{\odot})$$

Podemos então construir a conversão entre LUMINOSIDADE (em unidades solares) e MAGNITUDE ABSOLUTA.

Ver Stellarium



TAMANHO

OS TAMANHOS DAS ESTRELAS

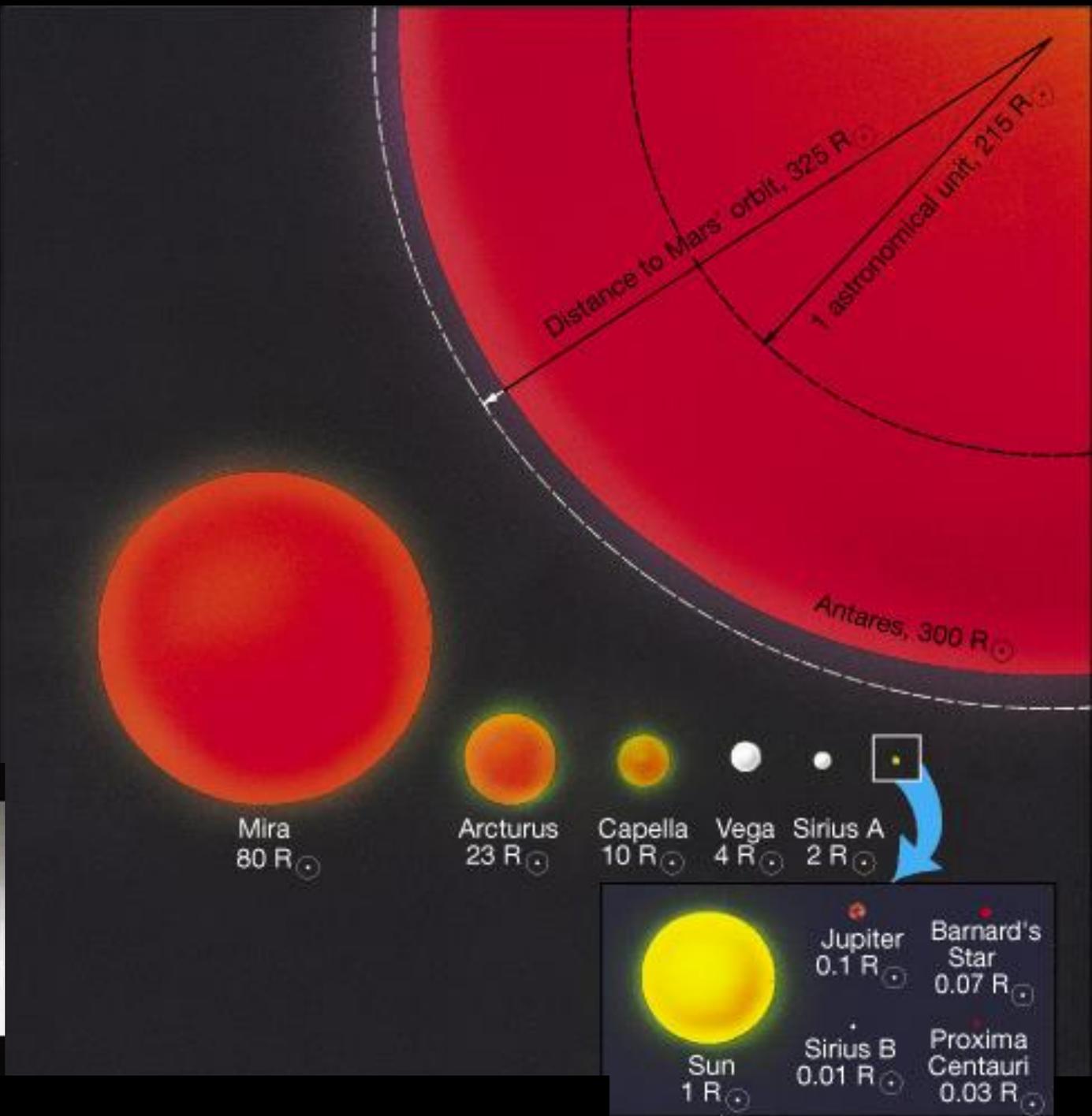
Estrelas variam de tamanho de acordo com a sua massa e seu estágio evolutivo.

Anã branca: raio comparável ao da Terra

Anã: $0,1 R_{\odot} < R < 10-20 R_{\odot}$

Gigante: $10 R_{\odot} < R < 100 R_{\odot}$

Supergigante $100 R_{\odot} < R < 1000 R_{\odot}$



Medindo o tamanho

Relembrando que :

$F(\text{energia}/\text{t}/\text{área}) \propto \text{Temperatura}^4$ (lei de Stefan–Boltzmann)

Sabendo que a luminosidade é o fluxo $F(\text{raio})$ multiplicado pela área da superfície da estrela (raio^2)

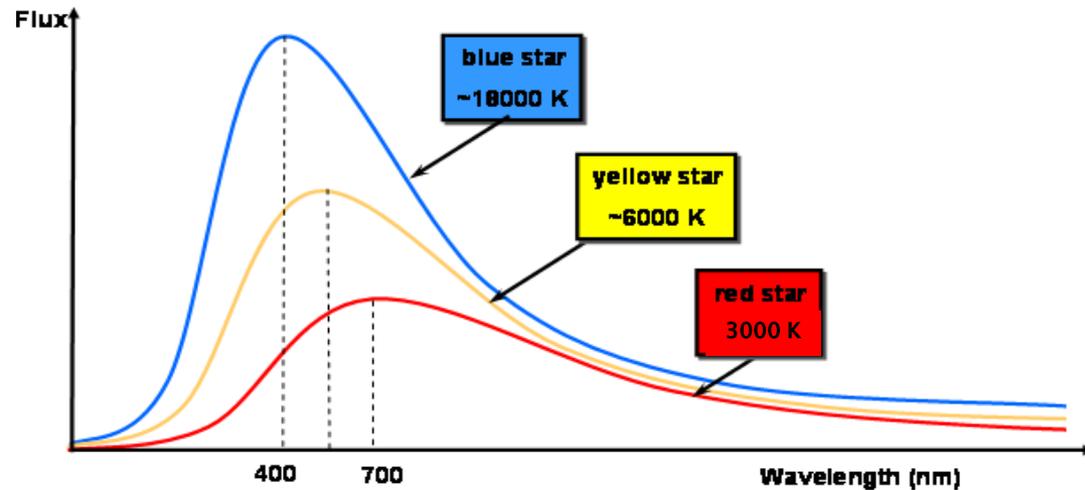
$$\text{Luminosidade} \propto \text{raio}^2 \times \text{temperatura}^4$$

Sabendo a luminosidade e a temperatura efetiva da estrela, pode-se estimar o seu tamanho.

Algumas estrelas mais próximas: medida do raio através de interferometria (alta resolução), como por exemplo Vega (o zero de magnitude).

AS CORES E A CLASSIFICAÇÃO ESPECTRAL DAS ESTRELAS

Como foi visto, a cor de uma estrela está associada com a sua temperatura superficial (lembrar do corpo negro).



T superficial (K)	Tipo Espectral	Cor	Exemplo
30.000	O	azul-violeta	δ Orionis (uma das 3 Marias)
20.000	B	azul	Rigel (β Orionis)
10.000	A	Branca	Vega, Sirius
7000	F	Branco-amarela	Canopus
6000	G	Amarela	Sol, α Centauri
4000	K	Laranja	Arcturus, Aldebaran
3000	M	Vermelha	Betelgeuse, Próxima Cen

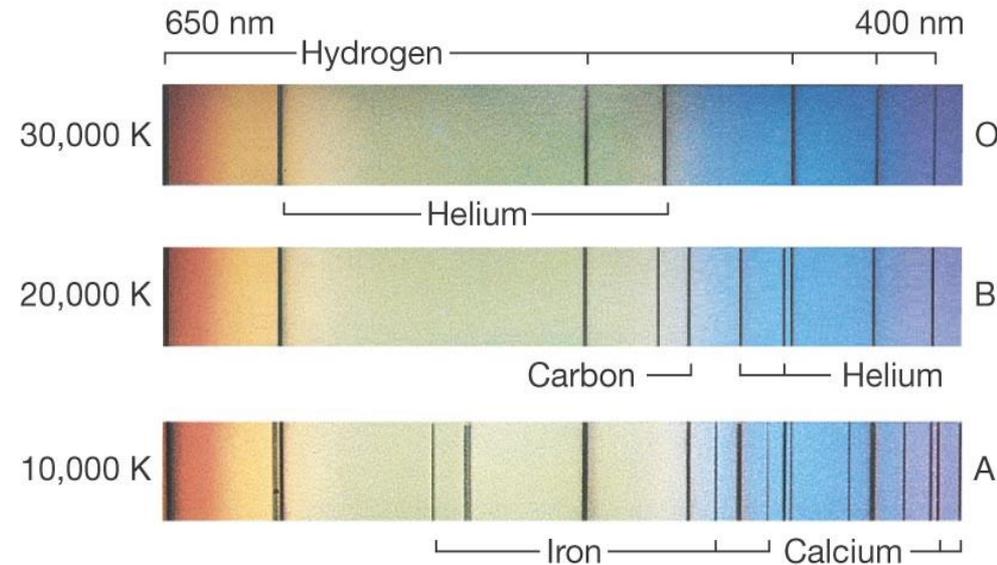
O tipo espectral também está associado com os tipos de linhas espectrais predominantes

