



Universidade Federal do ABC

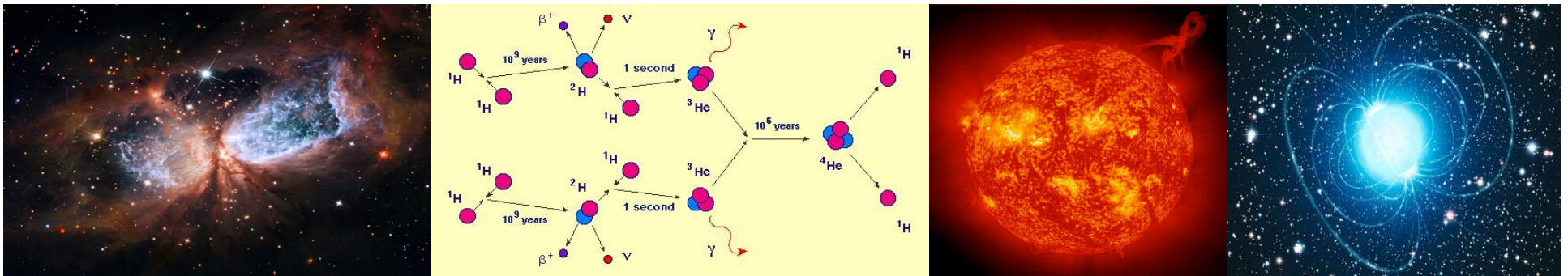
Introdução à Física Estelar

12. Aglomerados Estelares e Estrelas Variáveis

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Estelar.html>



Aglomerados Estelares

São conjuntos de estrelas **formadas juntas** no **colapso** de uma **nuvem de gás**, que se fragmentou (=> aula Formação).

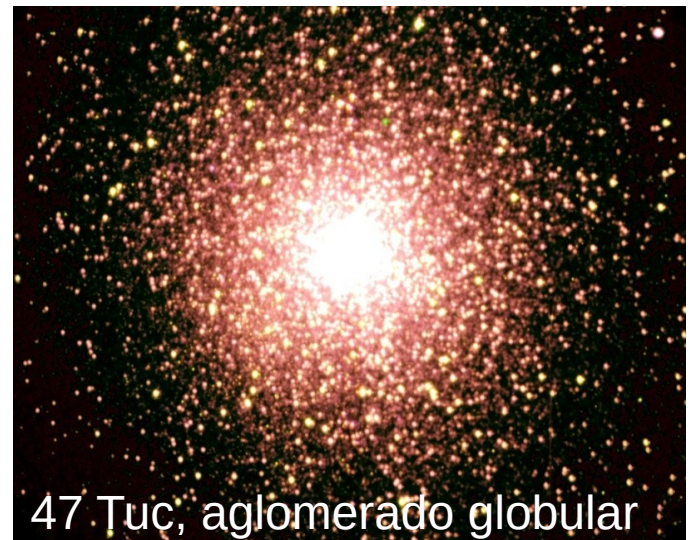
Por isto, todas as estrelas têm a **mesma idade** e a **mesma composição química**.

Na **Via Láctea**, distinguimos entre dois tipos, os

Aglomerados Abertos (\leq algumas milhares de estrelas, poucos pc de diâmetro, forma irregular) e **Aglomerados Globulares** (\sim algumas 100 000 estrelas, 50 - 100 pc, forma esférica).



Pleiades, aglomerado aberto



47 Tuc, aglomerado globular

Populações Estelares

Para entender mais sobre os dois tipos de aglomerados, é útil introduzir o conceito de

Populações Estelares, termo inventado por **Walter Baade**.

Em 1944, usando o Telescópio de 2.5 m de Mt. Wilson, ele observou a nossa **Galáxia** e a de **Andrômeda** (M 31), e identificou **duas** “**populações**” estelares.



Galáxia de Andrômeda

Populações Estelares

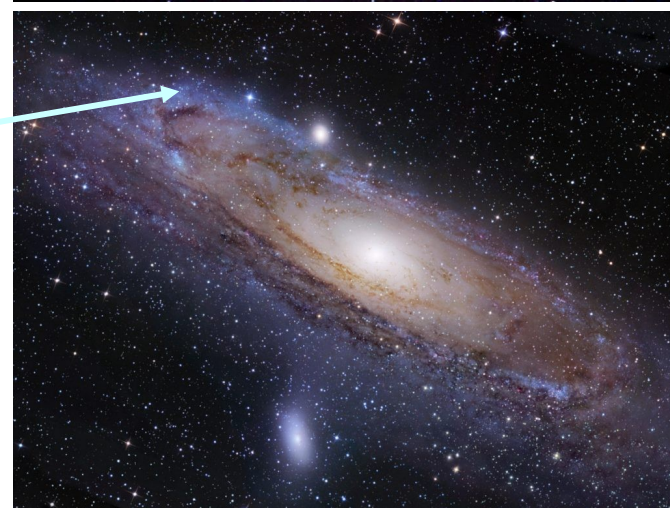
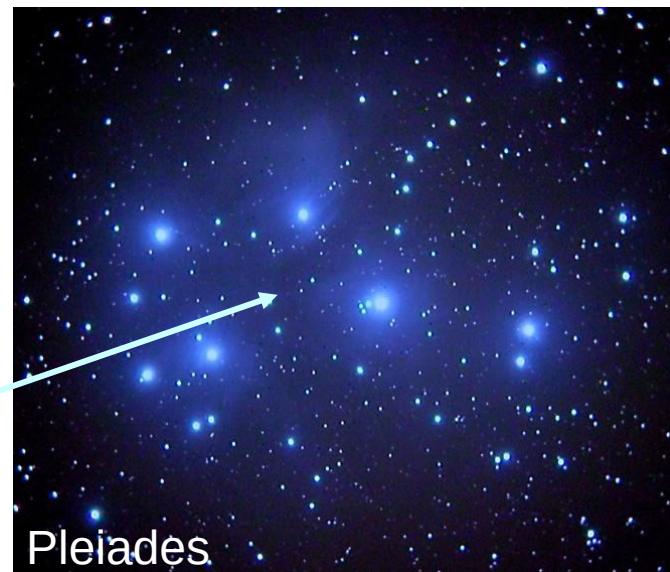
Ele chamou de **População I** estrelas típicas para a **vizinhança solar** (estrelas "normais"):

Estrelas **OB azuis**, **Novas**, **Nebolusas Planetárias**.

Estas também se encontram em **Aglomerados Abertas**,
no **Meio Interestelar**

e nos **Braços Espirais** de M 31:

Estrelas de **alta metalicidade**
($Z > \sim 0.003$, resp. $[Fe/H] > \sim -0.7$)
e frequentemente **jovens**.



Populações Estelares

Ele batizou como **População II**:

Na **Via Láctea**, as

“**estrelas de alta velocidade**” (Halo)

Aglomerados Globulares:

Gigantes Vermelhas, RR Lyras,

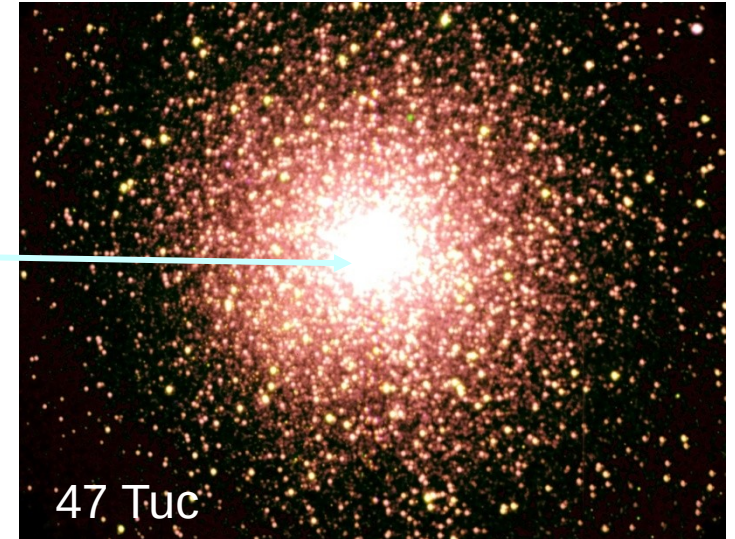
Sub-Anãs;

e **fora da VL** no **Bojo** de M 31,

em **M 32**, e em **NGC 205**:

Estrelas **velhas** de **baixa metalicidade** ($Z < \sim 0.003$, $[Fe/H] < \sim -0.7$).

Deve ter existido a **População III** também, com $Z = 0$ ($[Fe/H] = “-\infty”$), que (ainda) não foi encontrada.



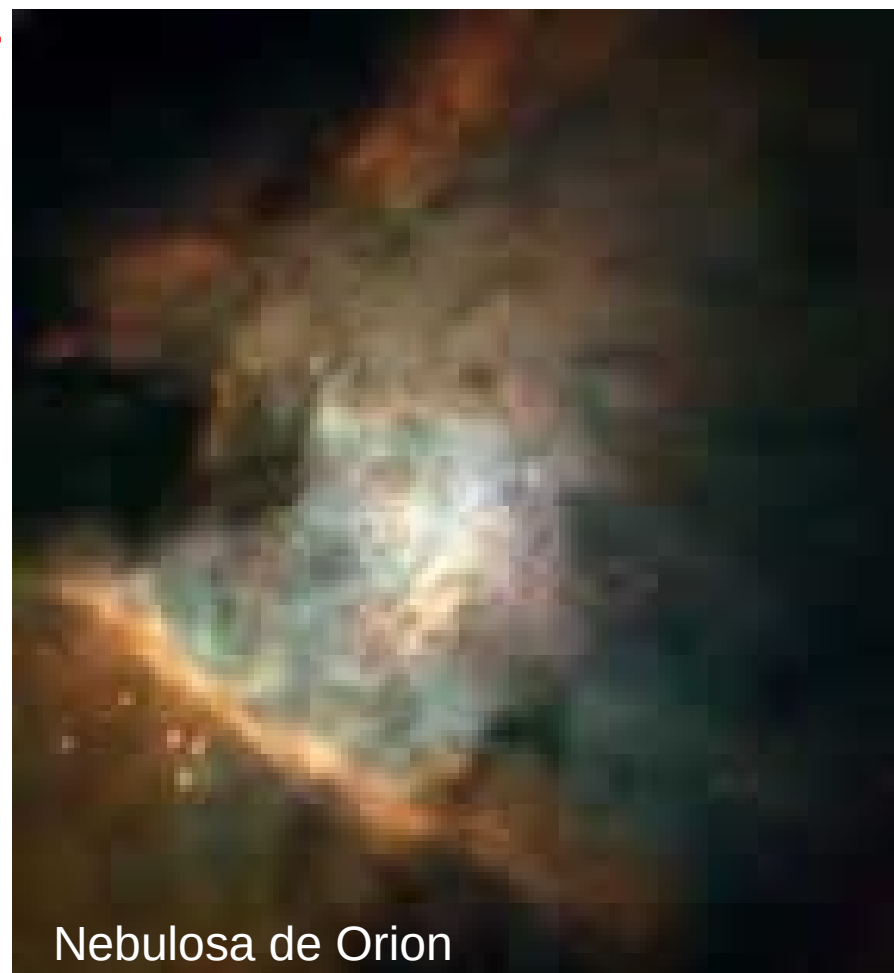
Populações Estelares

Hoje, o termo **População Estelar** é usado também para **conjuntos de estrelas** com **história de formação em comum**.

Uma **População Simples** (SSP, do inglês *Simple Stellar Population*) consiste de estrelas com

- **mesma idade**
- **mesma metalicidade**

=> **aglomerados estelares** são SSPs (aproximadamente)

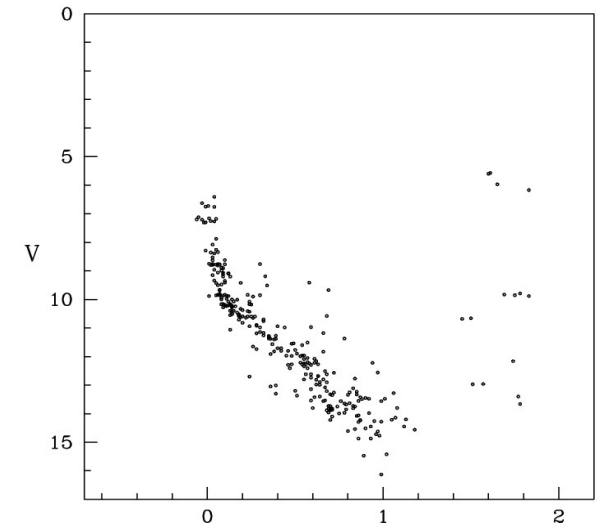


Nebulosa de Orion

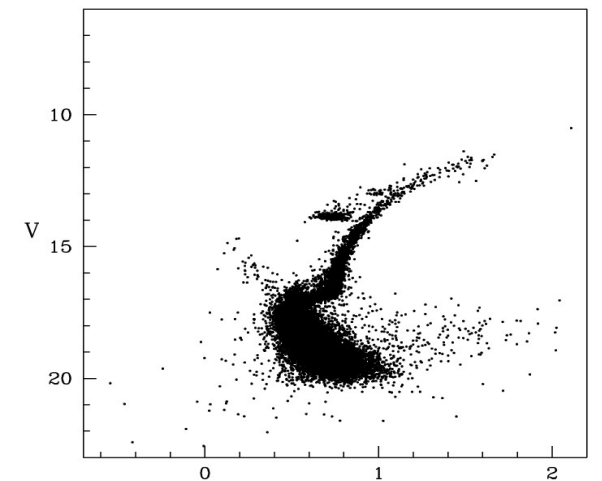
Aglomerados Estelares

O **diagrama Hertzsprung-Russell**, resp. o **diagrama cor-magnitude** de um **aglomerado** pode nos dar informação sobre a **idade** e, a segunda vista, sobre a **composição química** do aglomerado, e proporcionar testes à teoria de evolução estelar, já que:

- Estrelas de **massas diferentes** entram na **Sequência Principal** em **locais** e **tempos diferentes** (mas todas têm ~as mesmas idade e composição).
- Estrelas de **massas diferentes evoluem** em escalas de **tempo diferentes**.



CMD dos Pleiades



CMD de 47 Tuc

Aglomerados Estelares

A Evolução do diagrama HR de um Aglomerado

Após o colapso inicial da nuvem molecular, **estrelas de alta massa** chegam primeiro à **Sequência Principal**, evoluindo rapidamente.

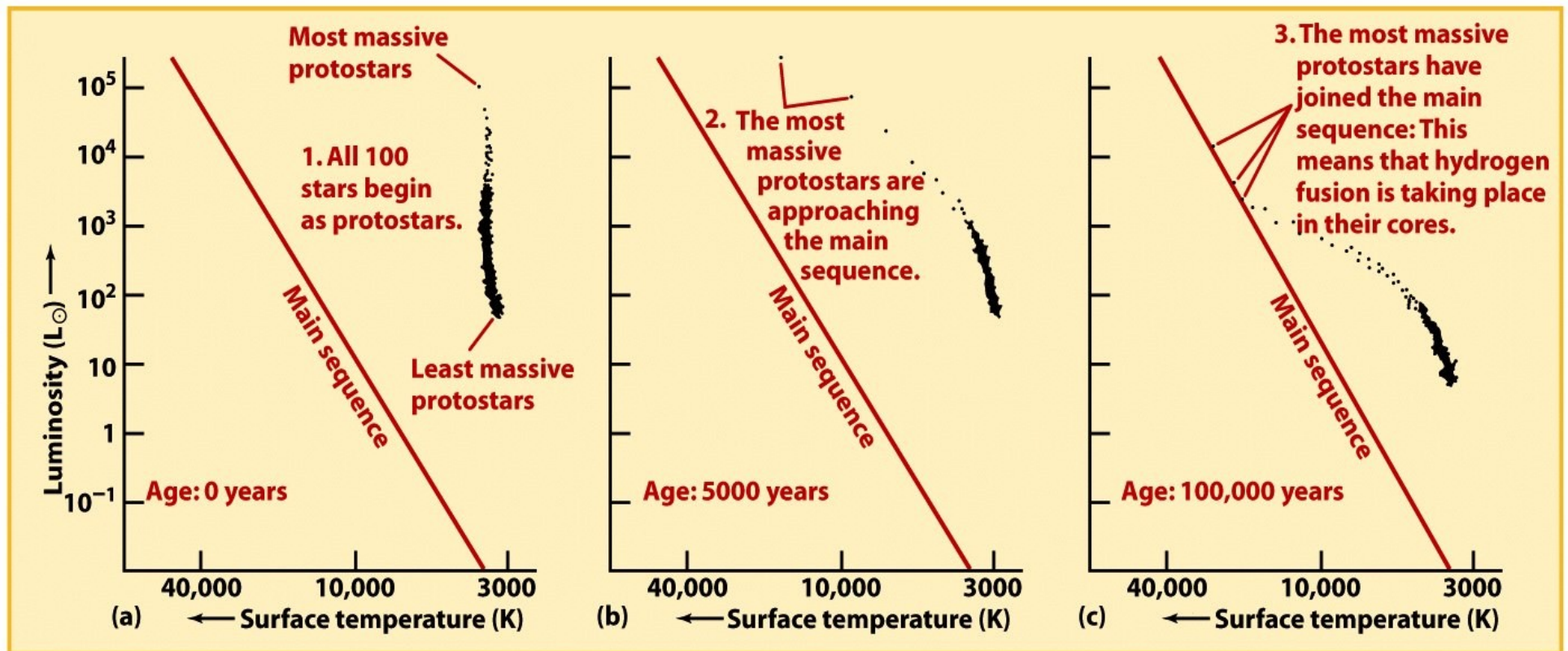


Figure 19-10 part 1

Universe, Eighth Edition

© 2008 W. H. Freeman and Company

Aglomerados Estelares

A Evolução do diagrama HR de um Aglomerado

A **Sequência Principal** vai se **enchendo** “de cima pra baixo”, e logo as **estrelas de massa mais alta já saem** da Sequência Principal para se tornarem **Gigantes Vermelhas**.