Linhas de absorção

T=30.000K Linhas fortes de HeII, elementos + pesados multiplamente ionizados (O, N, Si), HI fraco (*não é falta de H [o mais abundante em qualquer estrela]* e sim pq quase todo o H está ionizado (HII) por causa da alta T)

T=20.000K HeI moderado, elementos mais pesados 1 vez ionizados, HI moderado

T=10.000K HI forte (série de Balmer : 2º e mais altos orbitais), HeI muito fraco (necessita de mais energia para excitar), presença de elementos mais pesados 1 vez ionizados (CaII, TiII)



Notação, ex: HeII = hélio 1 vez ionizado
HII = hidrogênio ionizado
HeI e HI = hélio e hidrogênio neutros

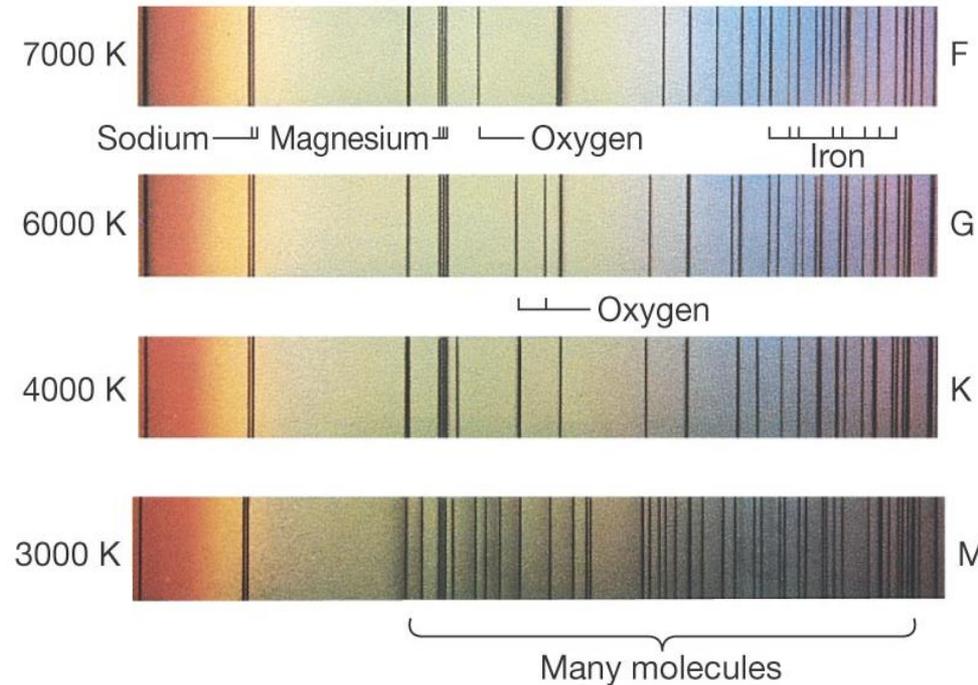
Linhas de absorção

T=7000 K presença de elementos mais pesados 1 vez ionizados, metais neutros, HI moderado

T=6000 K Elementos mais pesados 1 vez ionizados, metais neutros, HI relativamente fraco

T=4000K Elementos mais pesados 1 vez ionizados, metais neutros (forte), HI fraco (energia não é suficiente para excitar os elétrons para além do estado fundamental)

T=3000K metais neutros (forte), moléculas (moderado), HI muito fraco



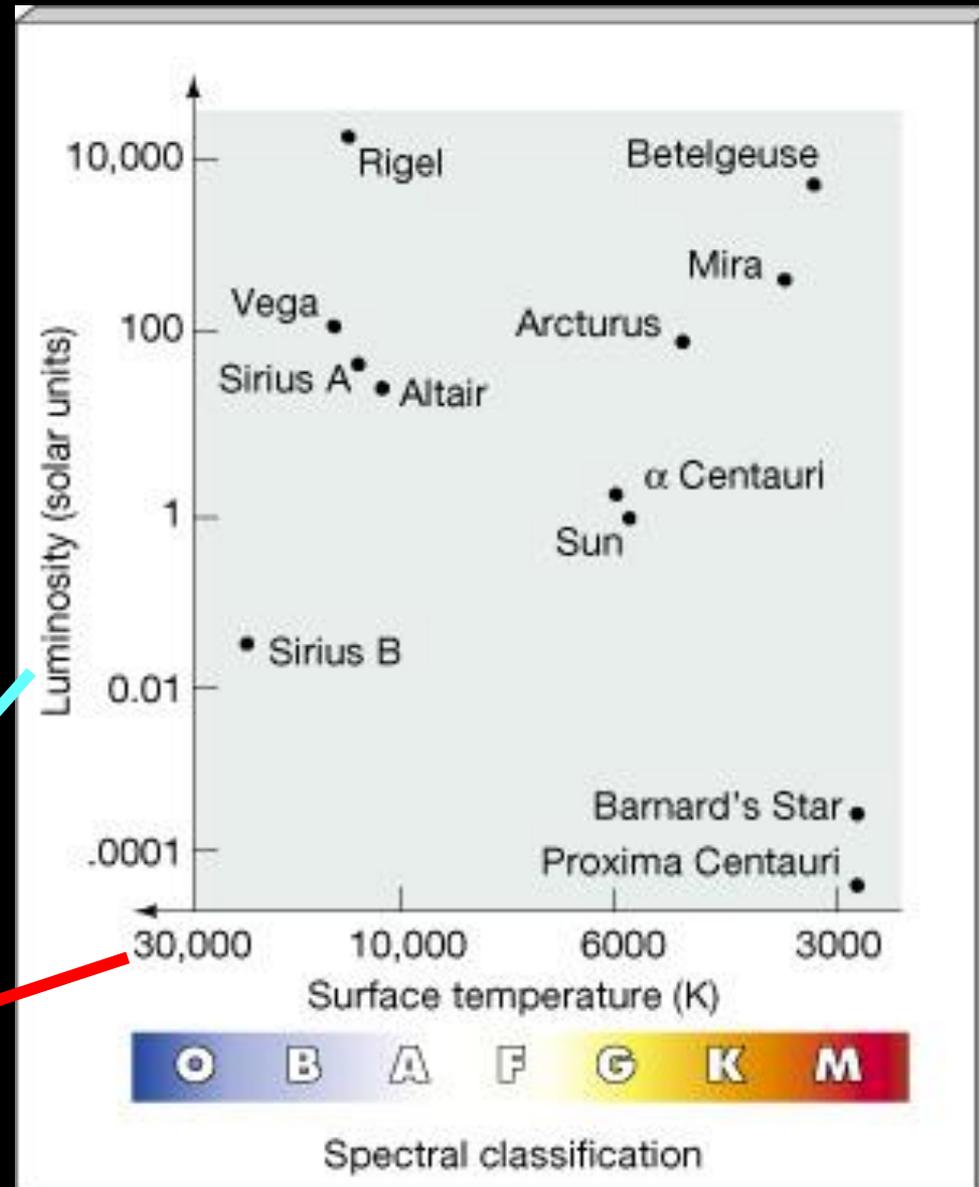
O DIAGRAMA HERTZSPRUNG-RUSSEL

Astrônomos usam [luminosidade ou mag. Absoluta] e [temperatura superficial ou tipo espectral] para classificar estrelas

Diagrama HR das estrelas

Escala de luminosidade solar $L_{\odot} = 3.9 \times 10^{26} \text{ W}$

Escala decrescente em T



O DIAGRAMA HR

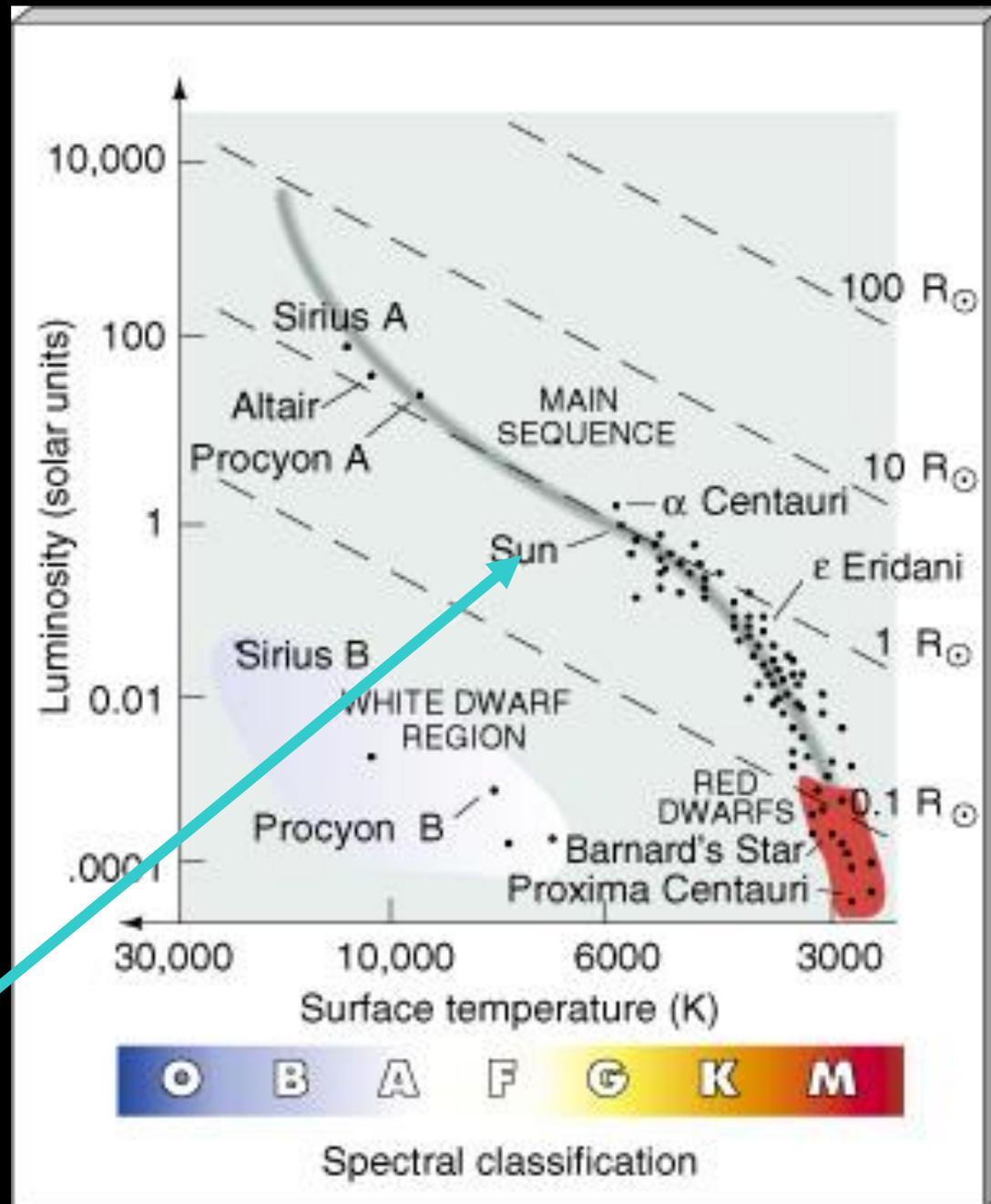
Plotando mais estrelas no diagrama HR

Diagrama HR de estrelas próximas (5 pc do Sol)

A maioria das estrelas se localizam em regiões bem definidas no diagrama: estrelas de mais baixa T tendem a ser mais fracas em brilho e estrelas de mais alta T tendem a ser mais fortes em brilho



SEQUÊNCIA PRINCIPAL



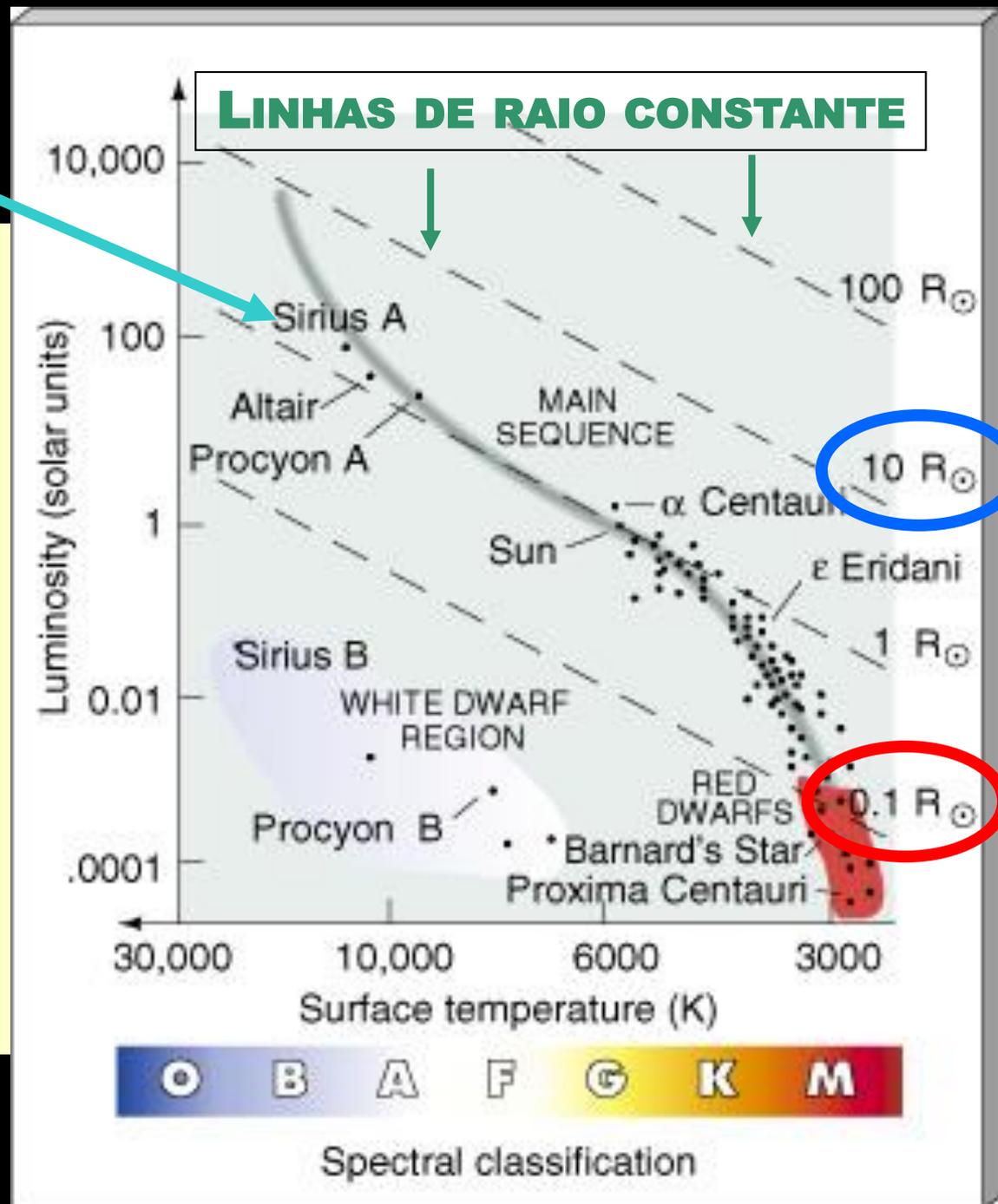
O DIAGRAMA HR

SEQUÊNCIA PRINCIPAL

Usando a relação entre L-T-R nota-se que o tamanho das estrelas varia ao longo da sequência principal.

- As estrelas tipo M menos brilhantes tem somente 1/10 do raio do Sol.
- As de tipo O e B mais brilhantes podem ter tamanho de 10 vezes o raio do Sol