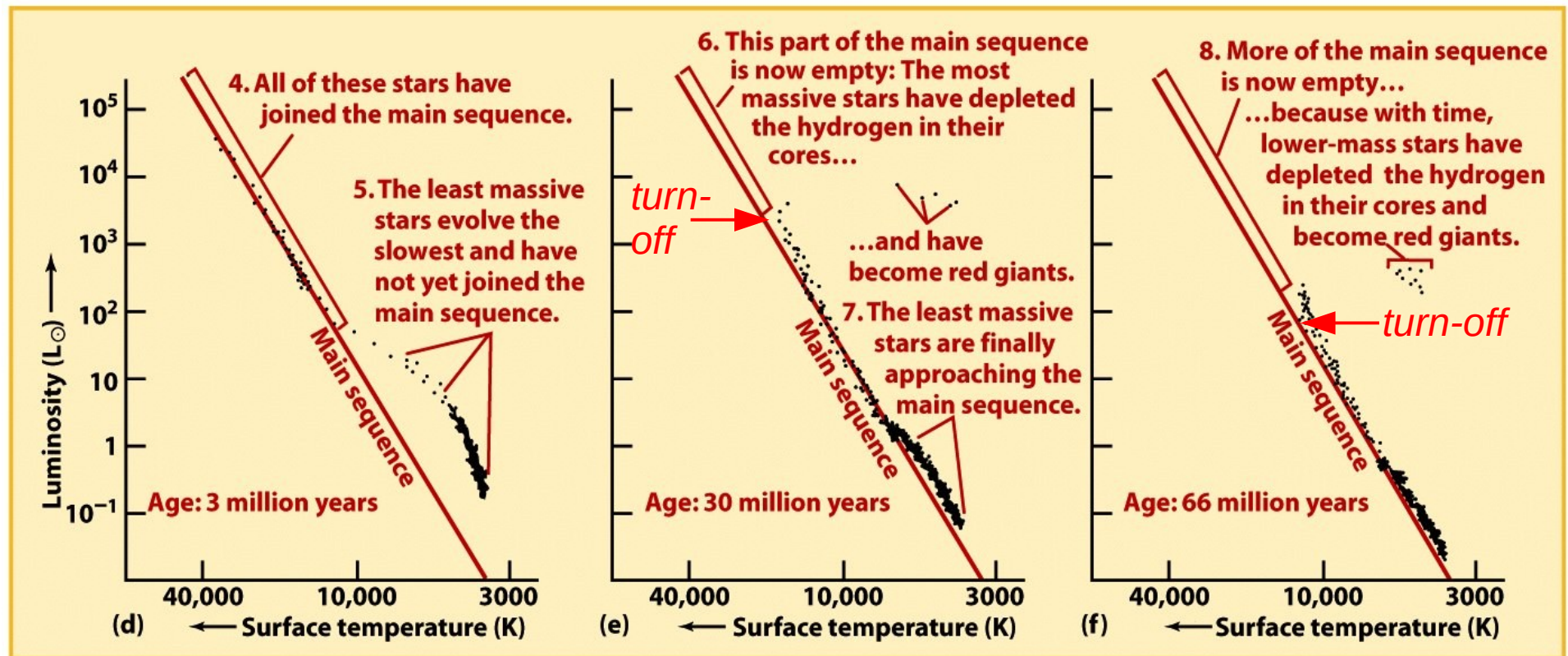


Figure 19-10 part 2

Universe, Eighth Edition

© 2008 W.H. Freeman and Company

Aglomerados Estelares

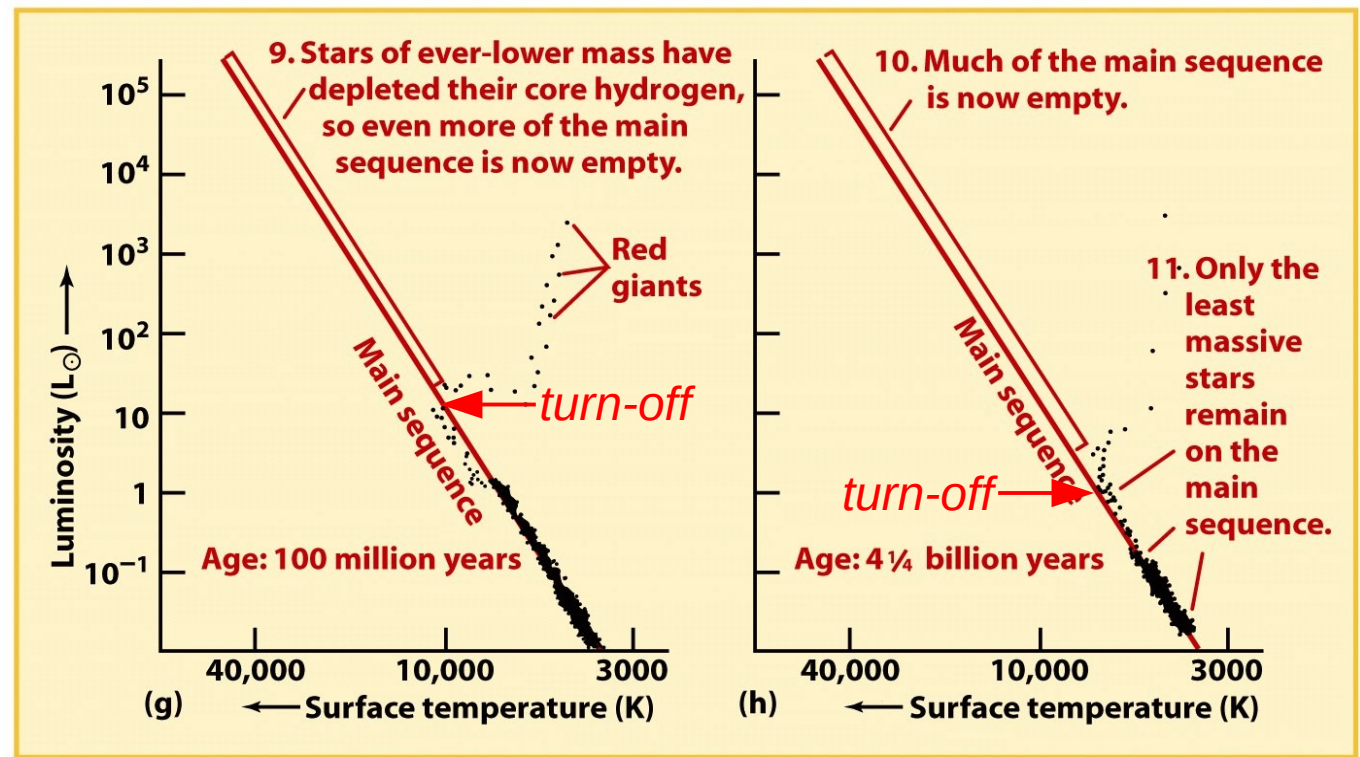
A Evolução do diagrama HR de um Aglomerado

Enquanto estrelas de **massas** cada vez **mais baixas** esgotam seu hidrogênio no núcleo, a **Sequência Principal** vai se **esvaziando** “de cima pra baixo”, e o ramo de **Gigantes Vermelhas** se **enchendo**.

O ponto, naquele as estrelas **começam a deixar a SP** é chamado **turn-off** e se **desloca pra baixo** com o tempo.

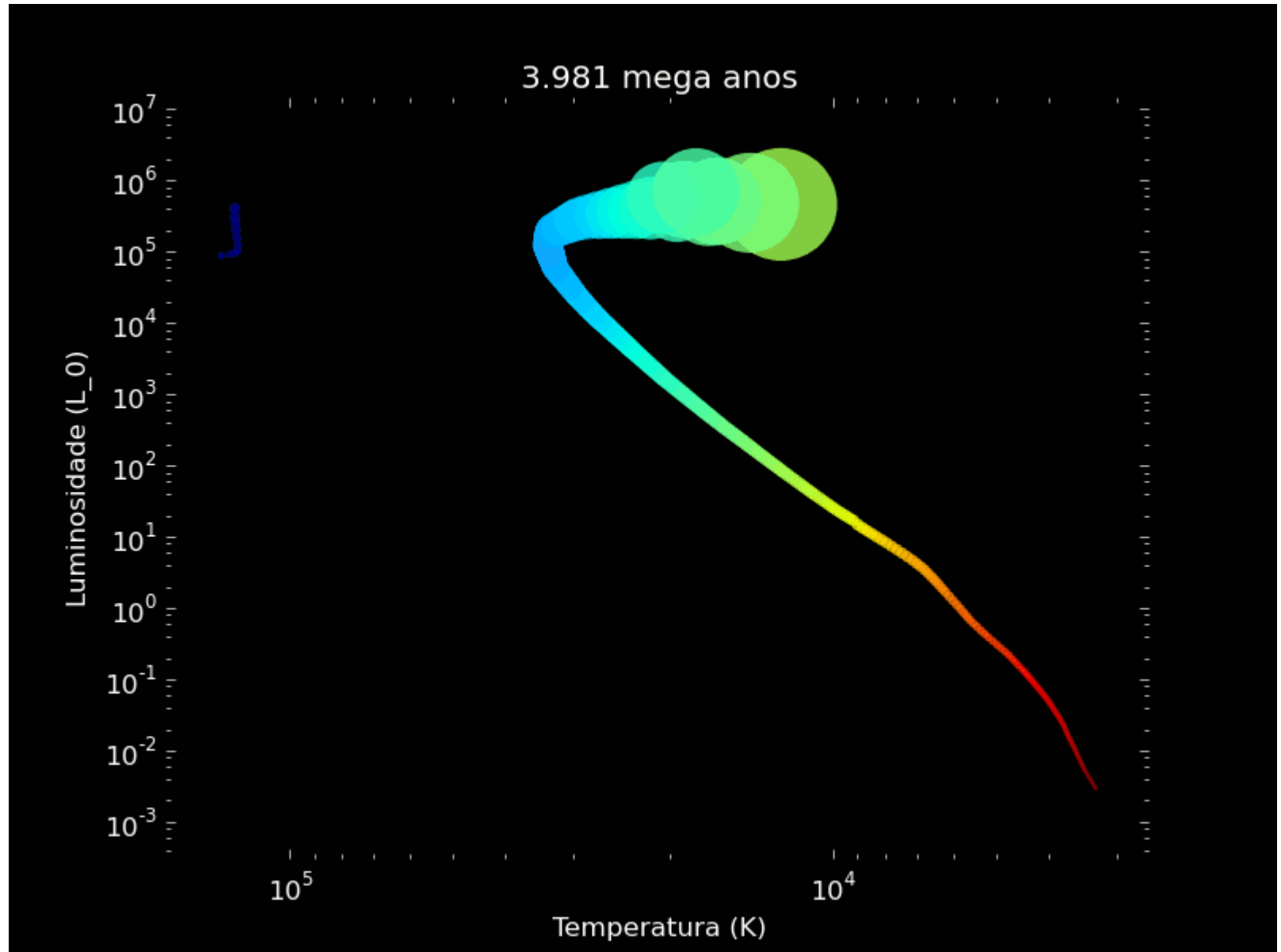
Os Ramos Horizontal e Assintótico

com o tempo também se enchem (não mostrado aqui)



Aglomerados Estelares

Animação da evolução do diagrama HR de um aglomerado estelar pelo aluno da UFABC **Arthur Julião** num projeto dirigido.

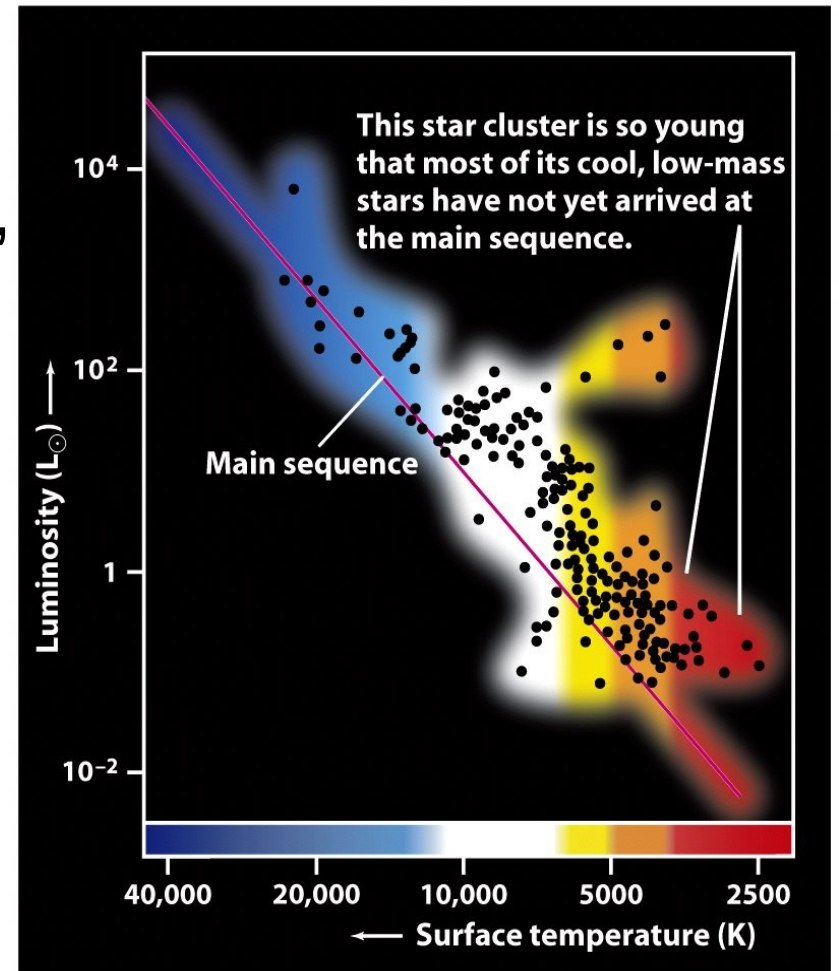


Aglomerados Estelares

A Evolução do diagrama HR de um Aglomerado

Agora conseguimos interpretar o diagrama HR/cor-magnitude de um aglomerado em formação,

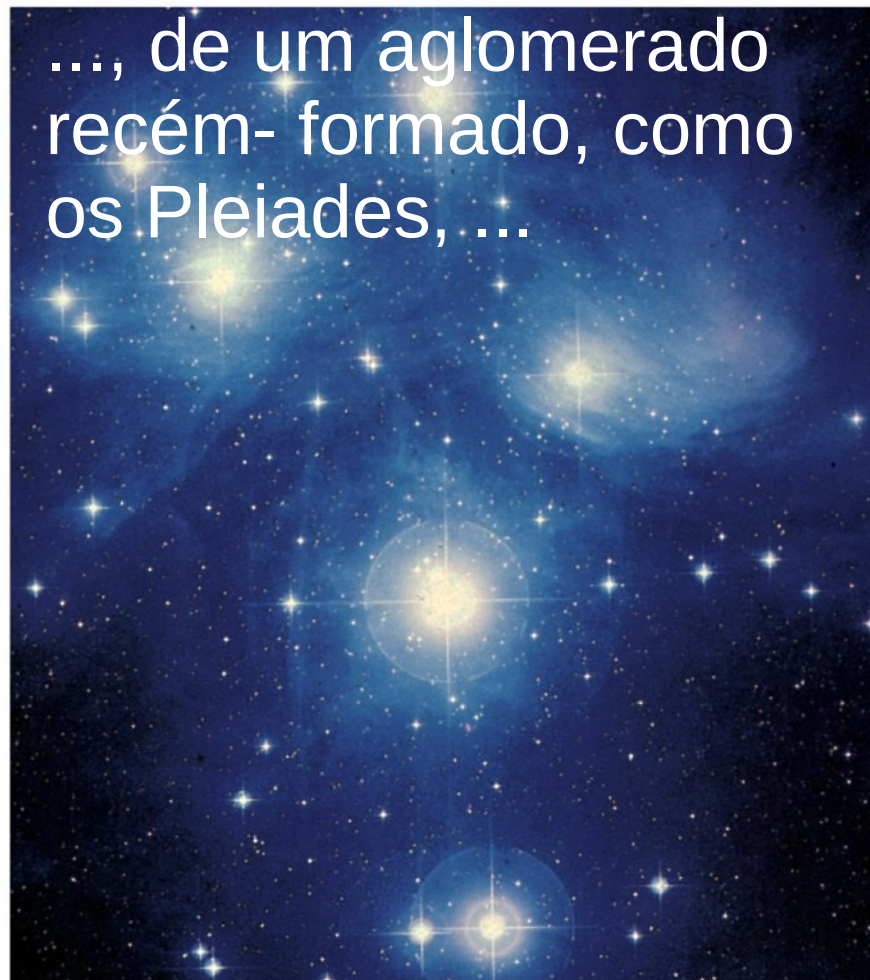
...



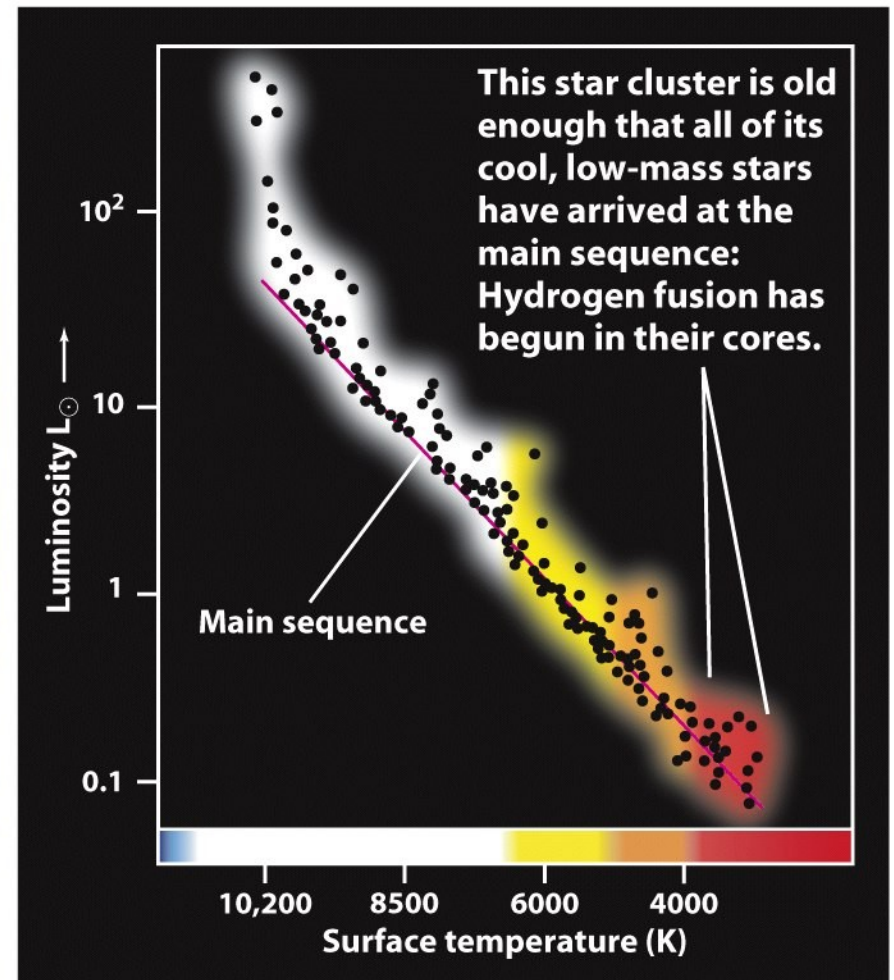
An H-R diagram of the stars in NGC 2264

Aglomerados Estelares

A Evolução do diagrama HR de um Aglomerado



(a) The Pleiades star cluster



(b) An H-R diagram of the stars in the Pleiades

Figure 18-19

Universe, Eighth Edition

© 2008 W. H. Freeman and Company

Aglomerados Estelares

A Evolução do diagrama HR de um Aglomerado

... e de um aglomerado mais velho, como 47 Tuc.

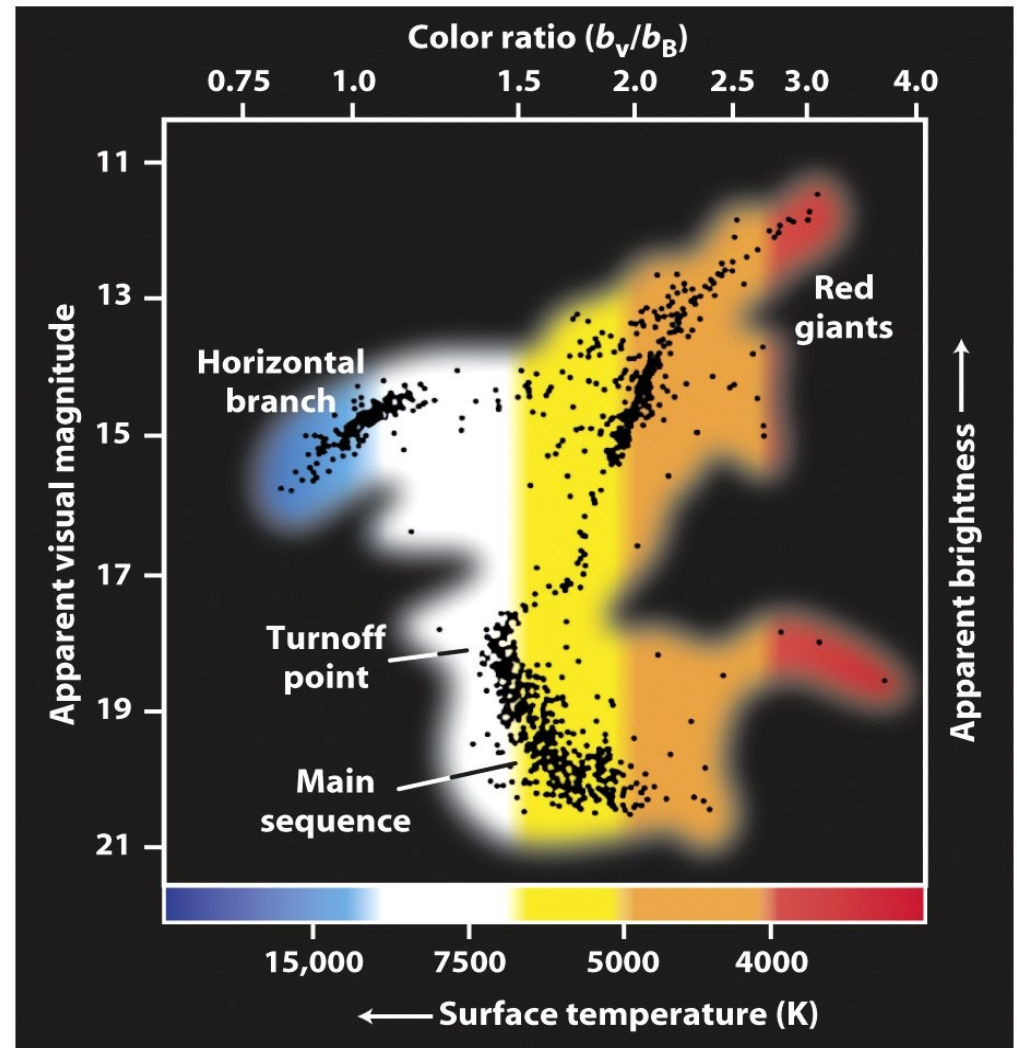
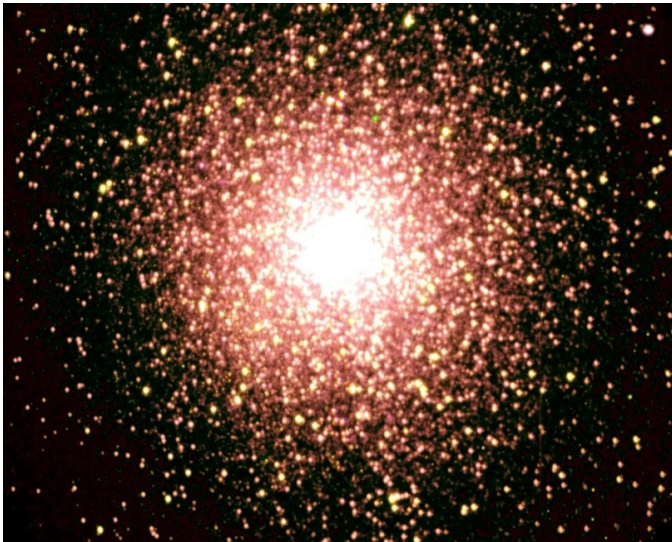