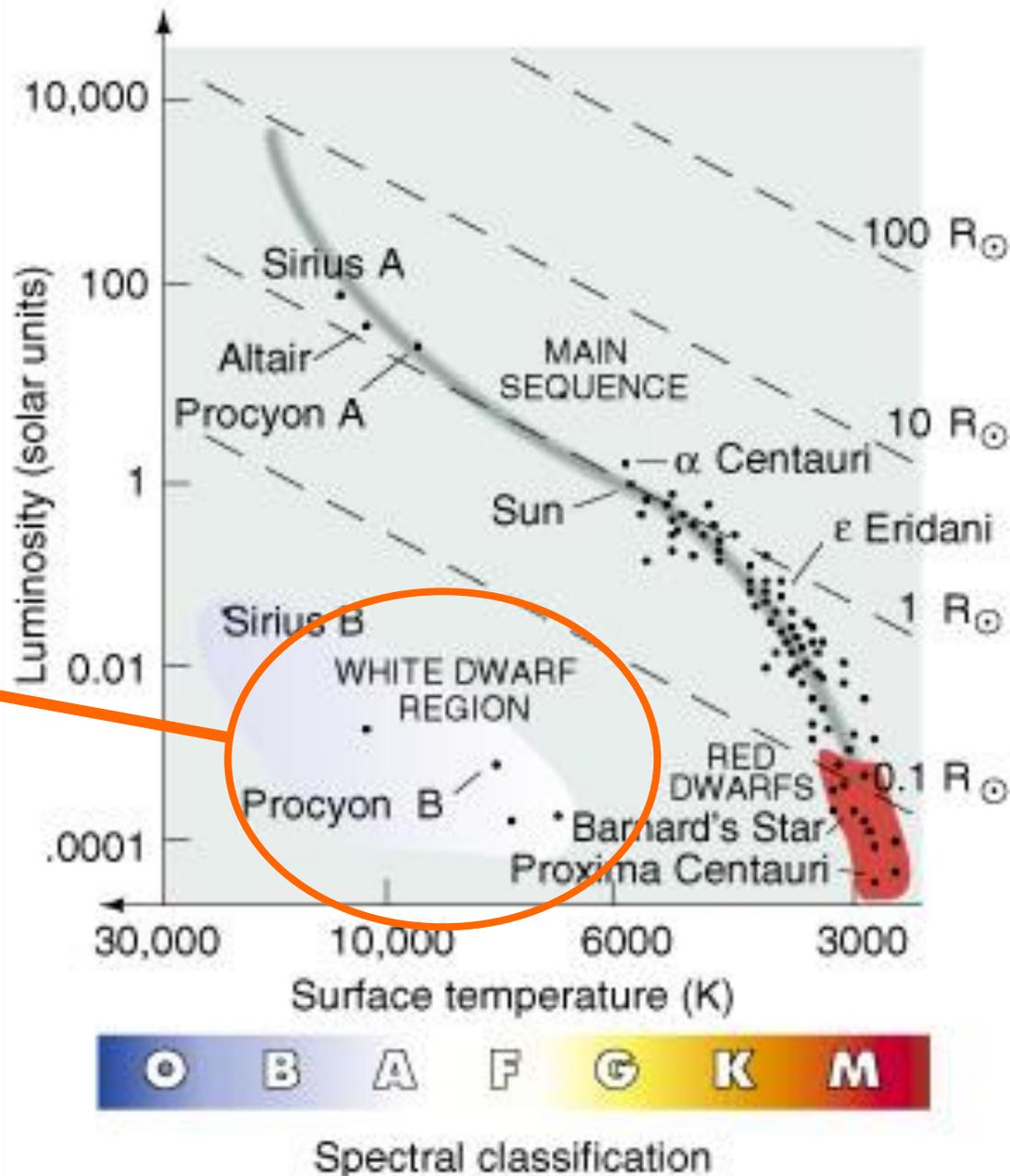
Região das ANÃS



O DIAGRAMA HR

Região das
anãs brancas

Não estão na
sequência principal!



O DIAGRAMA HR

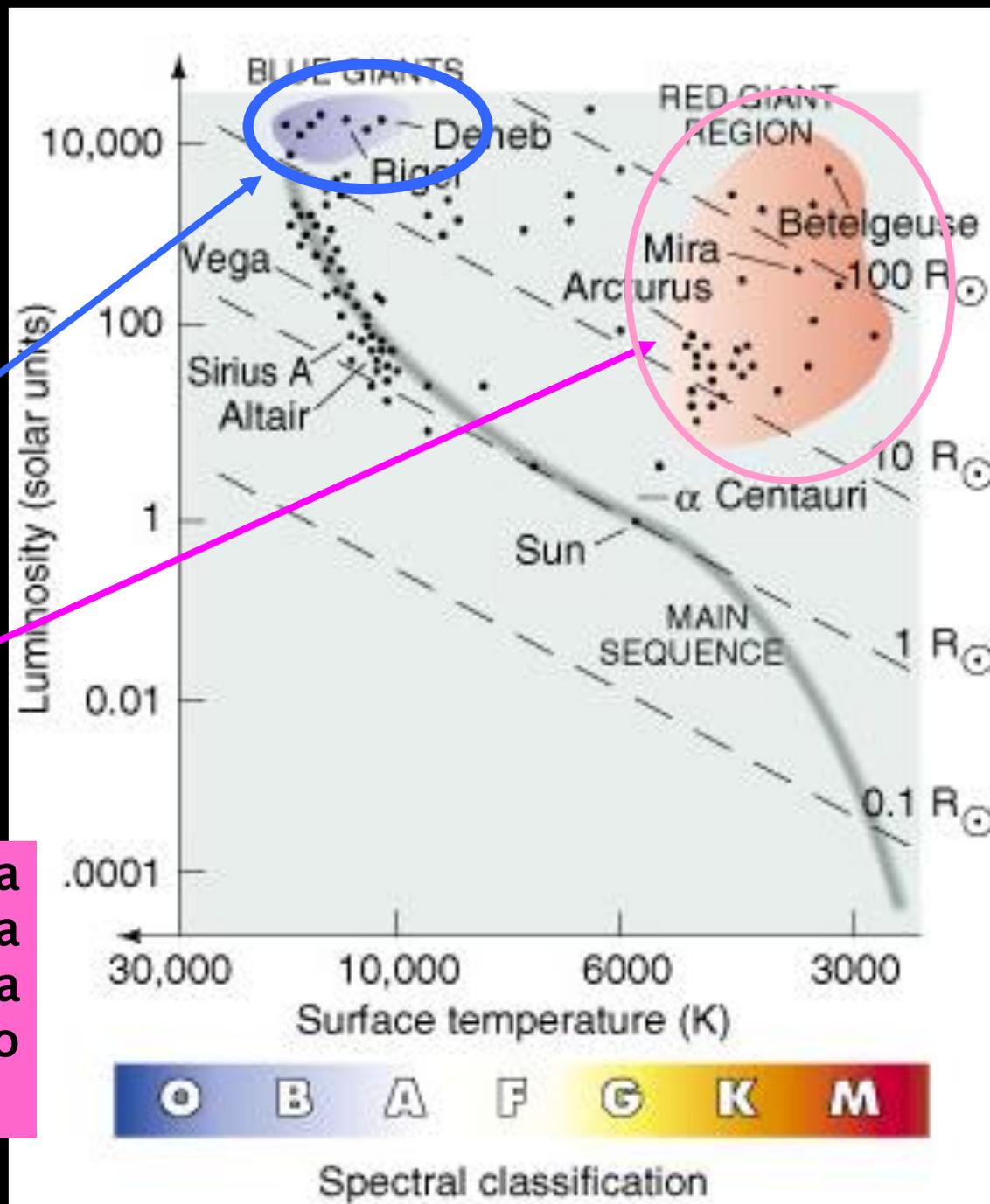
Plot de estrelas mais brilhantes

Não estão na seqüência principal:

Região das gigantes azuis

Região das gigantes vermelhas

A maior parte das estrelas da nossa galáxia está na seqüência principal (uma estrela passa o maior tempo de sua vida na SP).



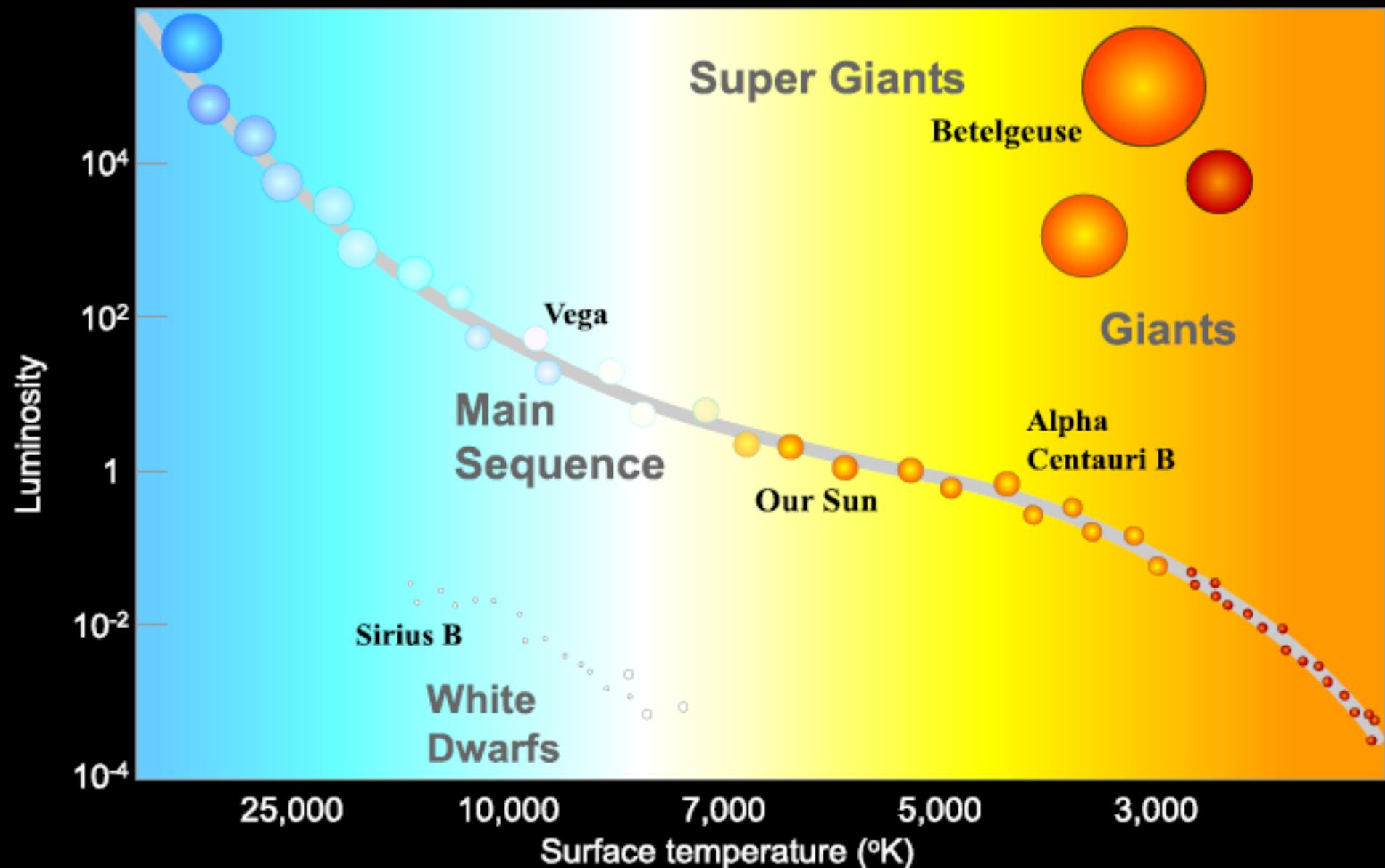
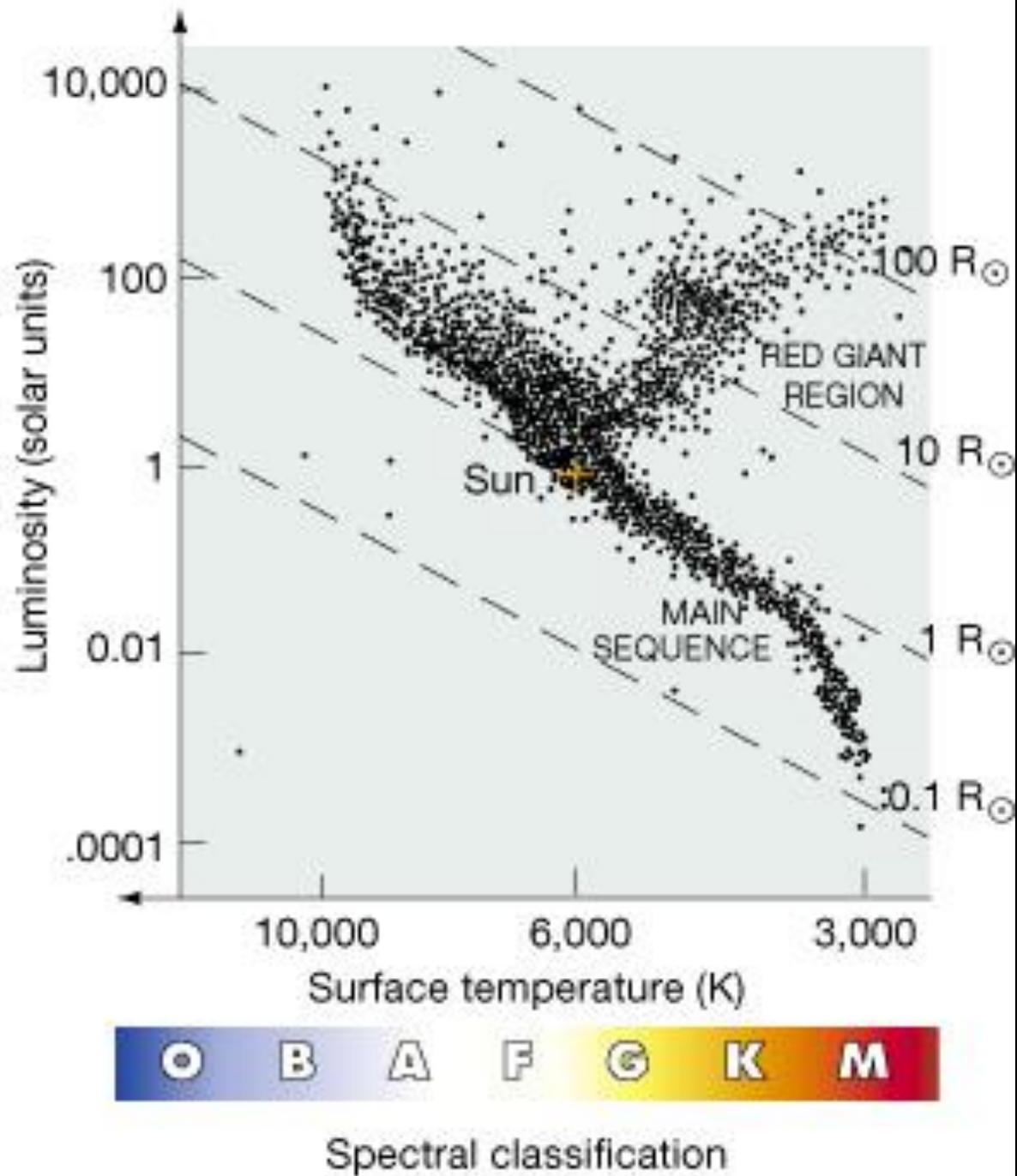
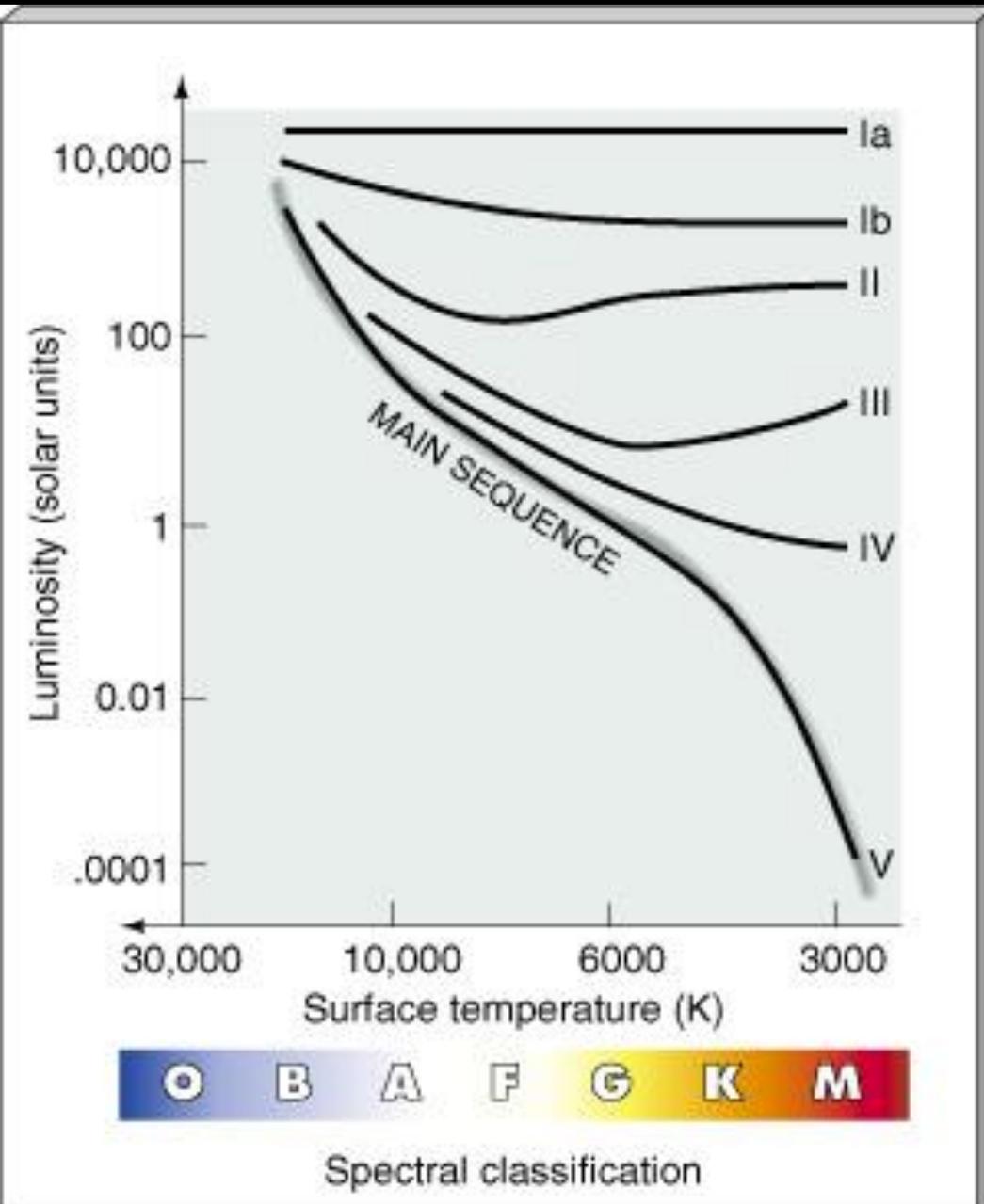


Diagrama resultante das medidas do Hipparcos \Rightarrow 20.000 estrelas na faixa de distância de 1000 pc



CLASSE DE LUMINOSIDADE



CLASSE	ESTRELAS
Ia	Supergigantes brilhantes
Ib	Supergigantes
II	Gigantes brilhantes
III	Gigantes
IV	Subgigantes
V	Anãs (seqüência principal)