Figure 19-13
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Aglomerados Estelares

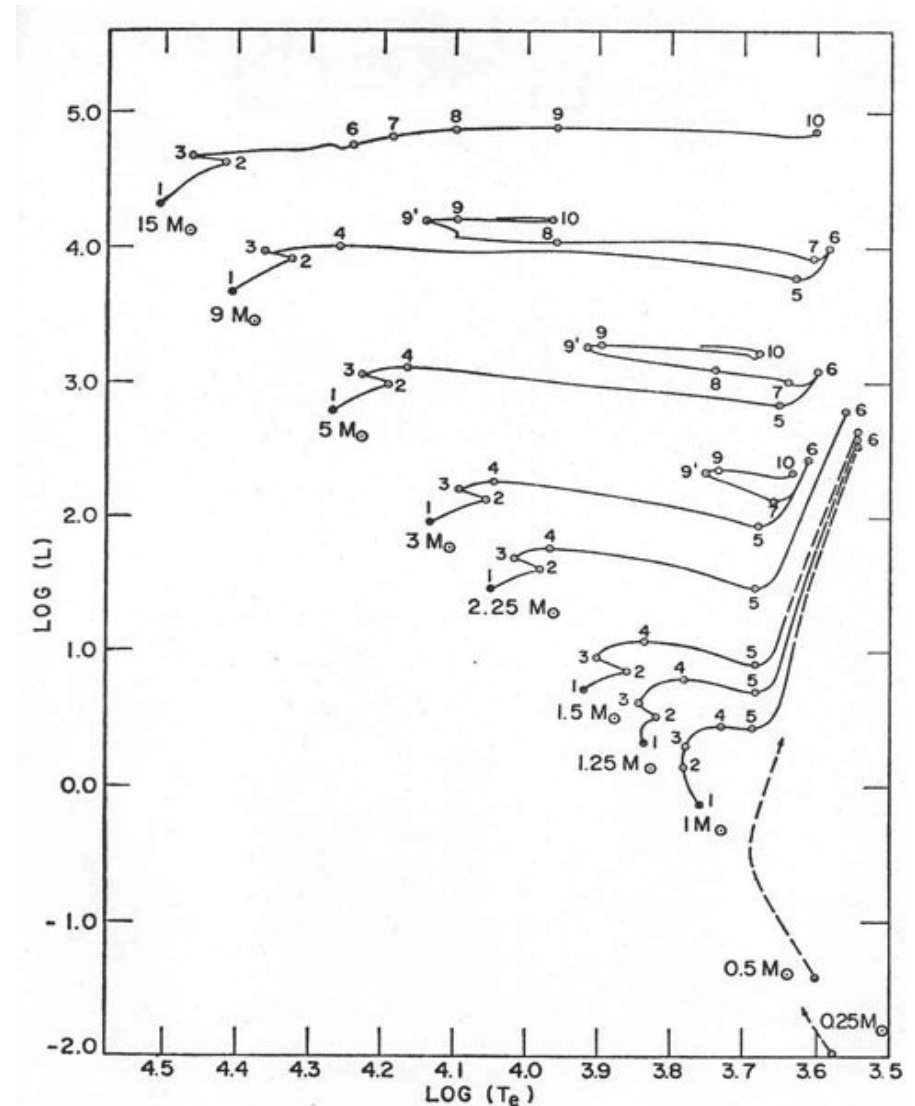
Síntese evolutiva de populações simples

Ingredientes:

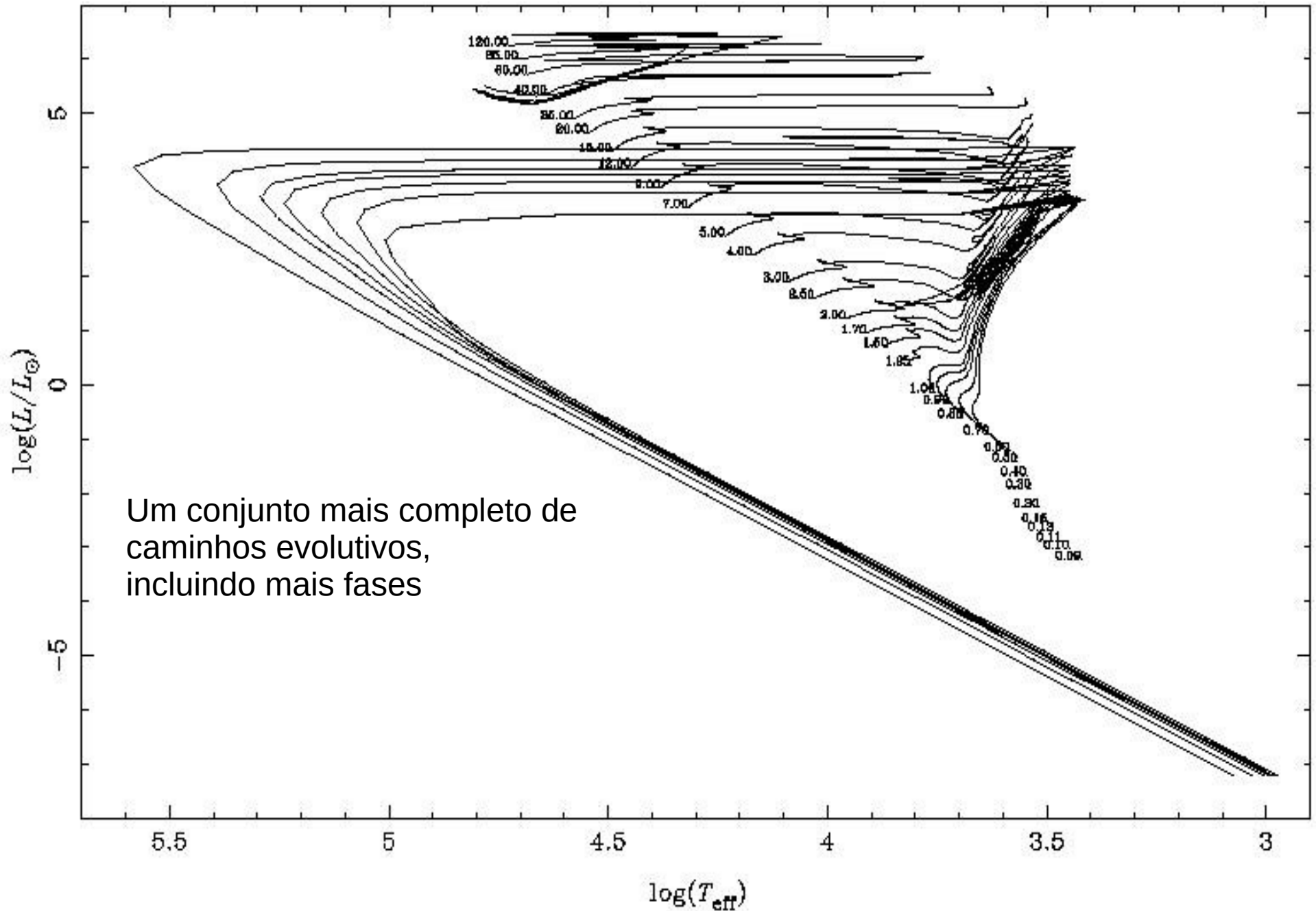
Modelos de **evolução estelar**
(=> aula Evolução Estelar)

=> **Caminhos** ou trajetórias
evolutivos

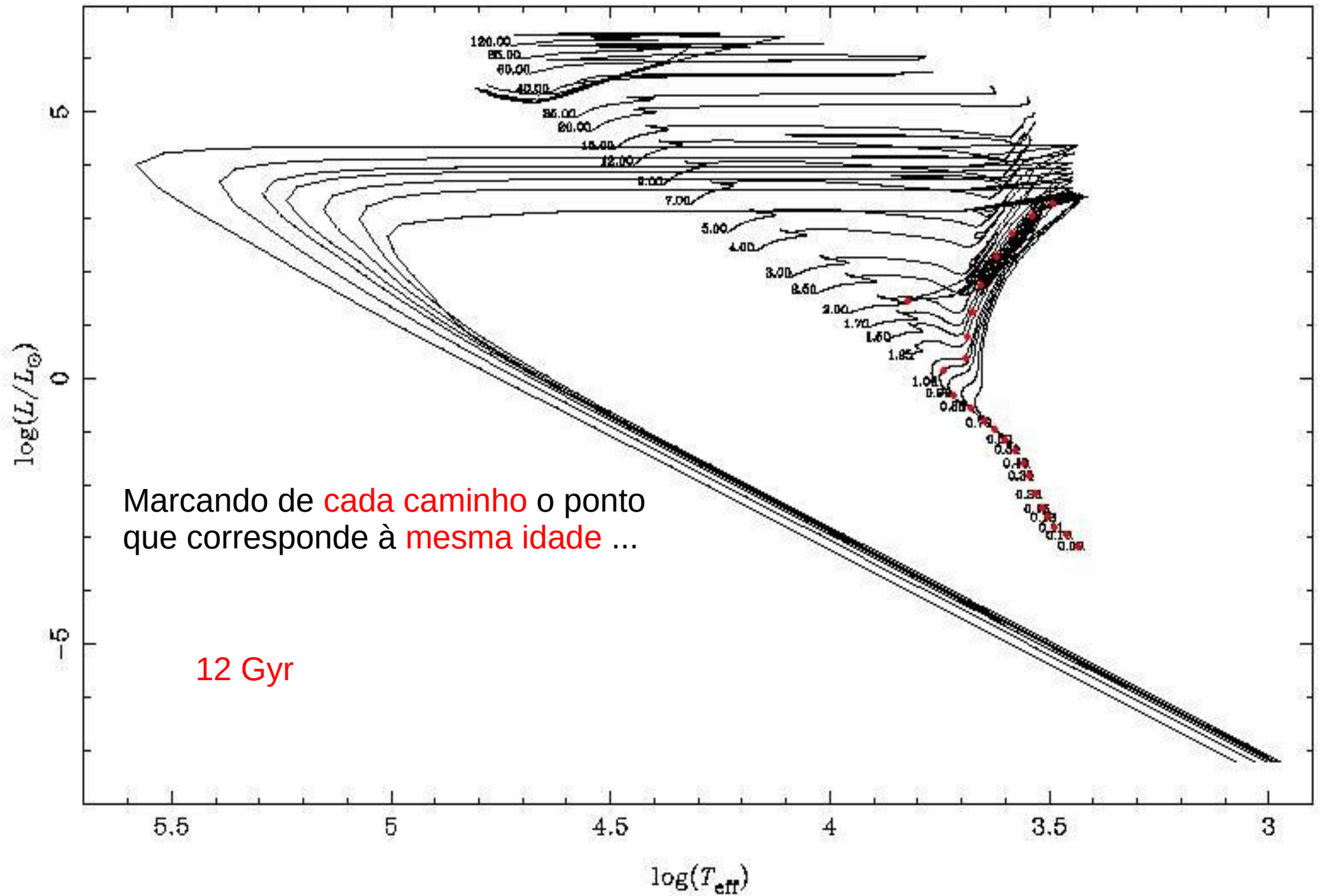
para uma **dada composição**
química e **massas iniciais**
diferentes.



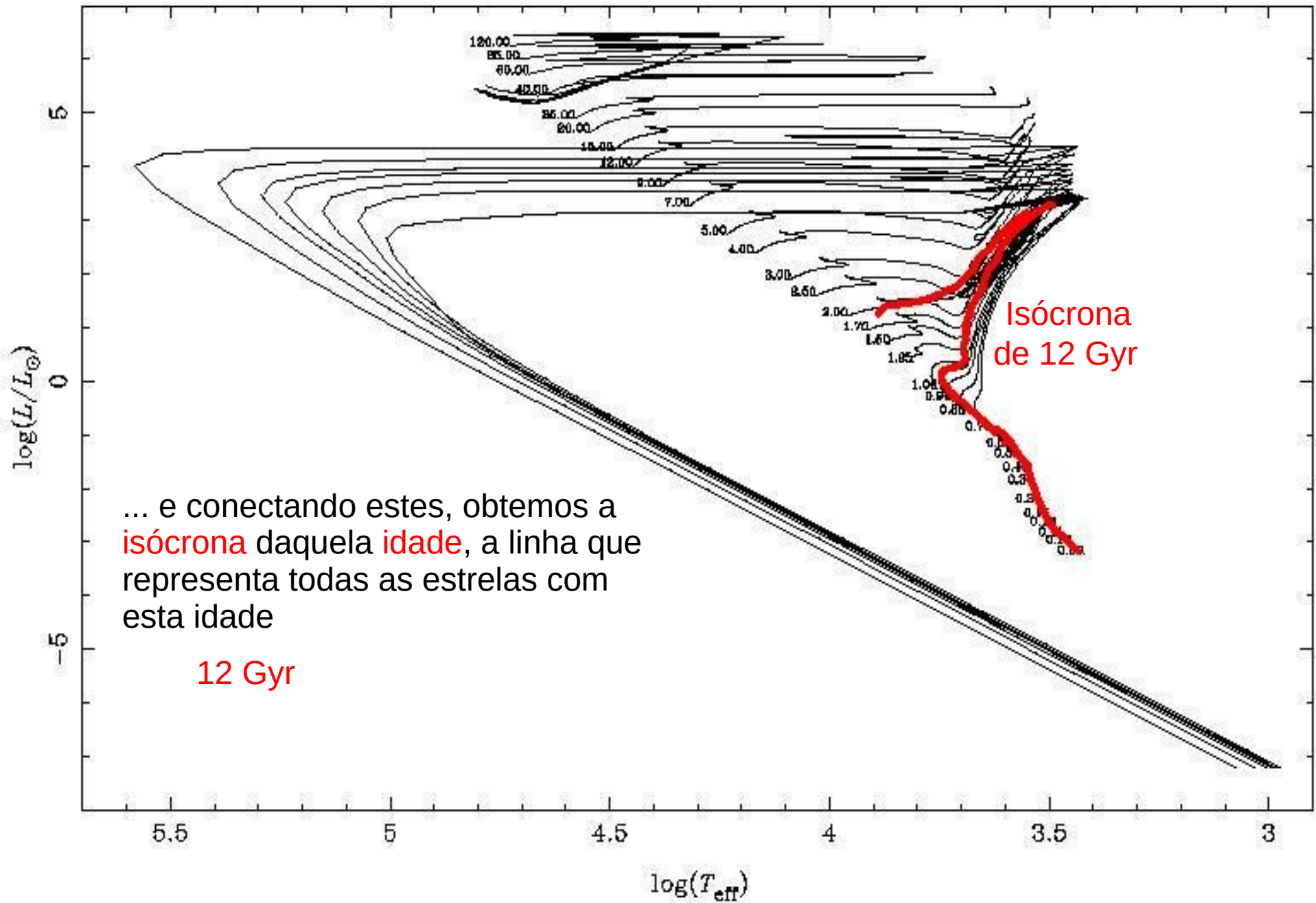
Aglomerados Estelares



Aglomerados Estelares



Aglomerados Estelares

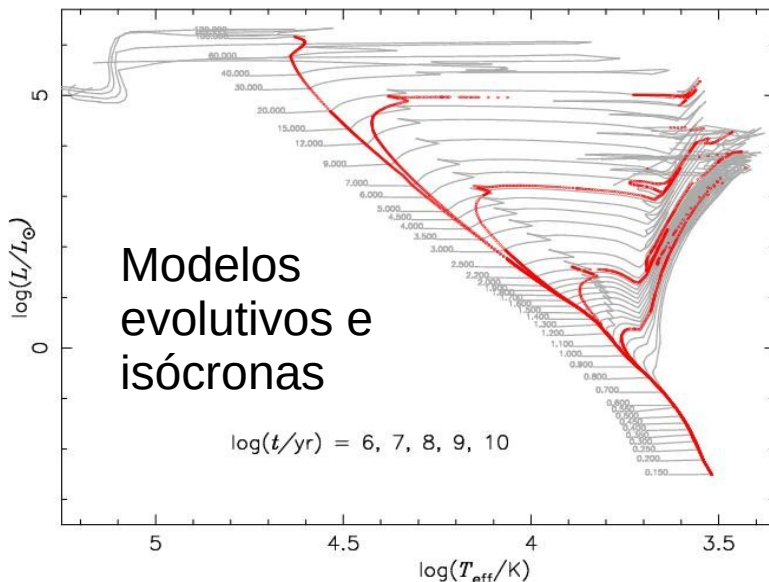


Aglomerados Estelares

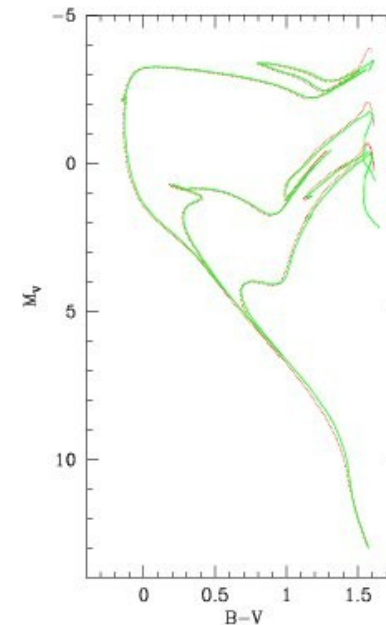
A Evolução do diagrama HR de um Aglomerado

Na prática, é comum trabalhar diretamente no **diagrama cor-magnitude** para **comparar dados empíricos** com **modelos**.

Em lugar de tentar traduzir magnitudes e cores em luminosidades e temperaturas, pode-se transformar as **luminosidades** e **temperaturas** dos **modelos** em **magnitudes** e **cores teóricas**, combinando os modelos estelares com modelos que prevêem os espectros de estrelas com dada luminosidade e temperatura.



\Rightarrow
Modelos espectrais

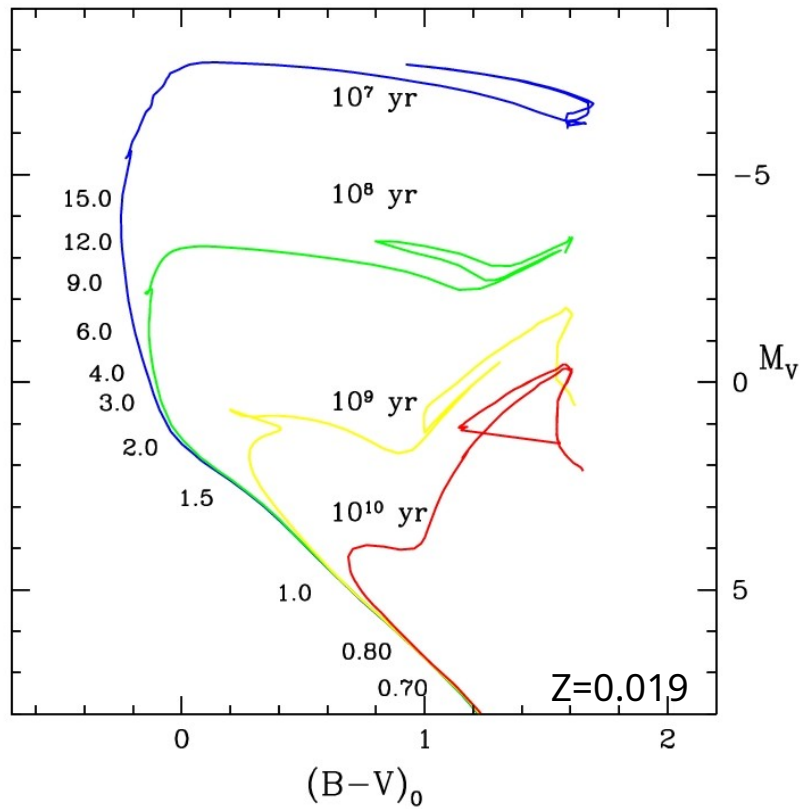


magnitudes e cores previstas pelos modelos

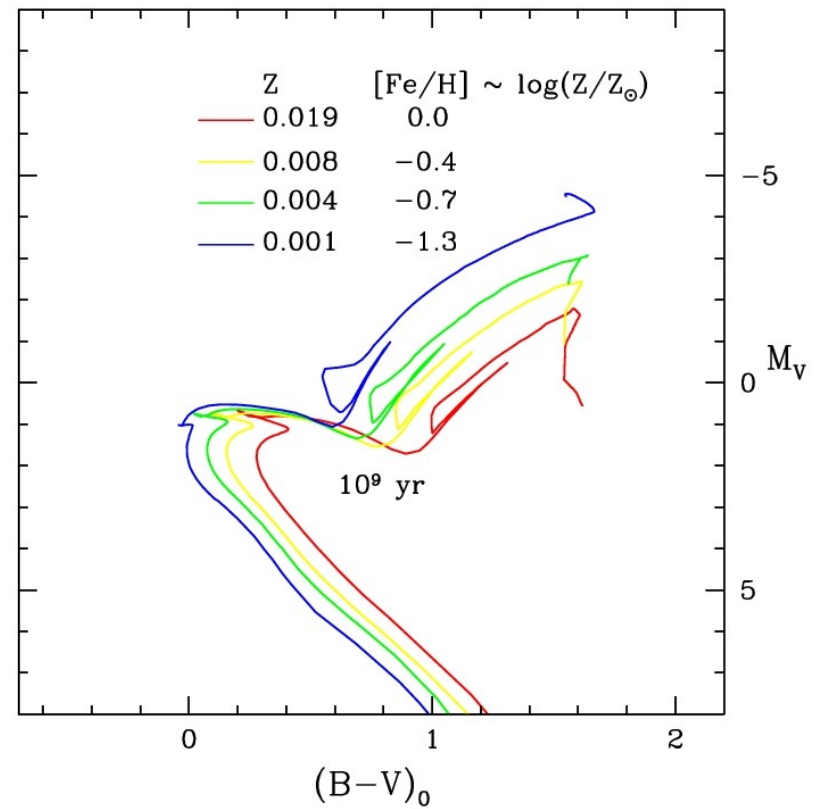
Aglomerados Estelares

Isócronas

Efeito da idade



Efeito com a metalicidade (Z)



Aglomerados Estelares

Determinação das Propriedades de um Aglomerado

Começa-se **determinando** o **módulo de distância**:

Já que as dimensões do aglomerado são pequenas em relação à distância até nós, podemos supor que **todas** as **estrelas** se encontram na **mesma distância**.

=> o **módulo de distância** $m - M$ é o **mesmo** para todas as estrelas.

=> O **diagrama cor-magnitude aparente** é igual ao **diagrama cor-magnitude absoluta**, deslocado **verticalmente** pela **distância** $m - M$.

=> Construir o CMD com m e não M .

Aglomerados Estelares

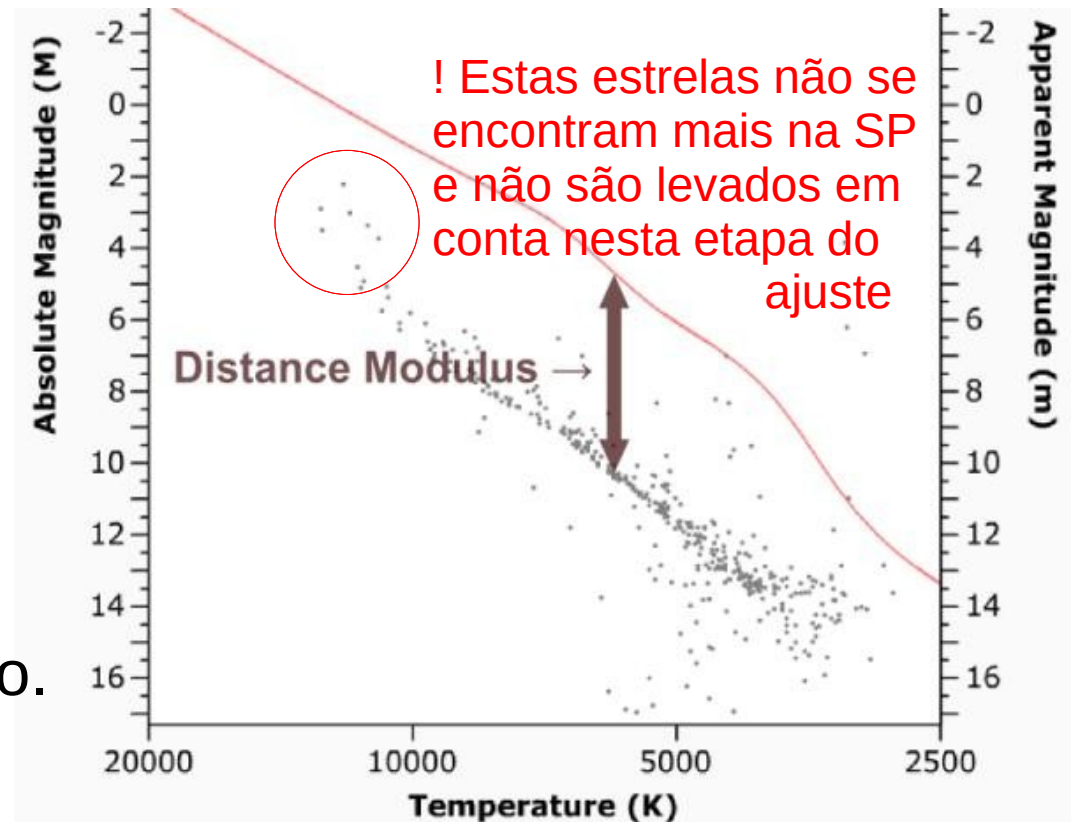
Determinação das Propriedades de um Aglomerado

Comparar a **Sequência Principal** do **CMD** do aglomerado com aquela **calibrada** em **magnitude absoluta**.

O **módulo de distância** do aglomerado é o deslocamento vertical entre os dois diagramas.
=> **Distância** até o aglomerado.

Este método é chamado **paralaxe espectroscópica** ou **ajuste da Sequência Principal**.

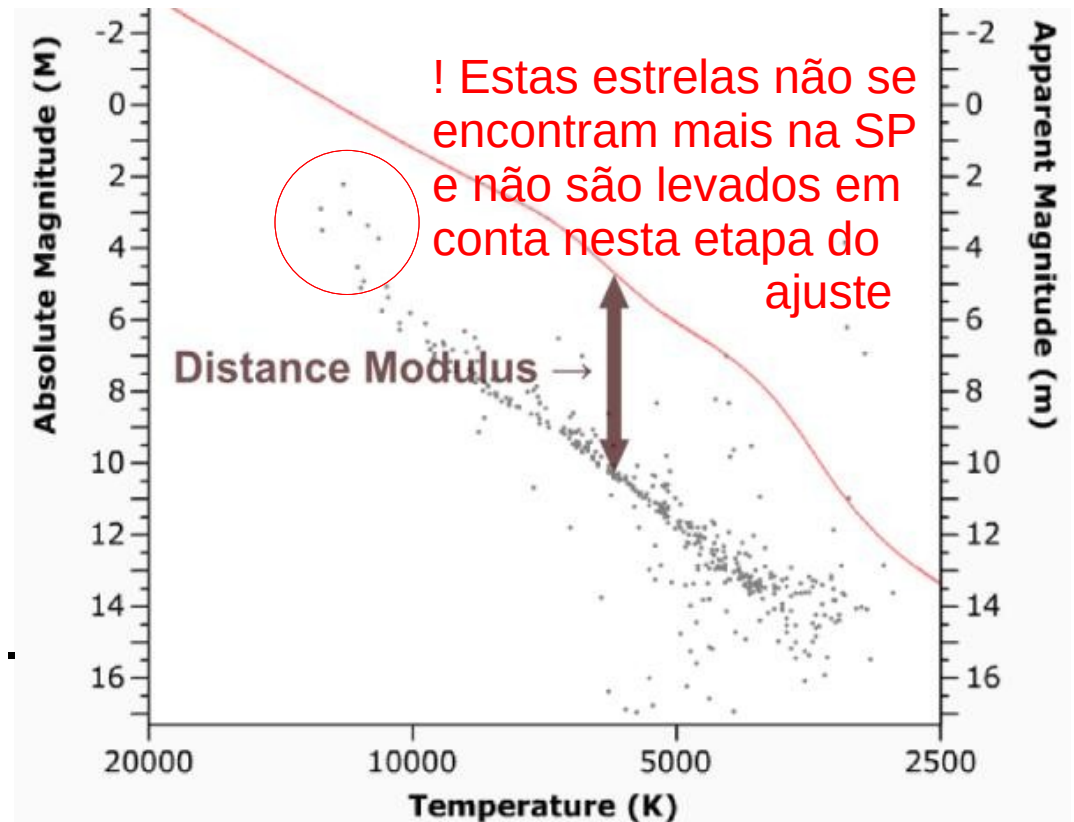
Na verdade, isto também é um método de vela padrão.



Aglomerados Estelares

Determinação das Propriedades de um Aglomerado

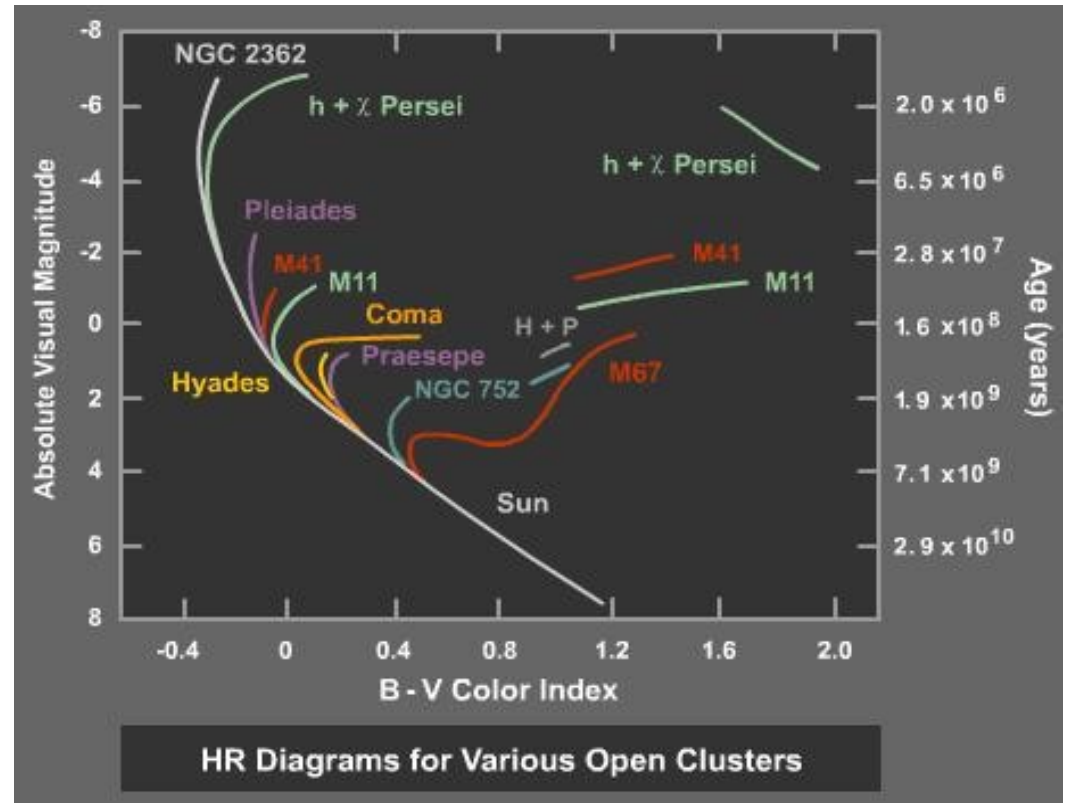
Junto com a distância conseguimos determinar a **composição química** ajustando a **forma** exata da Sequência Principal, já que esta varia com a metalicidade, e, pelo deslocamento horizontal, o **avermelhamento**.



Aglomerados Estelares

Determinação das Propriedades de um Aglomerado

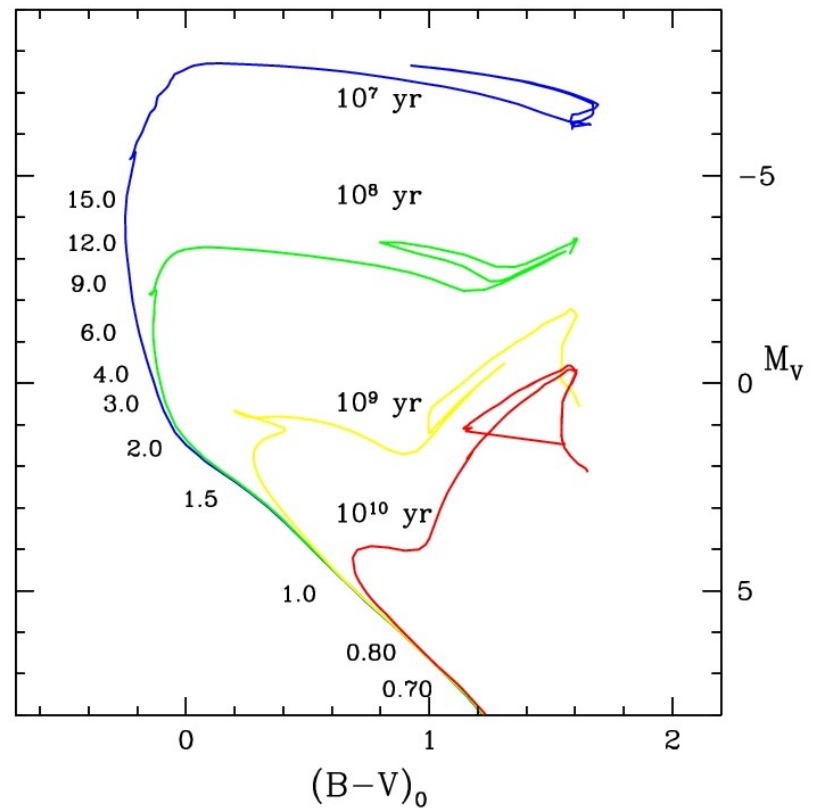
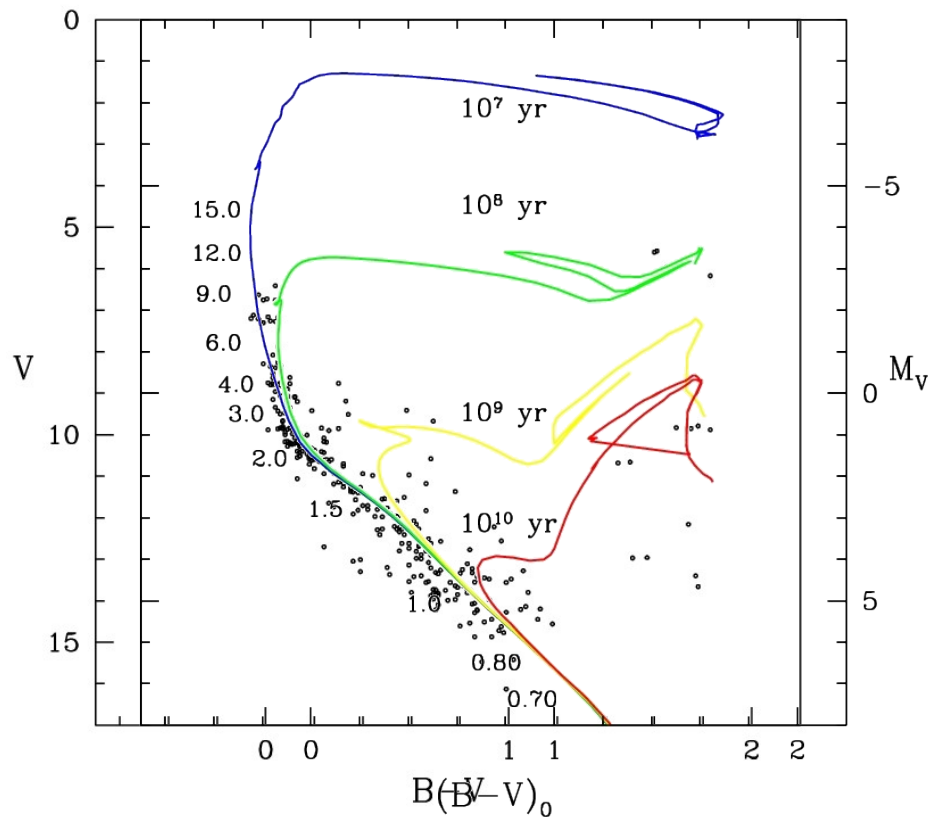
Uma vez determinada a distância e construído o CMD absoluto deslocando o CMD aparente pelo módulo de distância, podemos **estimar a idade** do aglomerado pela **localização** do ponto de **turn-off** ...



Aglomerados Estelares

... ou achando aquela isócrona que se ajusta o melhor às posições das estrelas no CMD inteiro

=> **ajuste de isócrona**



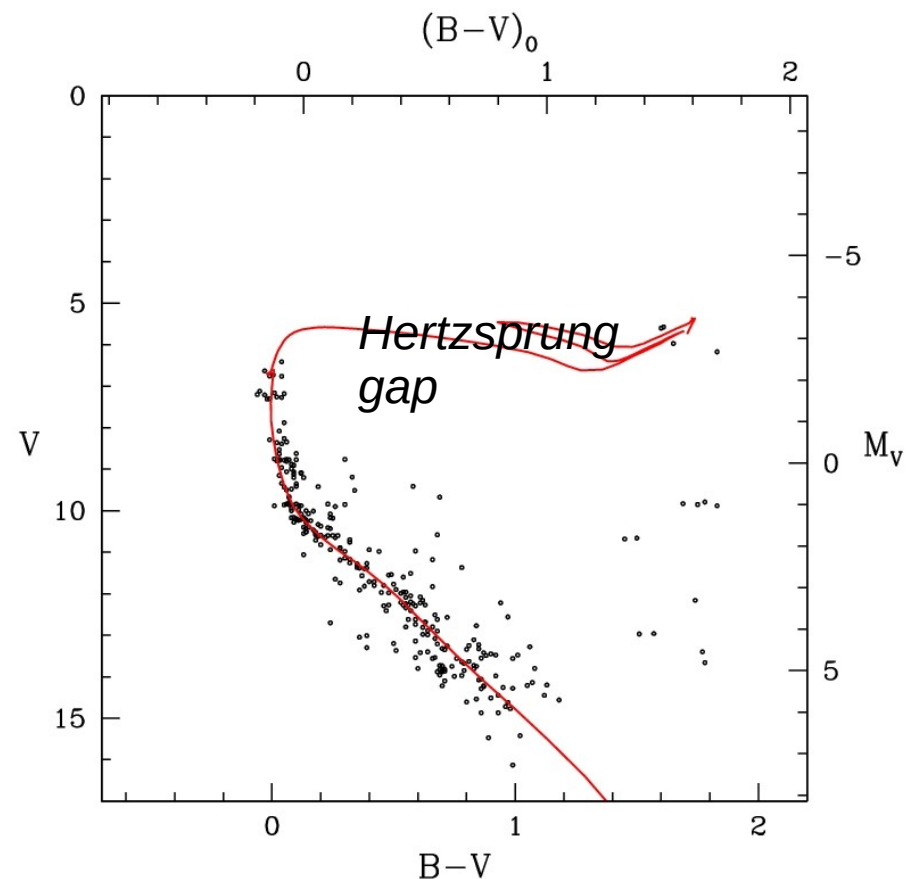
Aglomerados Estelares

Ajuste de Isócrona

Achou-se para o **aglomerado aberto M6**:

- idade: 100 mi anos
- $Z = 0.019$ (\sim solar, $[Fe/H] \sim 0$)
- distância = 0.49 kpc = 1600 ly
- $E(B-V) = 0.13$

O *Hertzsprung gap*, “lacuna de Hertzsprung”, é resultado do curto tempo de vida dos Subgigantes (\Rightarrow aula Evolução Estelar). Poucas ou nenhuma estrela é flagrada nesta fase.