CLASSE DE LUMINOSIDADE

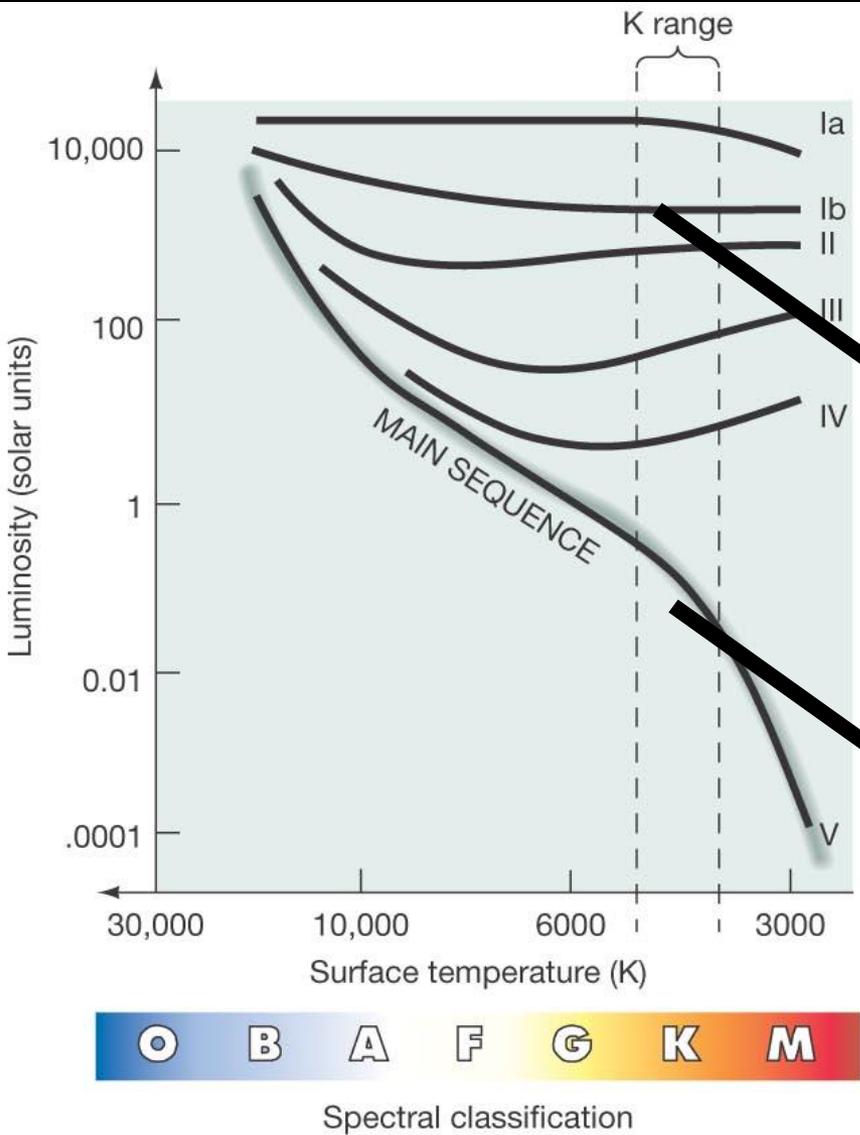
CLASSE	ESTRELAS
Ia	Supergigantes brilhantes
Ib	Supergigantes
II	Gigantes brilhantes
III	Gigantes
IV	Subgigantes
V	Anãs (seqüência principal)

Classe de luminosidade é estimada através do espectro das estrelas.

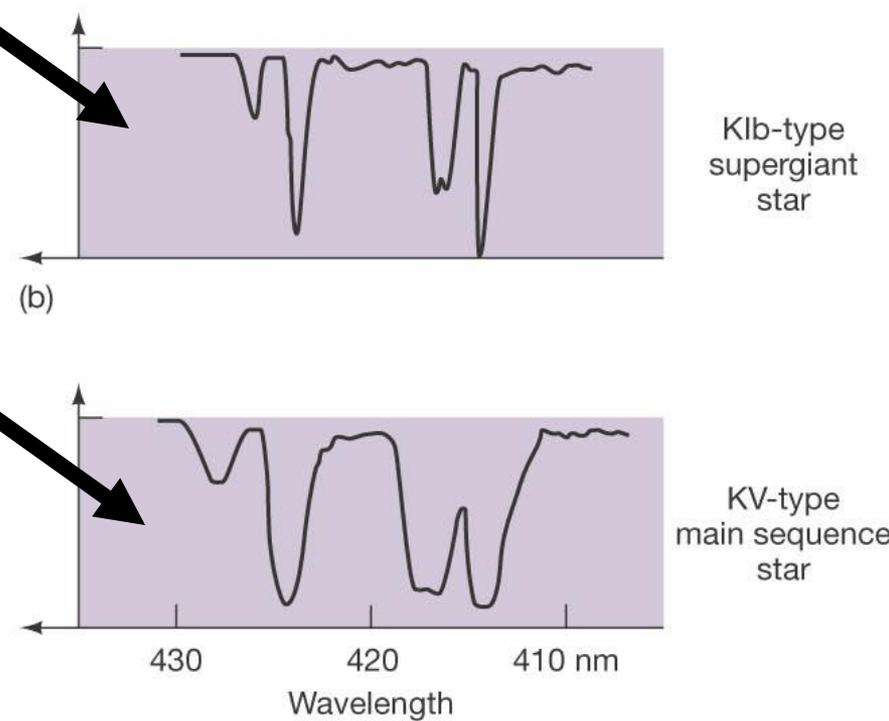
As linhas de um espectro de absorção podem variar não só as suas intensidades, mas também as suas larguras A largura dá informação sobre a densidade da fotosfera da estrela

A fotosfera de uma gigante é menos densa (linhas + estreitas) do que a fotosfera de uma estrela anã, que por sua vez é menos densa do que a de uma anã branca (linhas + largas).

Pode-se então definir uma estrela pelo tipo espectral e classe de luminosidade



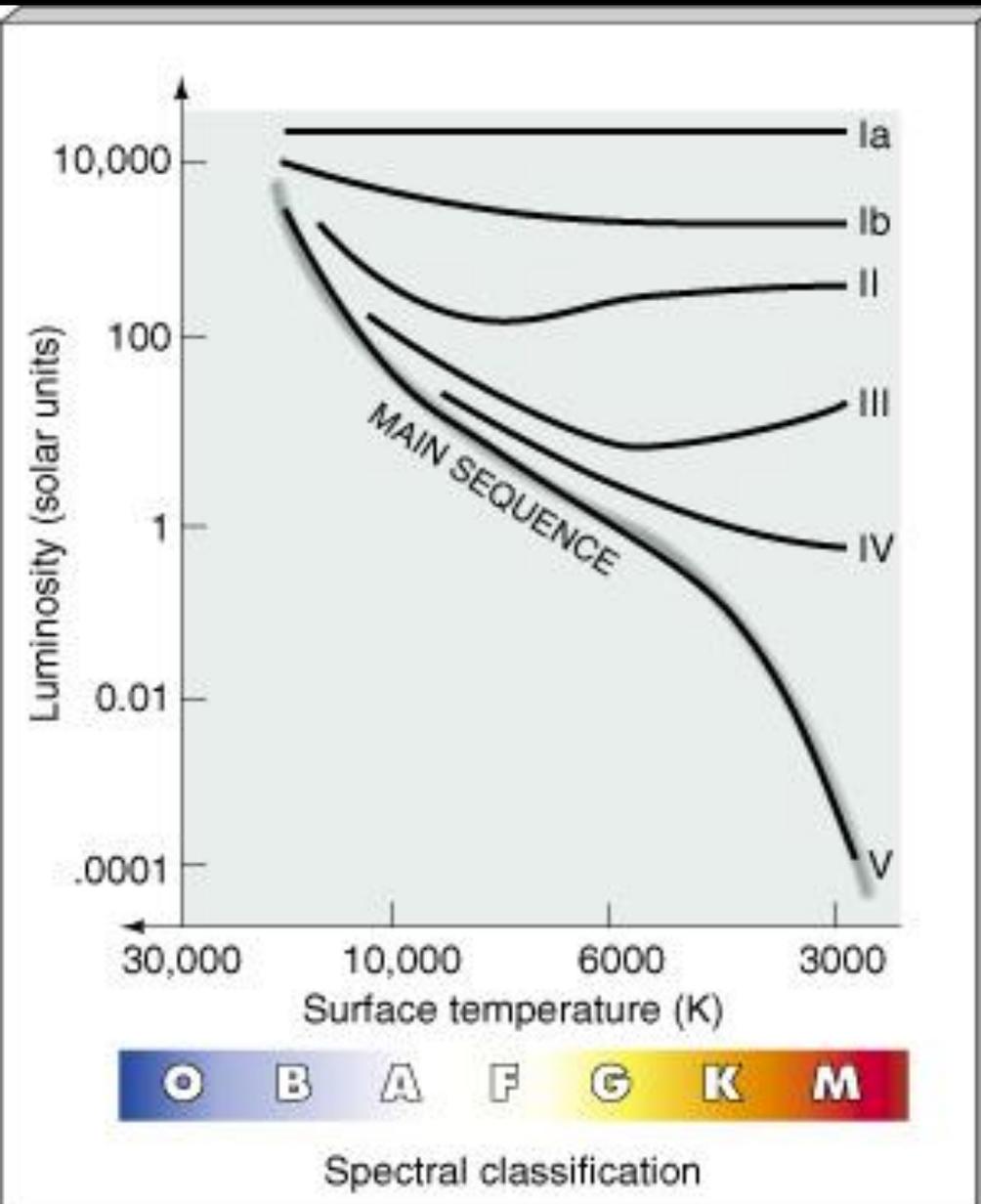
Linhas de Ca e Fe



(a)