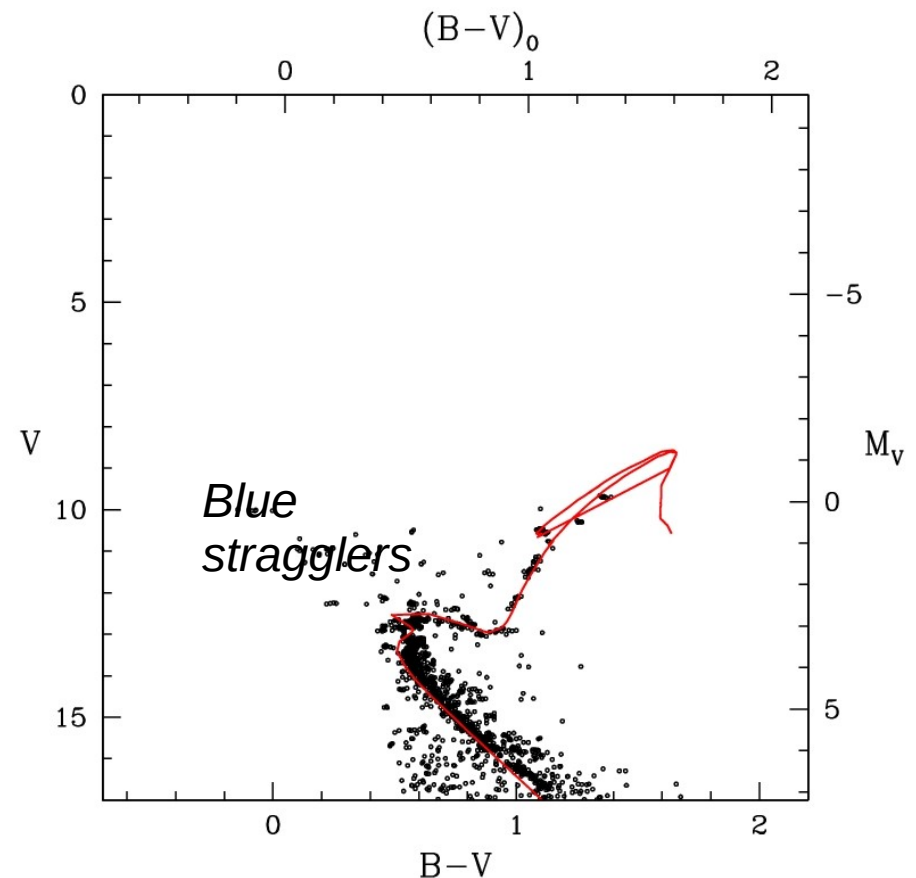
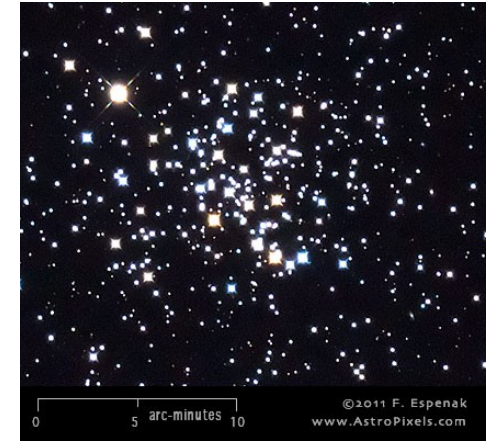
Aglomerados Estelares

Ajuste de Isócrona

para o **aglomerado aberto M67**:

- idade: 3.5 bi anos
- $Z = 0.012 \Rightarrow [Fe/H] = -0.2$
- distância = 0.85 kpc = 2800 ly
- $E(B-V) = 0.05$

Blue Stragglers (BS),
“estrelas retardatárias azuis”:
Talvez parte de uma binária com
troca de massa, ou resultado de
uma colisão de estrelas.

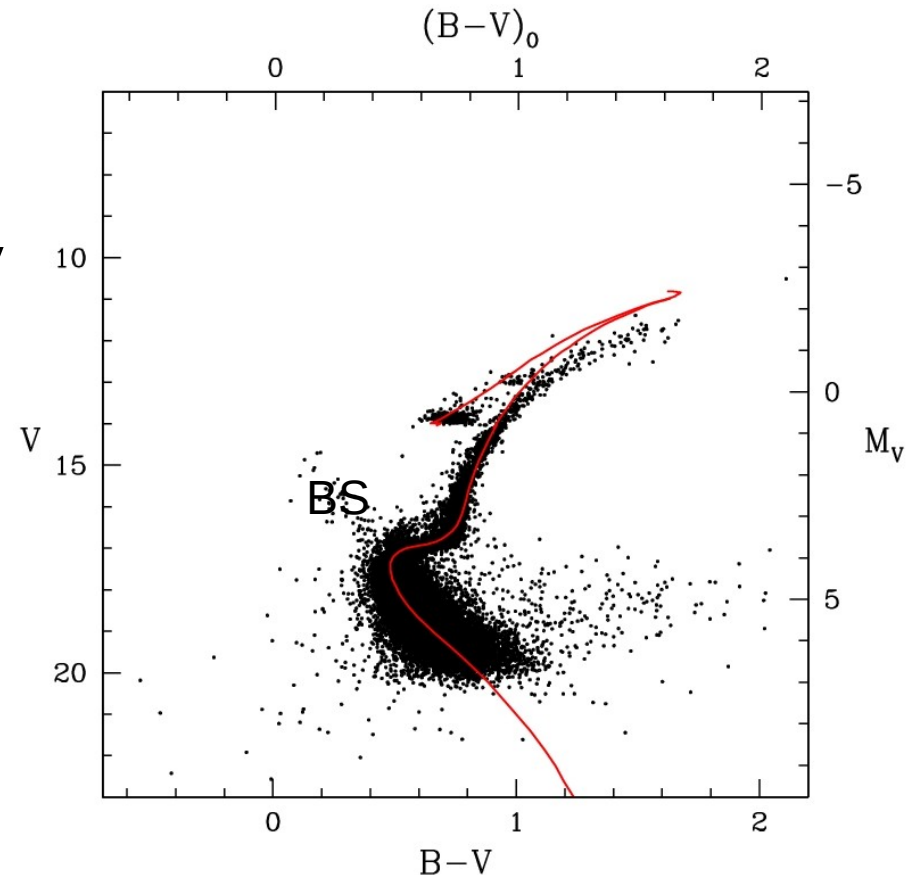


Aglomerados Estelares

Ajuste de Isócrona

para o **aglomerado globular 47 Tuc**:

- idade: 13 bi anos
- $Z = 0.004 \Rightarrow [Fe/H] = -0.7$
- distância = 4.4 kpc = 14 300 ly
- $E(B-V) = 0.01$

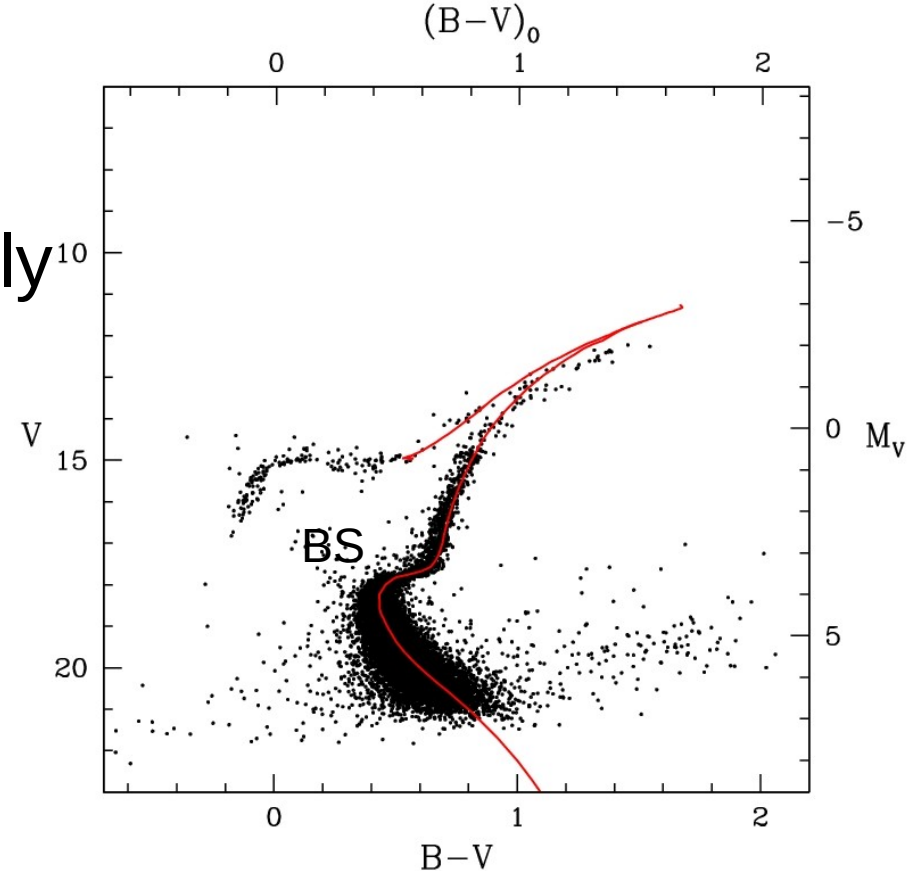


Aglomerados Estelares

Ajuste de Isócrona

para o **aglomerado globular M5**:

- idade: 13 bi anos
- $Z = 0.001 \Rightarrow [Fe/H] = -1.3$
- distância = 6.9 kpc = 22 500 ly¹⁰
- $E(B-V) = 0.01$



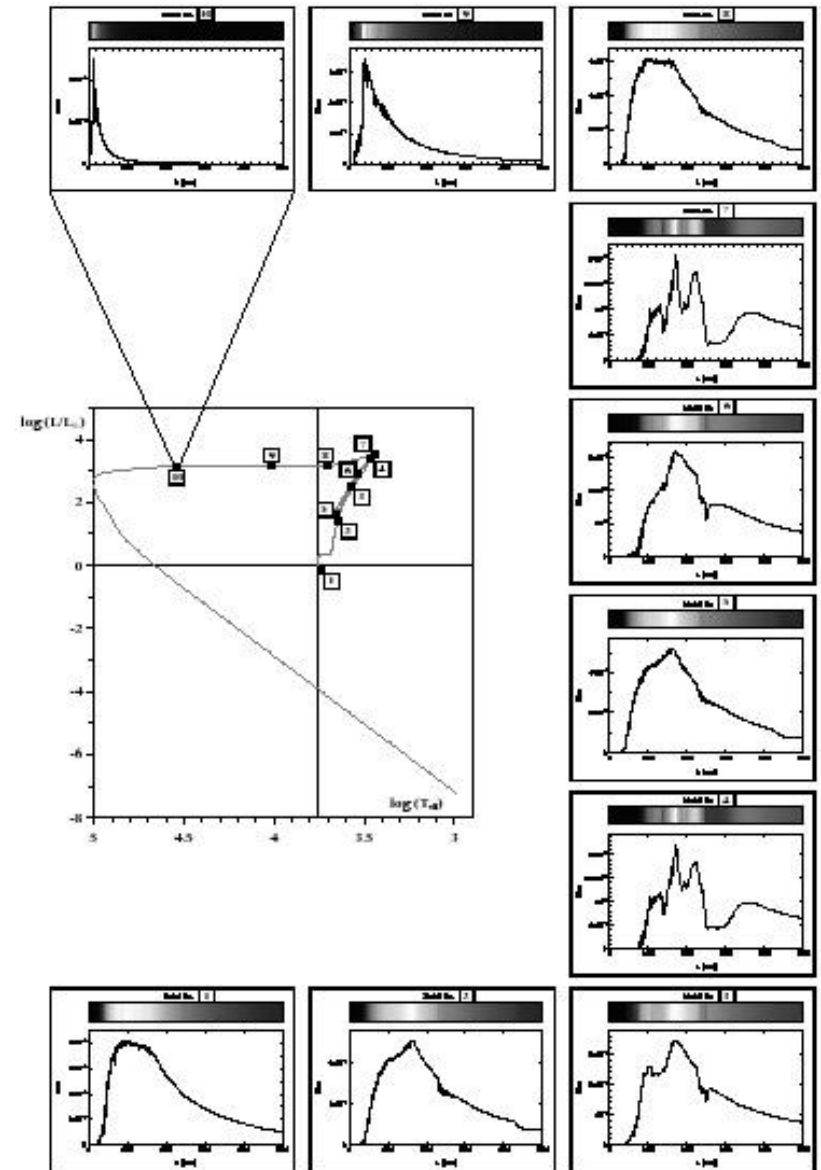
Aglomerados Estelares

Síntese evolutiva de populações simples

Quando se tem o **espectro** do **aglomerado**, chamado **espectro integrado**, em lugar do diagrama cor-magnitude:

usar uma **Biblioteca Estelar**

Contém para cada combinação dos parâmetros **temperatura**, **metallicidade** e **gravidade** na **superfície** (para cada estrela da população) o **espectro**.

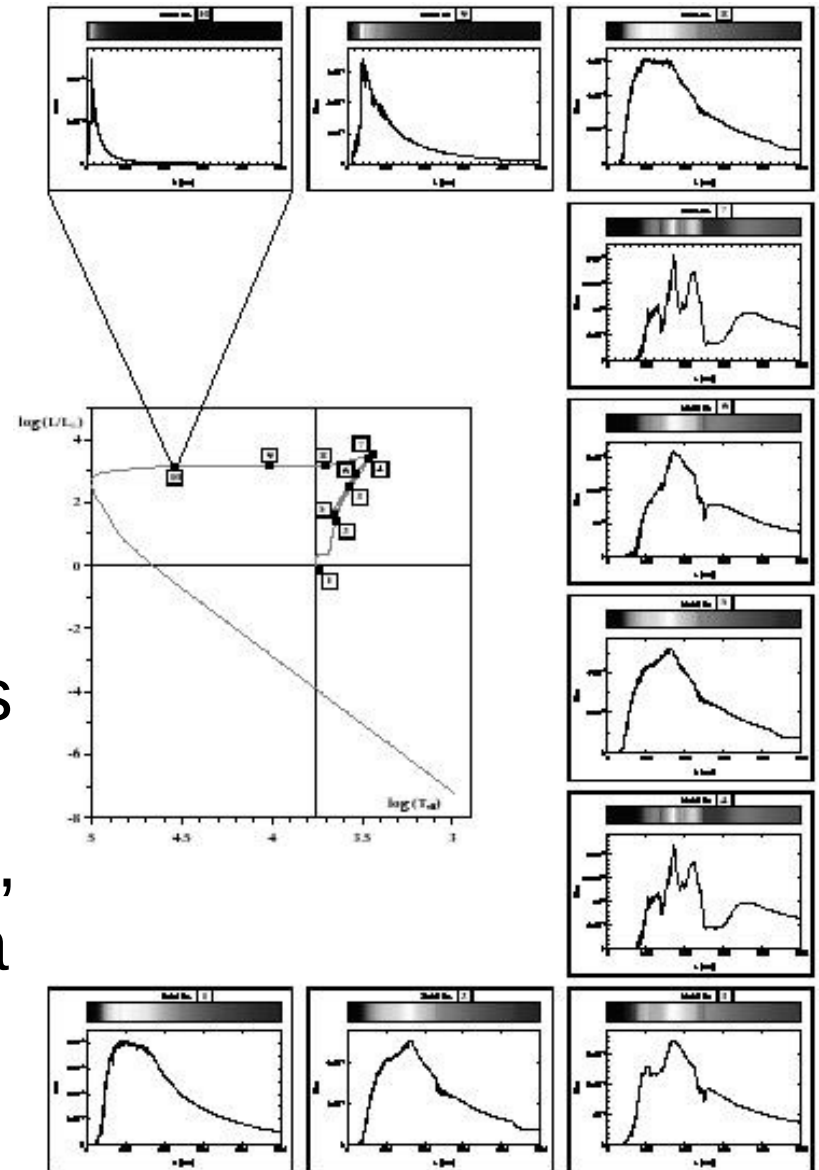


Aglomerados Estelares

Síntese evolutiva de populações simples

Uma **Biblioteca Estelar** pode ser:

- **teórica**: resultado de cálculos como aqueles apresentados nas aulas sobre Atmosferas Estelares
- **empírica**: composta de espectros observados de estrelas (mas é preciso de modelos mesmo assim, para atribuir os parâmetros a cada espectro).



Aglomerados Estelares

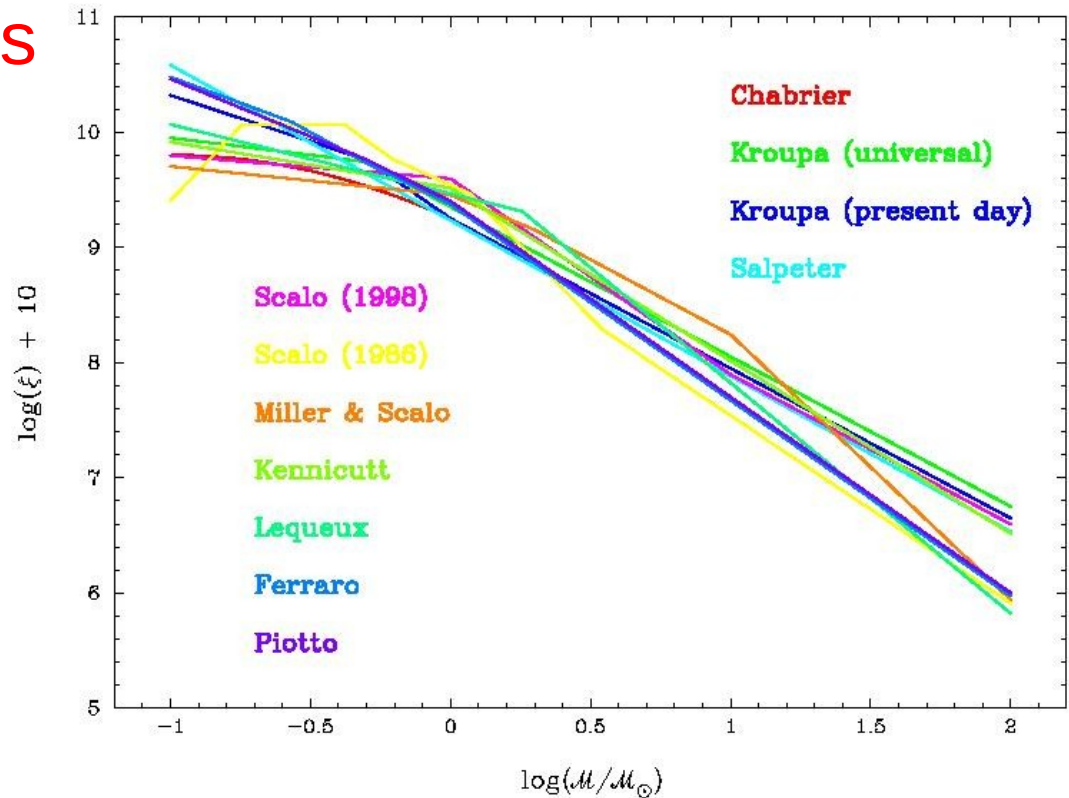
Síntese evolutiva de populações simples

Outro ingrediente necessário:

Função de Massas Iniciais
(IMF => aula Formação)

Número de estrelas
formadas em função
das suas massas iniciais:

$$dN = \xi(M)dM$$



Aglomerados Estelares

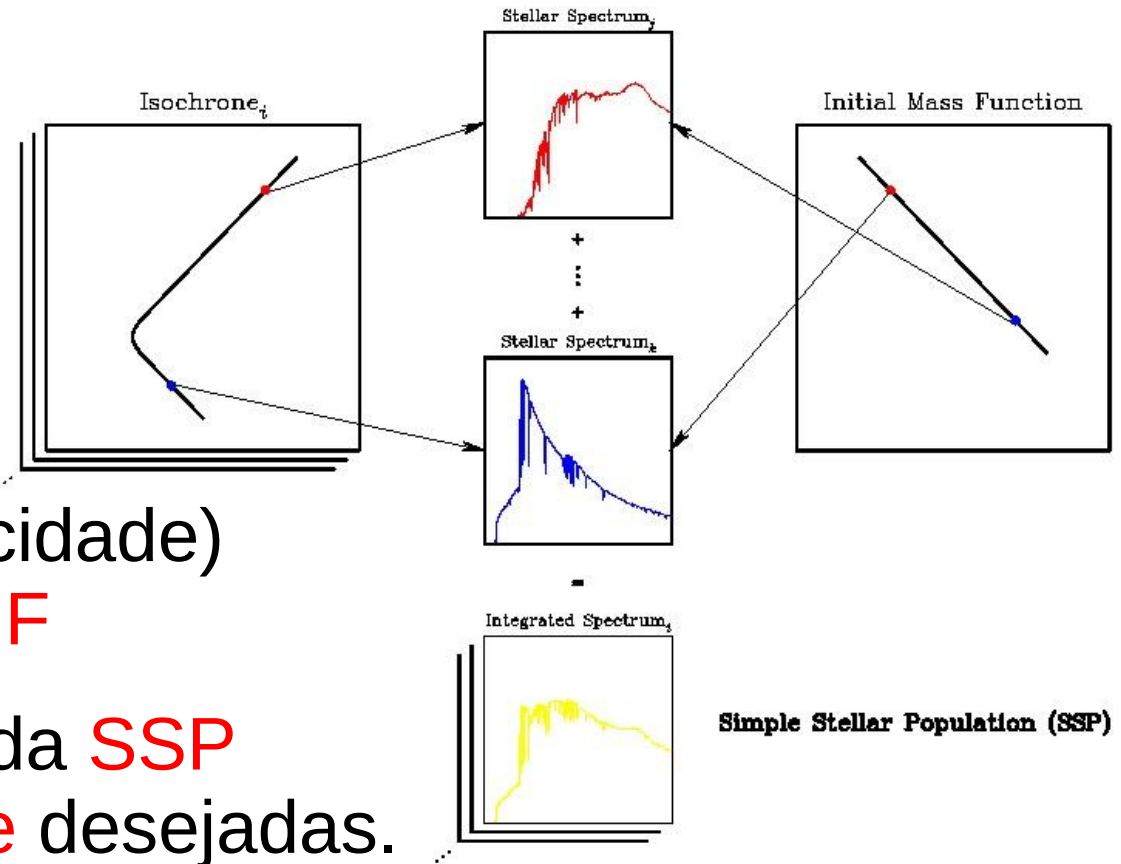
Síntese evolutiva de populações simples

Método

Somar espectros estelares

correspondendo aos pontos de uma dada isócrona (idade, metalicidade) com **peso** dado pela **IMF**

=> **Espectro integrado** da **SSP** de **idade** e **metalicidade** desejadas.