(c)

DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIA POR PARALAXE ESPECTROSCÓPICA



Através do espectro ou cor de uma ★



- T superficial ou tipo espectral
- classe de luminosidade

Se tipo espectral = V :
uma T corresponde a uma L

tendo-se L calcula-se M :
 $M = M_{\odot} - 2.5 \log(L/L_{\odot})$

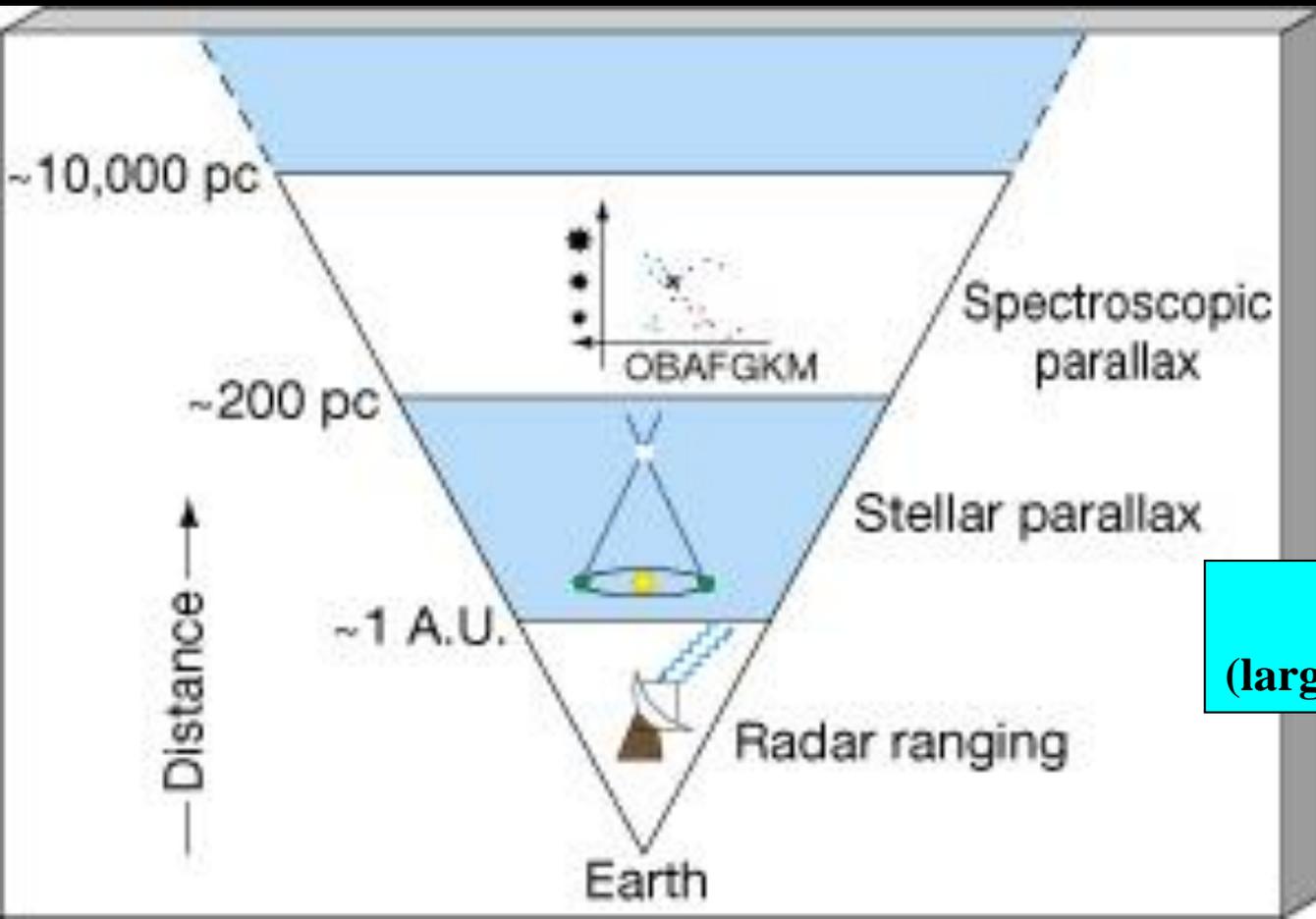


medindo-se m obtêm-se D
pelo módulo de distância

$$m - M = 5 \log D - 5$$

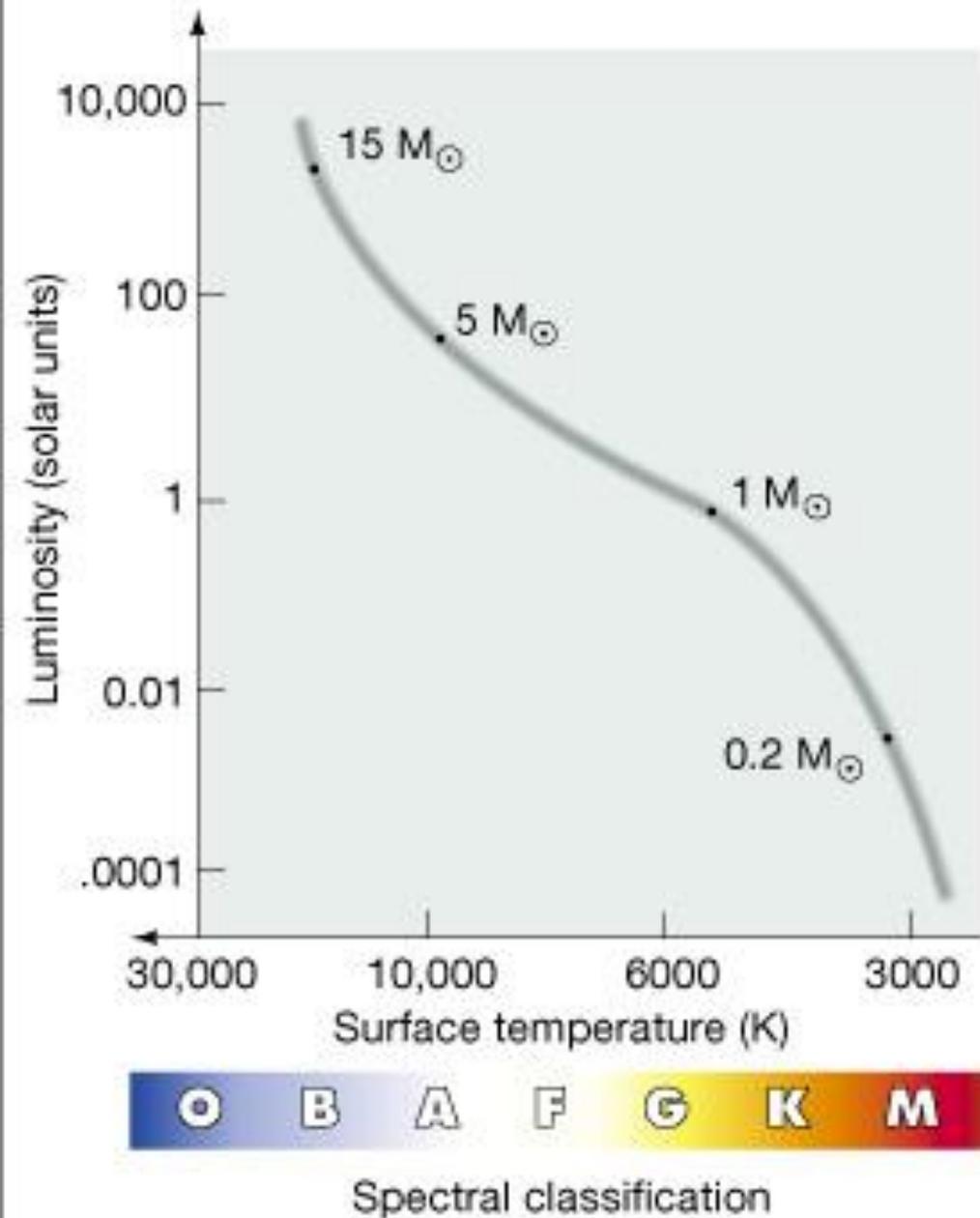
a determinação de distância....

Lembrete: diagrama HR construído com estrelas mais próximas com D conhecidas por paralaxe geométrica

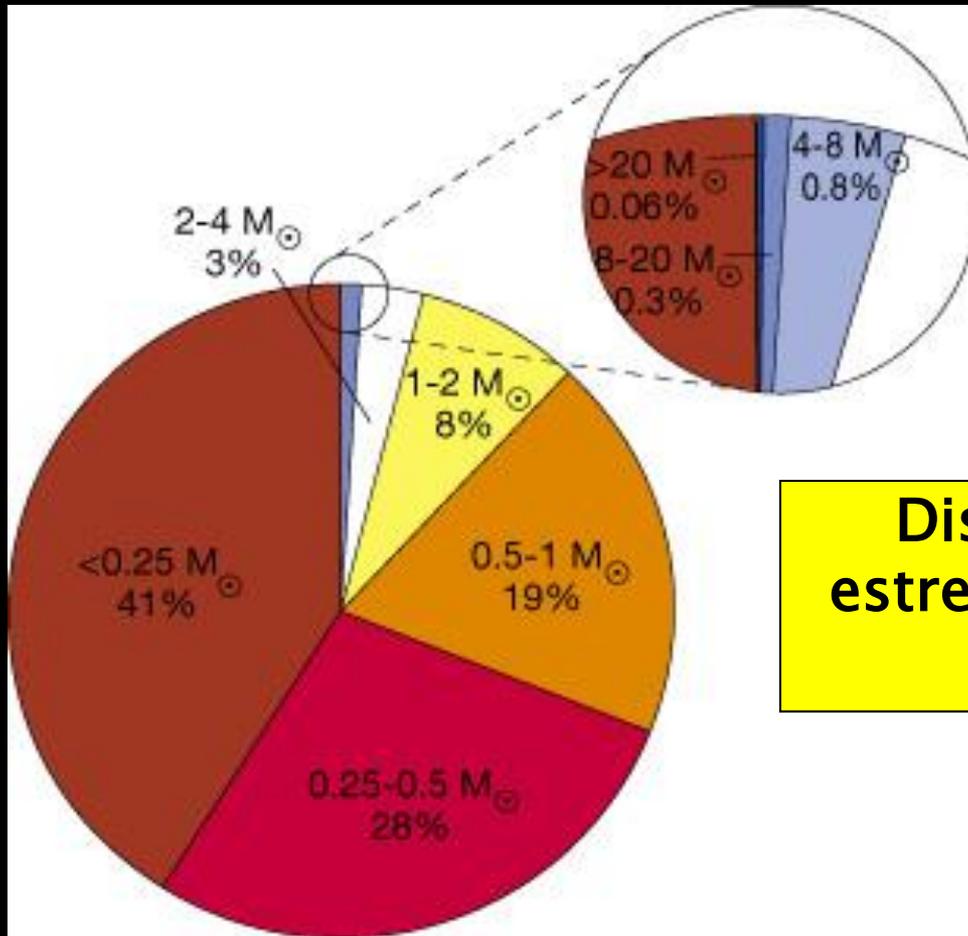


**25% de incerteza
(largura da sequência principal)**

MASSA

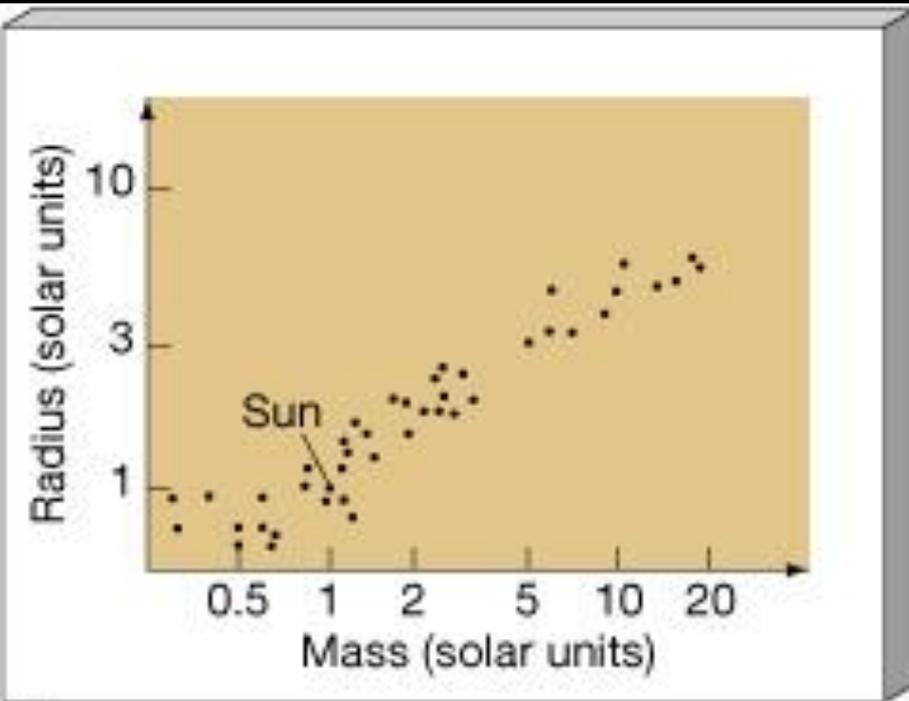


O que determina a posição de uma estrela na sequência principal do diagrama HR?
R. sua massa



Distribuição de massa das estrelas de sequência principal na vizinhança do Sol

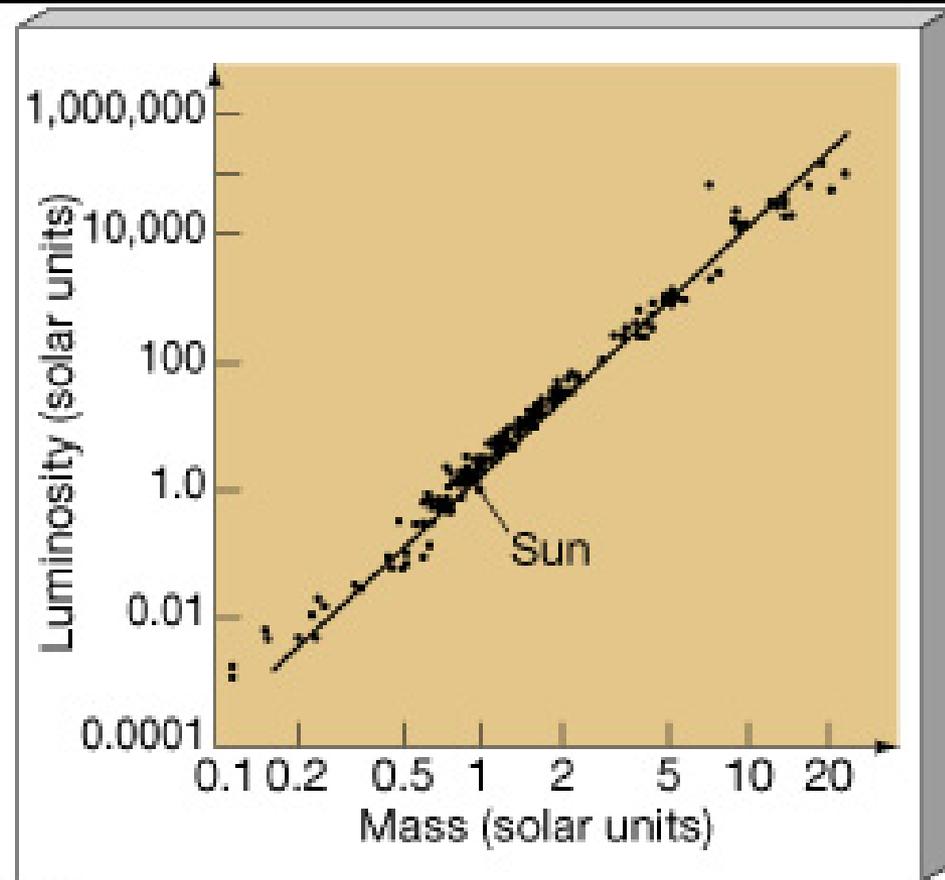
RELAÇÕES PARA ESTRELAS NA SEQUÊNCIA PRINCIPAL



(a)

Quanto maior a massa,
maior o raio

raio \propto massa



(b)

Quanto maior a massa,
maior a luminosidade

luminosidade \propto massa⁴

TEMPO DE VIDA NA SEQUÊNCIA PRINCIPAL

Pode-se estimar o tempo de vida de uma estrela dividindo a quantidade de combustível disponível (que é a massa da estrela) pela taxa na qual o combustível está sendo consumido (que é a luminosidade da estrela), ou seja:

$$\textit{tempo de vida} \propto \frac{\textit{massa}}{\textit{luminosidade}}$$

Sabendo que luminosidade \propto massa⁴

$$\textit{tempo de vida} \propto \frac{1}{\textit{massa}^3}$$

Quanto maior a massa, menor o tempo de vida de uma estrela

TEMPO DE VIDA NA SEQUÊNCIA PRINCIPAL

Qual o tempo de vida estimado de uma estrela de $5M_{\odot}$?

$$\textit{tempo de vida} \propto \frac{1}{\textit{massa}^3}$$

$$\frac{t}{t_{\odot}} = \frac{M_{\odot}^3}{M^3}$$

Sabendo que o Sol tem um tempo de vida de 10 bilhões de anos
(ele se formou a 4,5 bilhões de anos)

$$t = (10^{10} \textit{ anos}) \frac{M_{\odot}^3}{(5M_{\odot})^3} \approx 800 \textit{ milhões de anos}$$