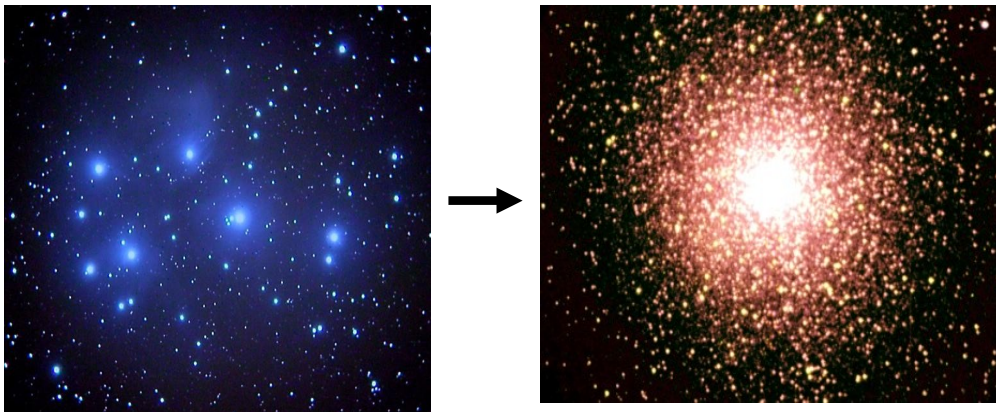


Aglomerados Estelares

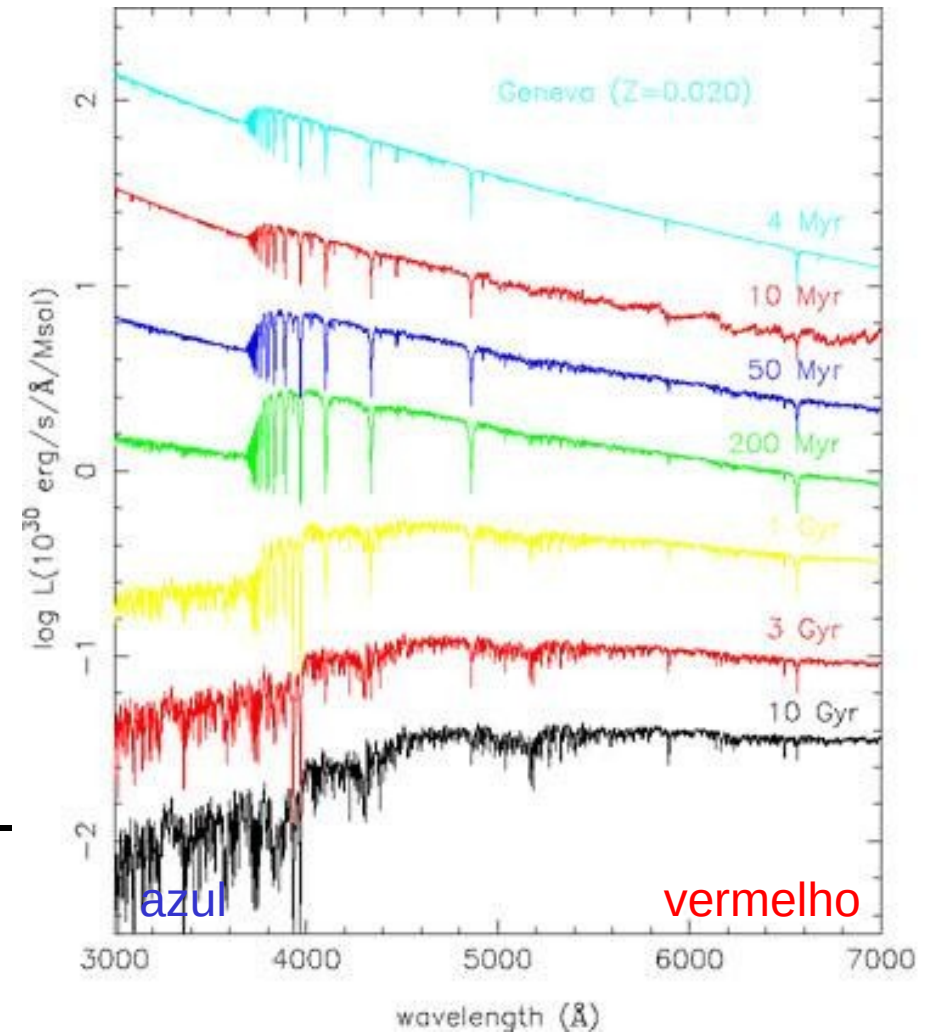
Síntese evolutiva de populações simples

Resultados: Evolução espectral de uma SSP

- SSPs evoluem do azul pro vermelho, e a luminosidade diminui



A metalicidade também influencia, i.e. nas linhas espectrais.

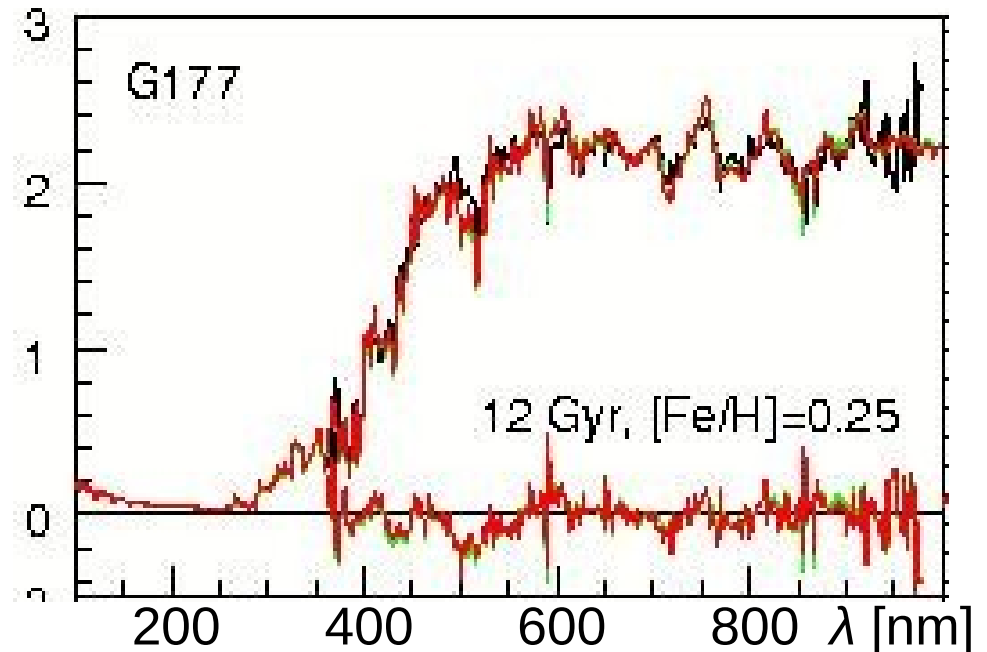


Aglomerados Estelares

Síntese evolutiva de populações simples

Ajuste espectral de uma SSP (de um aglomerado estelar):

Achar aquele espectro modelo, que melhor se ajusta ao do aglomerado.



=> **Determinação** dos **parâmetros** (idade, metalicidade, distância e avermelhamento) do **aglomerado**.

Aglomerados Estelares

Dificuldades

- **Imperfeições** nos ingredientes (**modelos** de **evolução** estelar, **biblioteca** de **espectros**, **IMF**)
- **Relações** de **abundâncias não-solares**:
 - Elementos α : (C, N), O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Ti vindo de supernovas tipo II
 - Elementos “iron peak” V, Cr, Mn, Fe, Co e Ni vindo de supernovas tipo I
- **Estrelas binárias** não-resolvidas
- Flutuações estatísticas de **estrelas brilhantes** e pouco numerosas

Aglomerados Estelares

Dificuldades

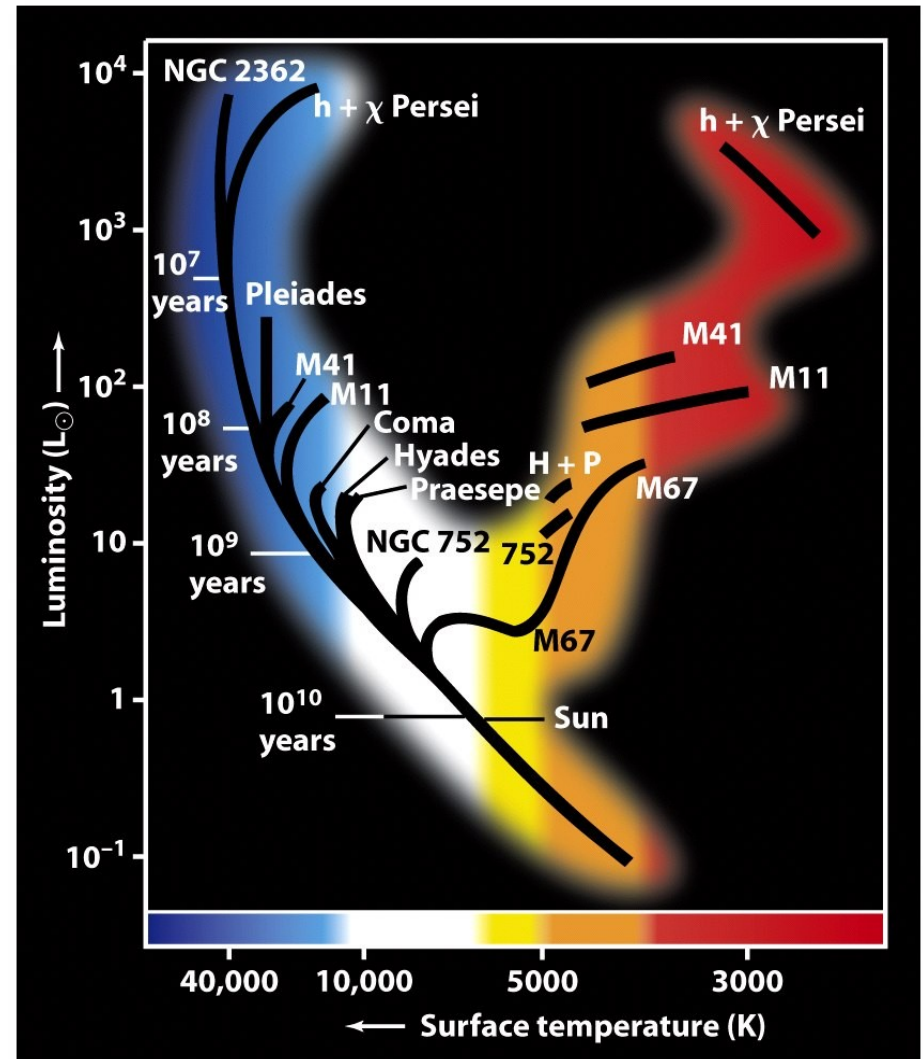
- A **Degenerescência Idade-Metalicidade**:
um aumento de metalicidade tem efeitos similares que um aumento de idade, principalmente no espectro integrado (torna o espectro mais vermelho).
=> uma pode mimicar a outra, levando à determinação errada das duas.
- **Extinção Interestelar, Avermelhamento**
também tem um efeito similar sobre o espectro integrado (mimica populações mais velhas ou mais ricas em “metais”)
Aglomerados muito jovens ainda contêm gás, o que causa variações em avermelhamento entre as estrelas

Aglomerados Estelares

Determinação das Propriedades de um Aglomerado

Aglomerados Estelares
nos forneceram:

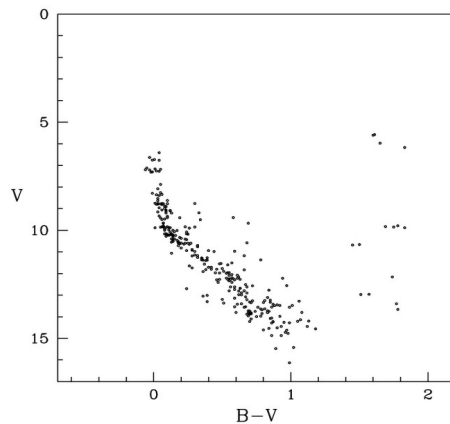
- **Idades** de **estrelas**
- A **idade** da **Via Láctea**
- **Idades** de outras **galáxias** com aglomerados observáveis
- Um **limite mínimo** para a **idade** do **Universo**.



Mesma coisa no diagrama HR teórico

Aglomerados Estelares

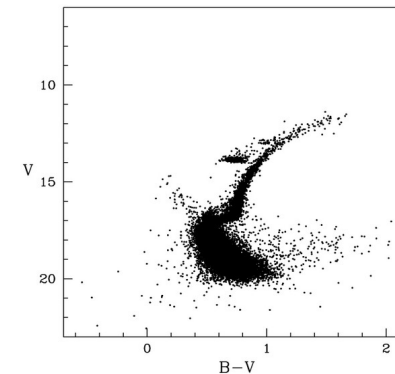
Aglomerados Abertos



Até **algumas milhares** de estrelas
Maioria ainda na **Sequência Principal**

posição desta indica $[Fe/H] \sim$ **solar**
 \Rightarrow **alta metalicidade, jovem**
 \Rightarrow **População I** de Baade

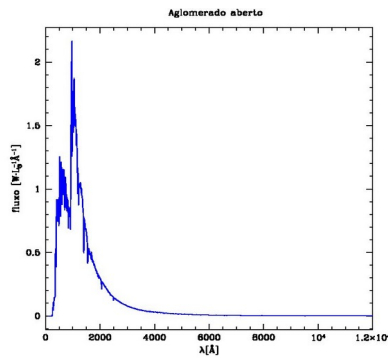
Aglomerados Globulares



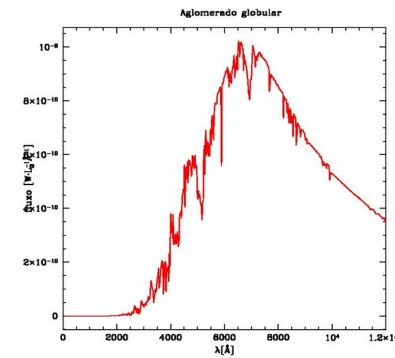
algumas **100 000** de estrelas
muitas evoluíram para o **ramo** de
Gigantes Vermelhos ou além
posição da SP $\Rightarrow [Fe/H] \leq -0.7$
 \Rightarrow **baixa metalicidade, velho**
 \Rightarrow **População II** de Baade

Aglomerados Estelares

Aglomerados Abertos



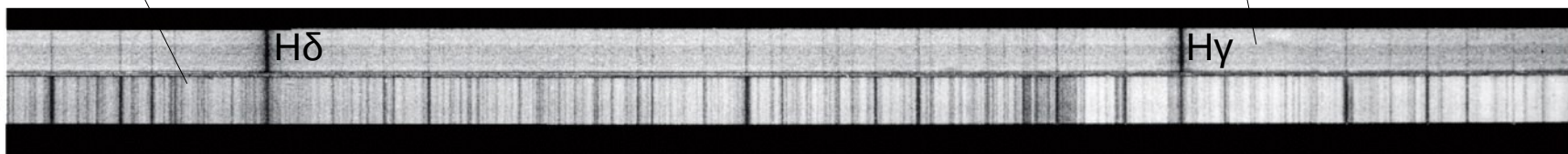
Aglomerados Globulares



Pico do espectro integrado em λ curtos (azul) Pico em λ compridos (vermelho)
Linhas e bandas moleculares de absorção de elementos pesados Poucas linhas de absorção

=> jovem, alta metalicidade
=> População I

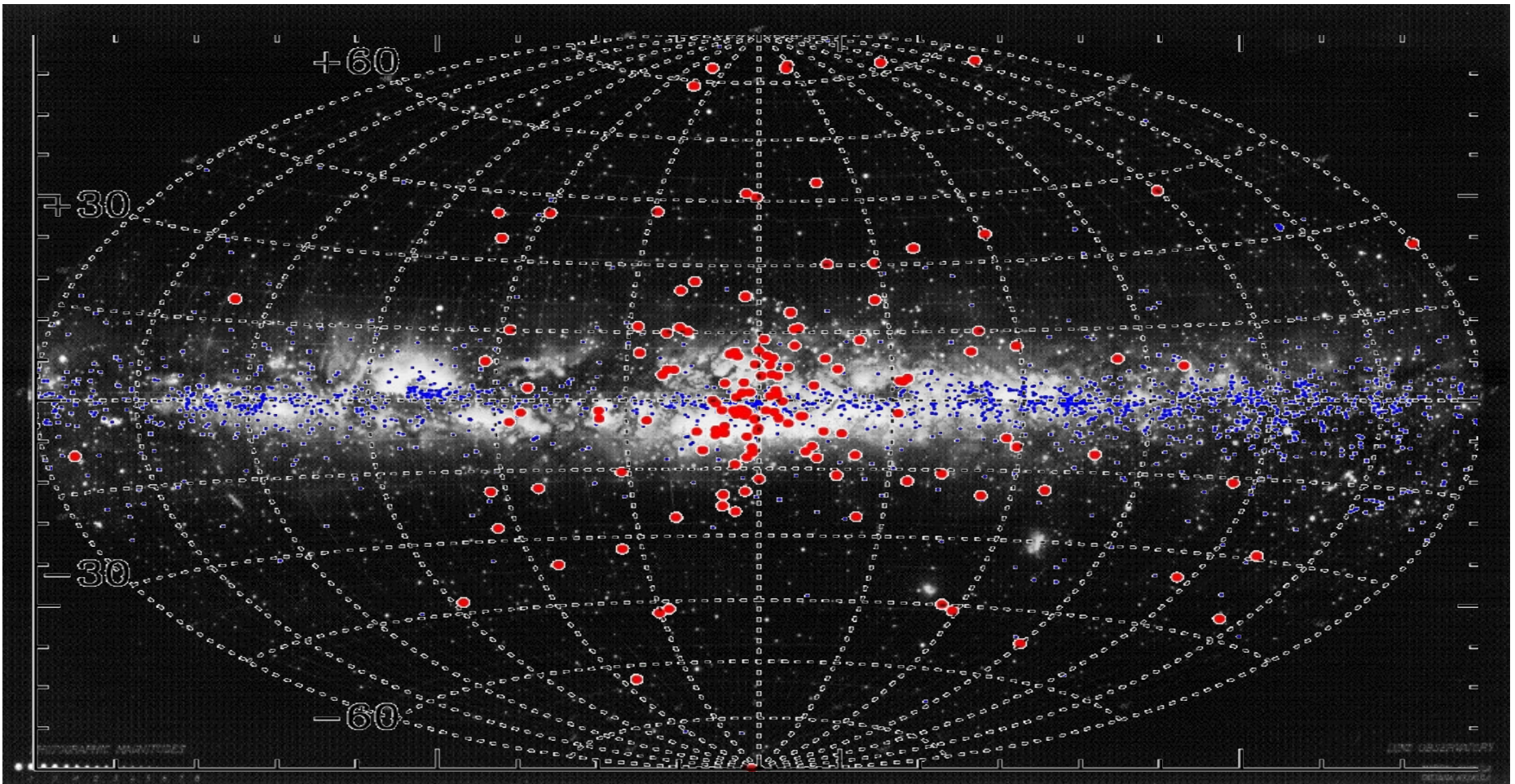
=> velho, baixa metalicidade
=> População II



Aglomerados Estelares

Aglomerados Abertos
(~2000) na maioria no Disco

Aglomerados Globulares
(~160) na maioria no Halo

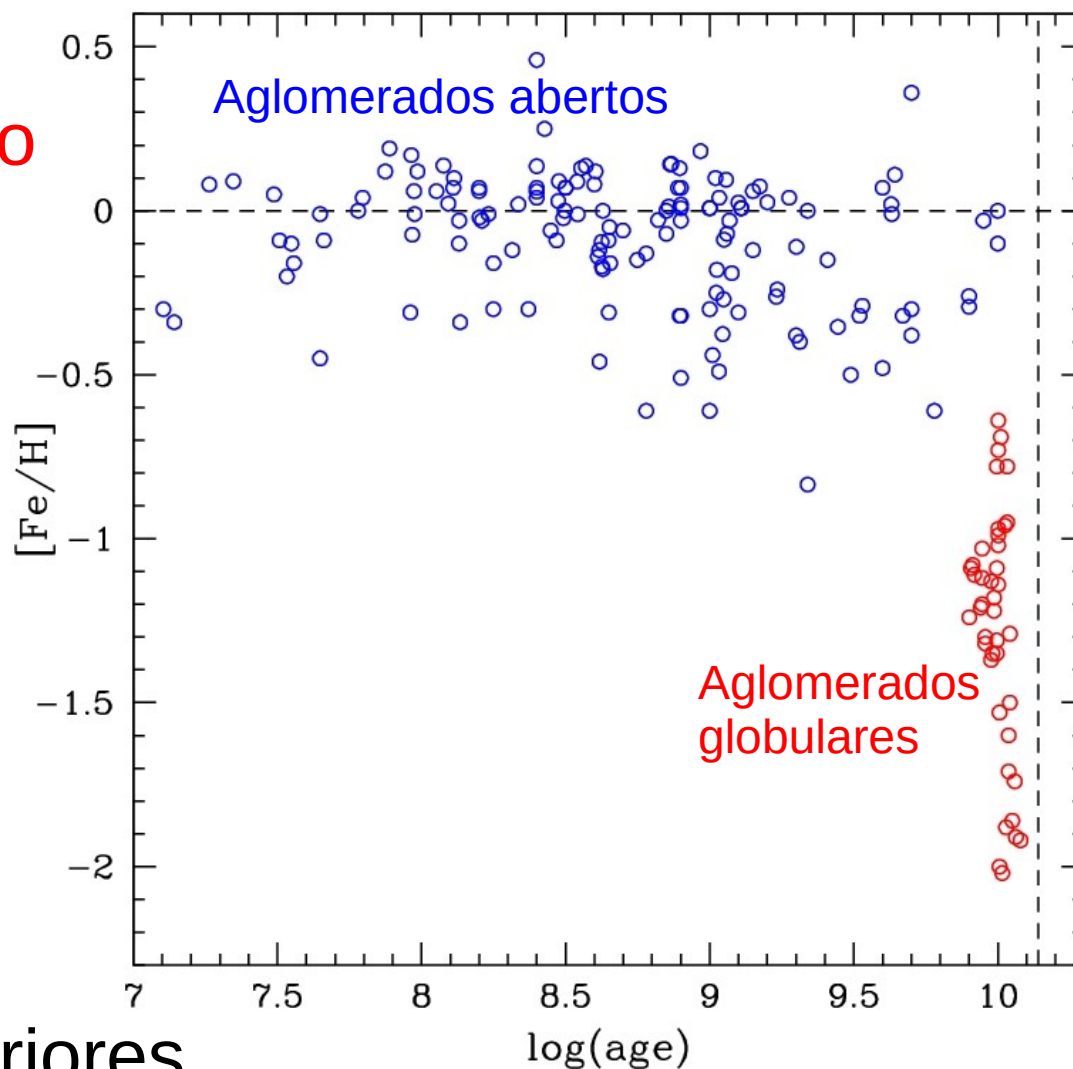


Relação Idade-Metalicidade

Com o **tempo**, o Meio Interestelar é **enriquecido** de **elementos pesados** por estrelas “morrendo” (Nebulosas Planetárias, Supernovas).

Deste meio enriquecido as **novas estrelas** se formam.

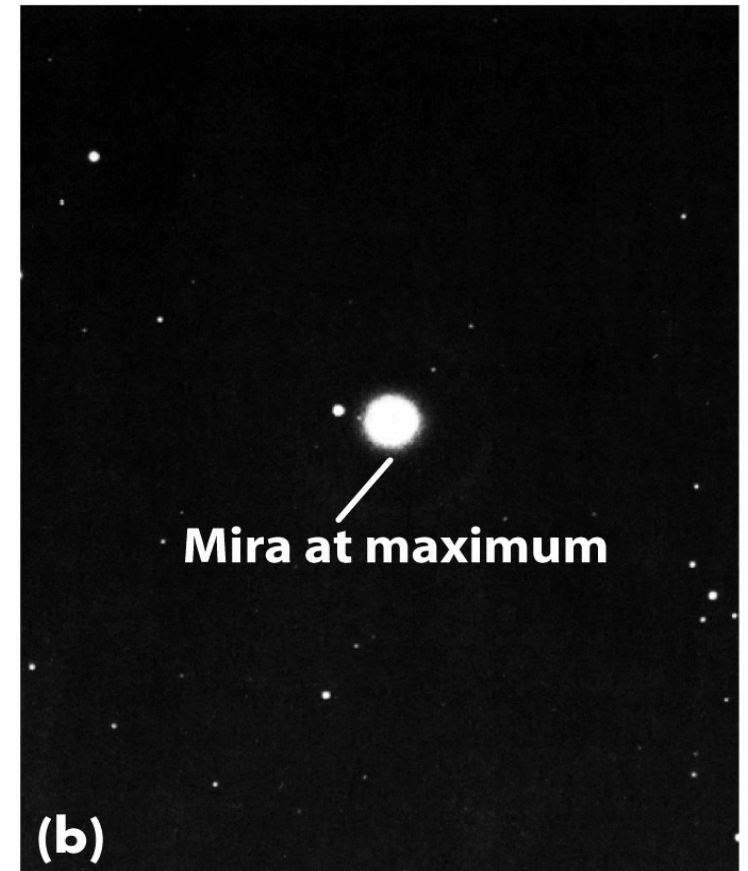
=> **Novas gerações** de **estrelas** são **mais ricas** em “**metais**” que as anteriores.



Estrelas Variáveis

Classe de estrelas com **variabilidade intrínseca**: são **pulsantes** e suas propriedades como **luminosidade**, **raio** e **temperatura** variam **periodicamente**.

São **estrelas normais**, que em um dado período de sua vida passam por uma fase de **instabilidade**.



Exemplo: Mira é uma estrela variável de longo período (~11 meses)

Estrelas Variáveis

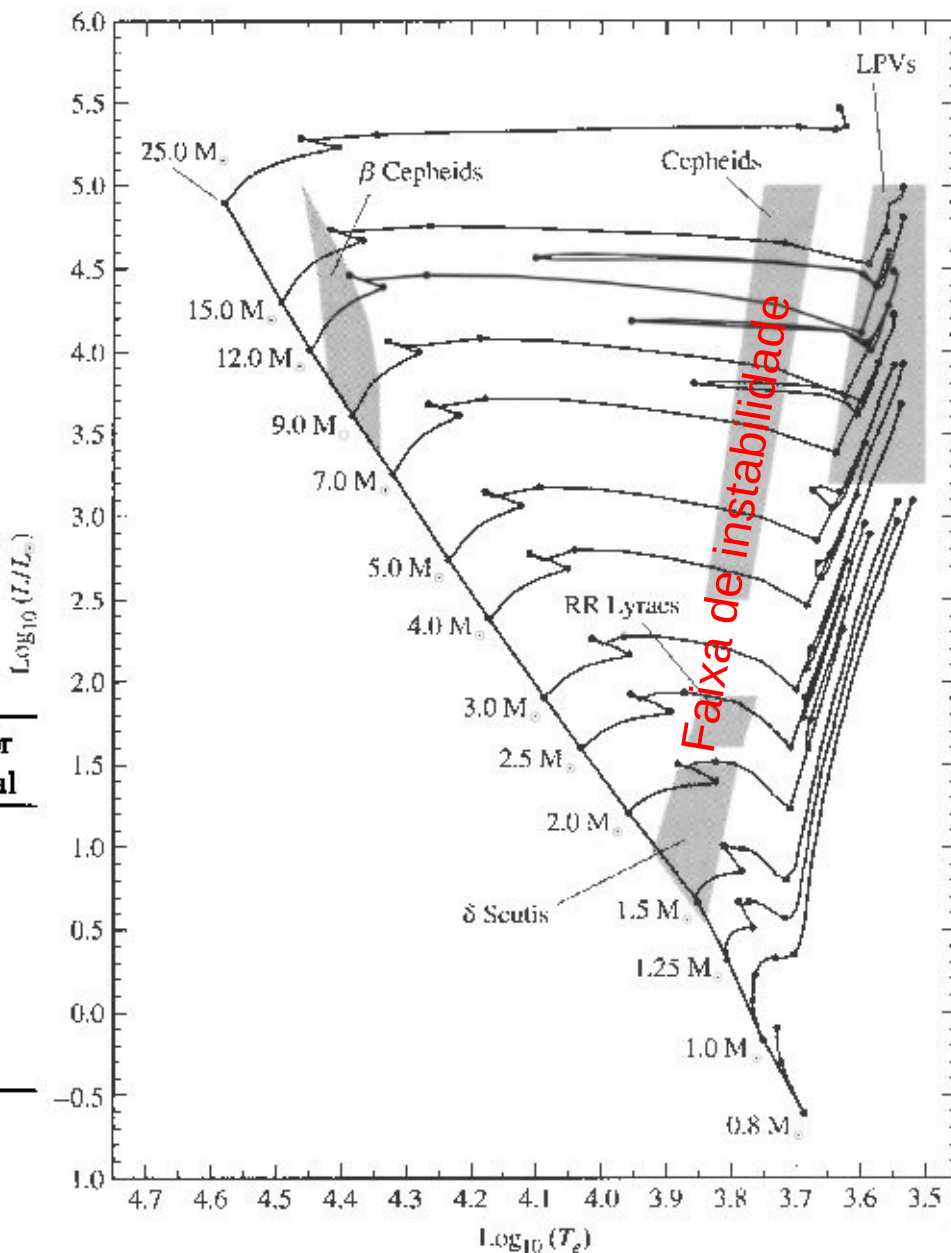
Existem vários tipos de estrelas variáveis, que diferem nos seus **períodos**, nos seus **modos de pulsação** (radial / não-radial), e outras propriedades.

Type	Range of Periods	Population Type	Radial or Nonradial
Long-Period Variables	100–700 days	I,II	R
Classical Cepheids	1–50 days	I	R
W Virginis stars	2–45 days	II	R
RR Lyrae stars	1.5–24 hours	II	R
δ Scuti stars	1–3 hours	I	R,NR
β Cephei stars	3–7 hours	I	R,NR
ZZ Ceti stars	100–1000 seconds	I	NR

Estrelas Variáveis

No **diagrama HR**, muitas variáveis se encontram numa região chamada **Faixa de Instabilidade**, mas algumas são encontradas em outras regiões do diagrama.

Type	Range of Periods	Population Type	Radial or Nonradial
Long-Period Variables	100–700 days	I,II	R
Classical Cepheids	1–50 days	I	R
W Virginis stars	2–45 days	II	R
RR Lyrae stars	1.5–24 hours	II	R
δ Scuti stars	1–3 hours	I	R,NR
β Cephei stars	3–7 hours	I	R,NR
ZZ Ceti stars	100–1000 seconds	I	NR

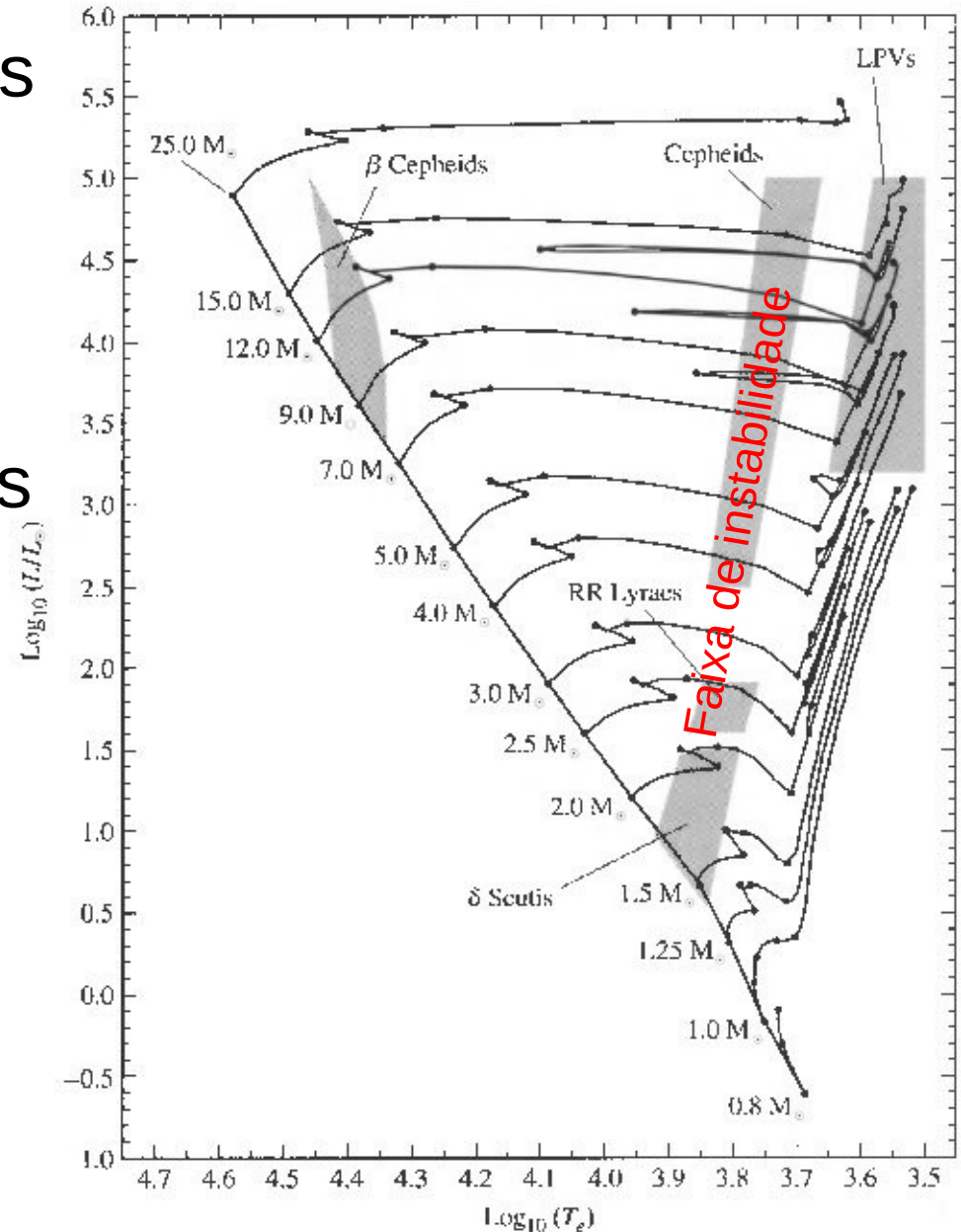


Estrelas Variáveis

Estrelas δ Scutis são estrelas da Sequência Principal ou Subgigantes na Faixa de Instabilidade,

estrelas RR Lyra são estrelas do Ramo Horizontal atravessando a Faixa de Instabilidade,

e Cefeidas, estrelas de massa mais alta na fase de queima de hélio atravessando a faixa, etc.



Estrelas Variáveis

Outras encontram-se em outras regiões do diagrama HR:

β Cefeidas:

Estrelas tipo B na Sequência Principal (ou um pouco pós-SP)

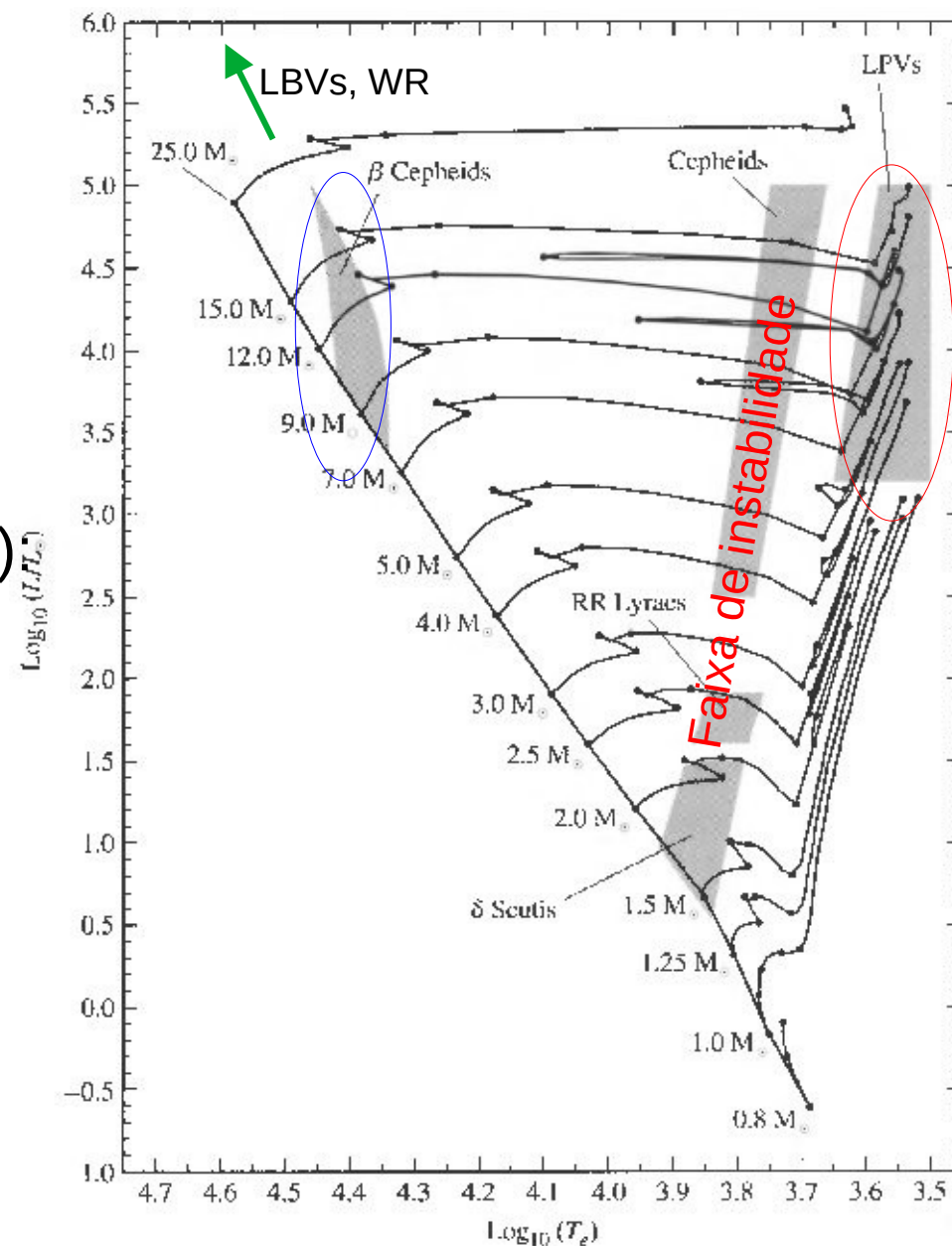
Variáveis de Longo Período (LPVs)

Gigantes Vermelhas, do Ramo Assintótico e Supergigantes vermelhas

Variáveis Azuis Luminosas (LBVs)

e Estrelas Wolf-Rayet (WRs):

Supergigantes azuis com variabilidade não-periódica



Estrelas Variáveis

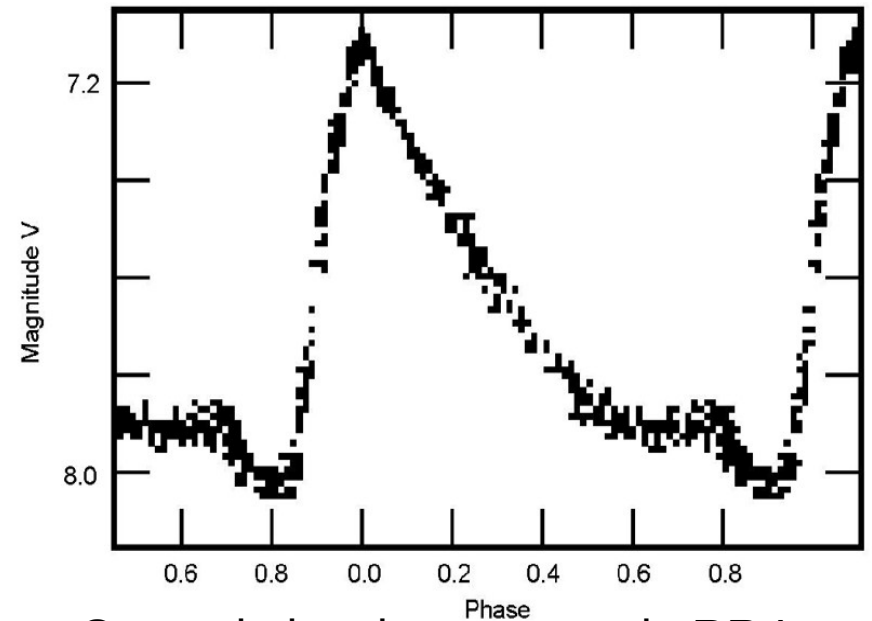
Quando uma **variável** Cefeida ou RR Lyra **pulsa**, a **superfície** da estrela **oscila**

- **gás** dentro da estrela **esquenta** e **esfria** alternadamente

- **Oscilação** da **curva de luz**
- **Mudanças** no **tamanho** e **temperatura** superficial da estrela

- O mecanismo de oscilação foi explicado em 1941 por A. Eddington:

- **Ionização** e **recombinação** periódicas do **gás** nas **camadas** mais **externas** da estrela



Curva de luz de uma estrela RR Lyra

Estrelas Variáveis

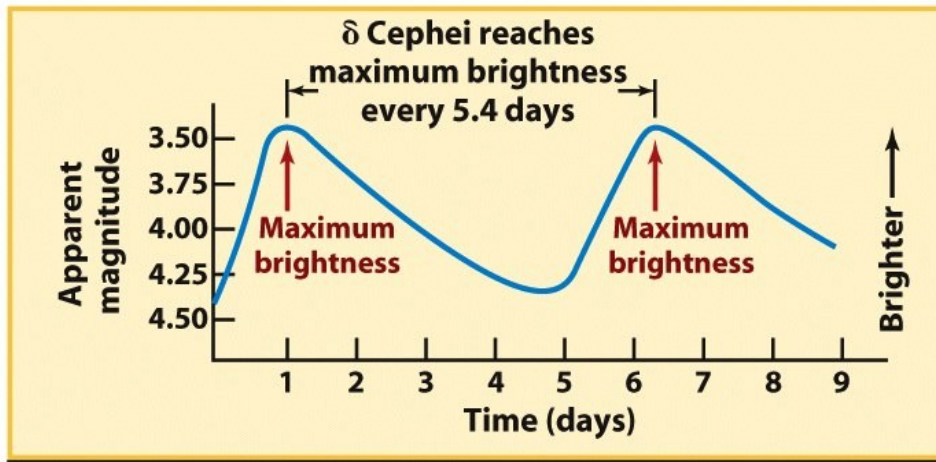
Modelo (Eddington, 1941):

As camadas externas da estrela são mais **opacas** quando **comprimidas** ou no seu **mínimo** de **expansão** (menor raio), também pelo fato que nesta fase, boa parte do gás é **ionizado**.

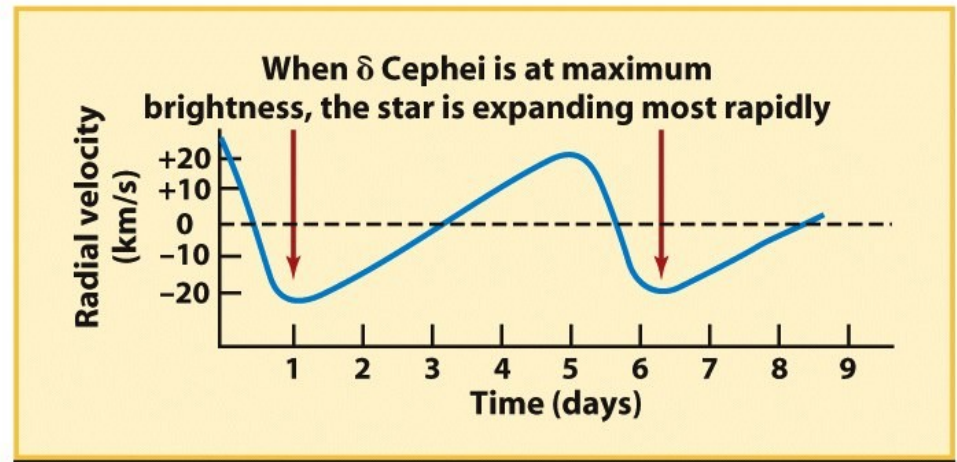
- Quando a estrela é **comprimida**, **fótons** empurram a superfície da estrela para **fora** até o ponto onde esta não é mais suportada pela **pressão** de **radiação**. a **recombinação** dos átomos também ajuda para eles não serem mais empurrados pela radiação.
- Neste momento a superfície volta a **cair**, pela força da **gravitação**, para dentro da estrela, e se completa um ciclo de pulsação para se iniciar o próximo.

Estrelas Variáveis

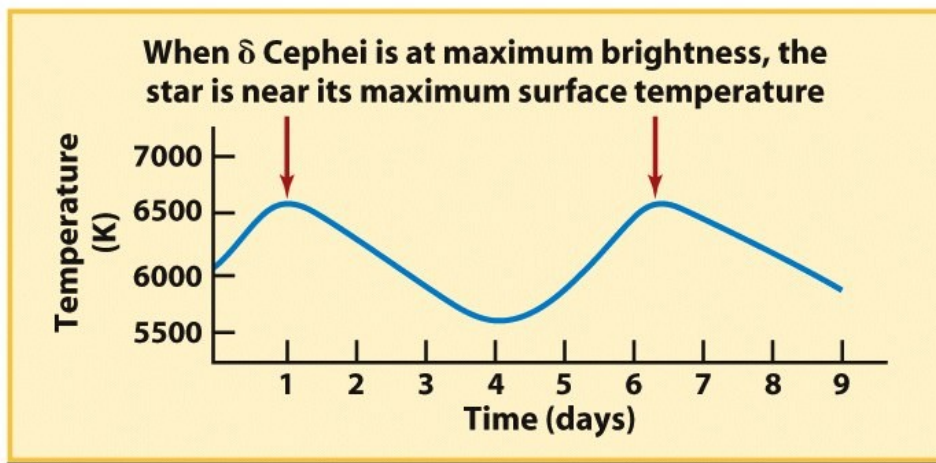
As Propriedades de Cefeidas em Função do Tempo



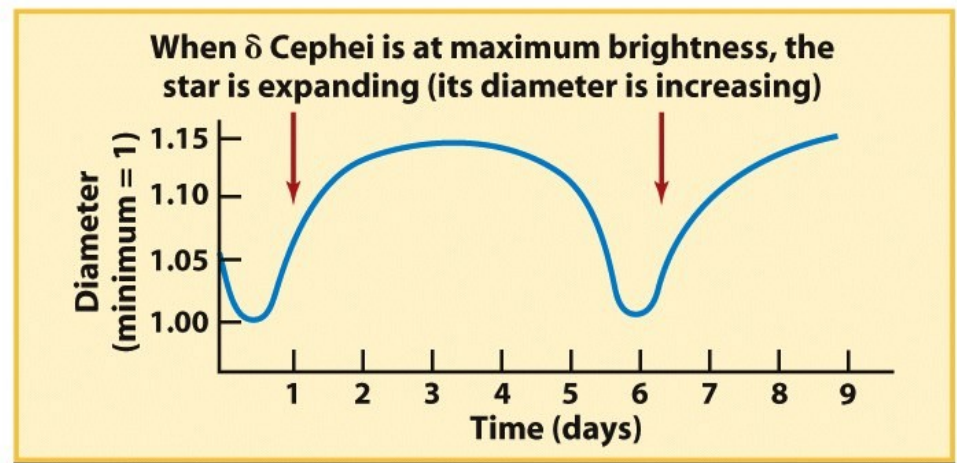
(a) The light curve of δ Cephei (a graph of brightness versus time)



(b) Radial velocity versus time for δ Cephei (positive: star is contracting; negative: star is expanding)



(c) Surface temperature versus time for δ Cephei



(d) Diameter versus time for δ Cephei

Estrelas Variáveis

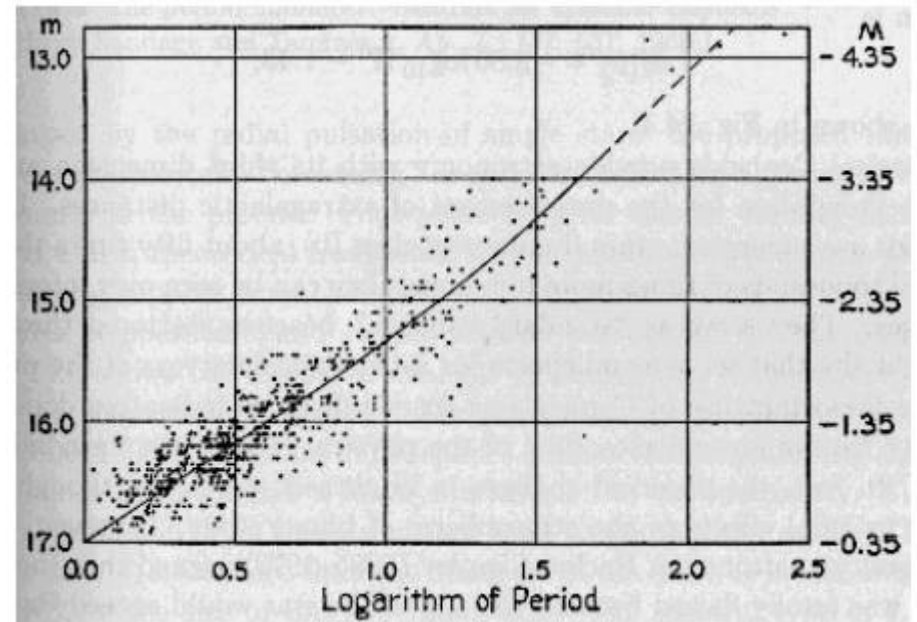
Cefeidas: Relação período-luminosidade

O **período** de pulsação das Cefeidas é **proporcional** à sua **luminosidade intrínseca** (1912, Henrietta Leavitt; $\langle \rangle$ = mediada sobre um período da oscilação; Π [d] é o período medido em dias):

$$\log_{10} \langle L \rangle / L_{\odot} = 1.15 \log_{10} \Pi[d] + 2.47,$$

ou, traduzido em magnitudes:

$$M_{\langle V \rangle} = -2.81 \log_{10} \Pi[d] - 1.43$$



Estrelas Variáveis

Cefeidas: Relação período-luminosidade

Na verdade, existem dois tipos de Cefeidas:

- Cefeidas Clássicas” ou tipo I: ricas em metais
- “W Virginis” ou tipo II: pobres em metais

Os dois tipos têm diferentes relações período-luminosidade.

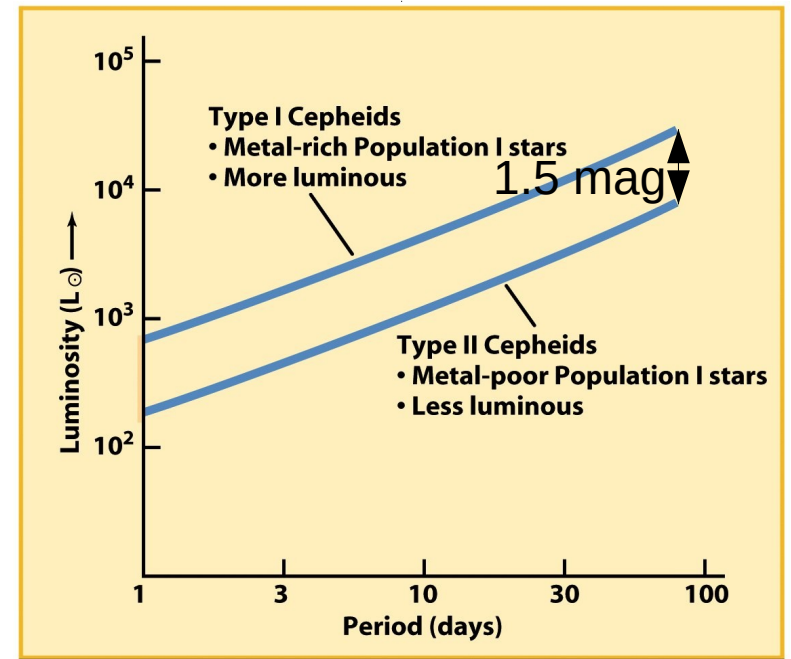


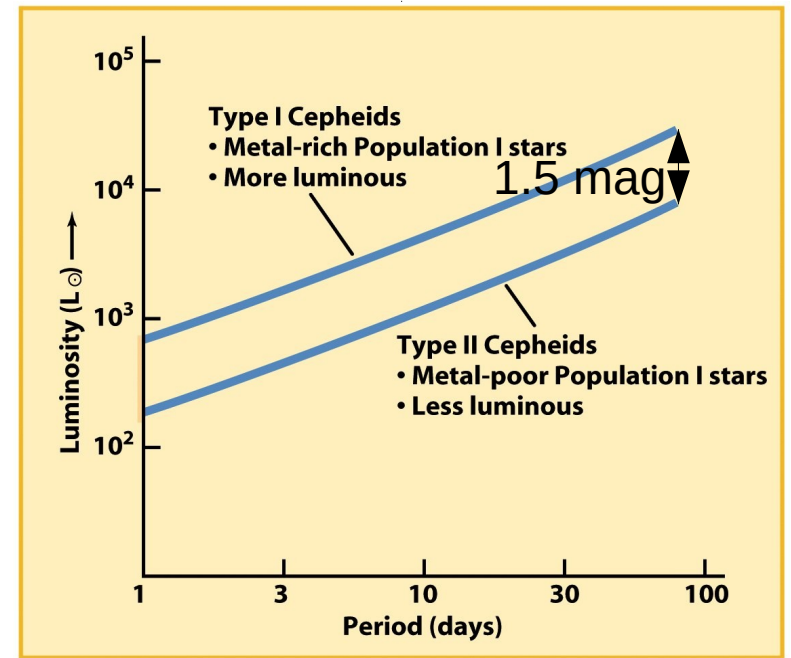
Figure 19-19
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Estrelas Variáveis

Cefeidas: Relação período-luminosidade

Estas relações podem ser utilizadas para determinar a **distância**.

=> Medir a **abundância de metais** (usando linhas espectrais), e o **período**, obtemos a **luminosidade intrínseca**, e, então a magnitude absoluta



Uma Cefeida com período e metalicidade determinados é uma **vela padrão**, e pode ser usado para determinação da **distância** (=> aulas conceitos básicos da astronomia).

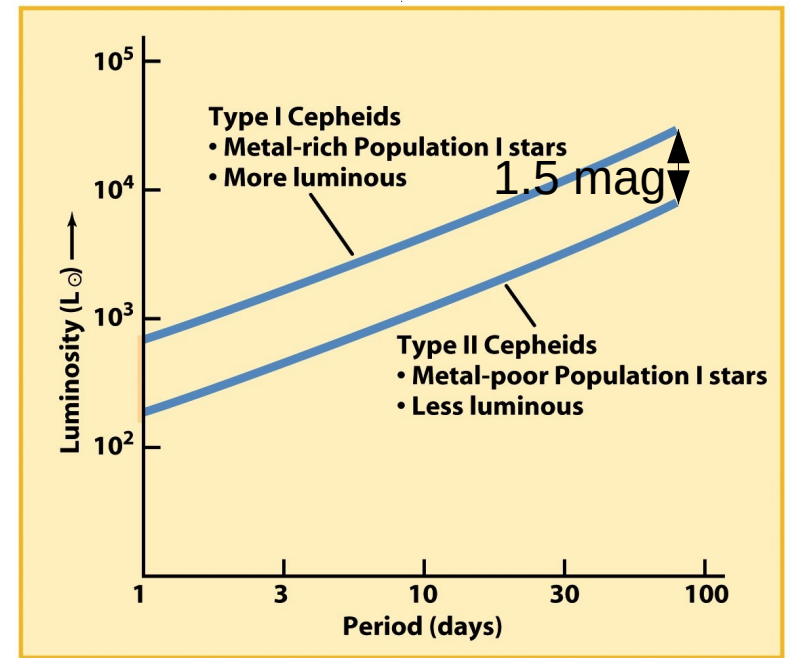
Estrelas Variáveis

Cefeidas: Relação período-luminosidade

Combinando esta magnitude absoluta com a **magnitude aparente** (também medida), obtemos o **módulo de distância**:

$$m - M = 5 \cdot \log_{10} (d/10 \text{ pc})$$

As distâncias até Cefeidas tiveram um papel importante na descoberta que o Universo consiste de mais que a Via Láctea (Edwin Hubble, 1923; => Noções de Astronomia e Cosmologia, Introdução à Cosmologia).



A Relação Período-Densidade

O que podemos aprender do Período de Oscilação?

As oscilações radiais são o resultado de ondas de som propagando-se no interior da estrela.

Usando a condição do equilíbrio hidrostático da aula Interior das Estrelas, e tomando a densidade como constante:

$$dP/dr = -G \cdot M_r \rho / r^2 = -G \cdot (4/3 \pi r^3 \rho) \rho / r^2 = -4/3 \pi G \rho^2 r$$

Conseguimos determinar a pressão em r , integrando da superfície ($r = R$, $P = 0$), até r :

$$P(r) = \int_R^r -4/3 \pi G \rho^2 r' dr' = 2/3 \pi G \rho^2 (R^2 - r^2)$$

A Relação Período-Densidade

O que podemos aprender do Período de Oscilação?

O **período** da oscilação é o tempo que uma onda de som leva para **atravessar** a estrela (ou ir ida e volta do centro até a superfície):

$$\Pi \approx 2 \int_0^R dr / v_s,$$

Onde v_s é a **velocidade** do **som** que determinamos na mesma aula: $v_s = \sqrt{\gamma P / \rho} = \sqrt{2/3 \gamma \pi G \rho (R^2 - r^2)}$

$$\Rightarrow \Pi \approx 2 \int_0^R \frac{1}{\sqrt{2/3 \gamma \pi G \rho (R^2 - r^2)}} dr = \sqrt{6/\gamma \pi G \rho} \int_0^R \frac{1}{\sqrt{R^2 - r^2}} dr$$
$$_{FUUV} = \sqrt{6/\gamma \pi G \rho} [\text{sen}^{-1} r/R]_0^R = \sqrt{6/\gamma \pi G \rho} \cdot (\pi/2 - 0) = \sqrt{3\pi/2\gamma G \rho},$$

inversamente proporcional à raiz da densidade da estrela.

A Relação Período-Densidade

O que podemos aprender do Período de Oscilação?

$$\Pi \approx \sqrt{3\pi/2\gamma G\rho}$$

Obviamente, a hipótese da densidade constante não é muito realista, mas qualitativamente, o resultado é válido: O **período diminui** com a **densidade**.

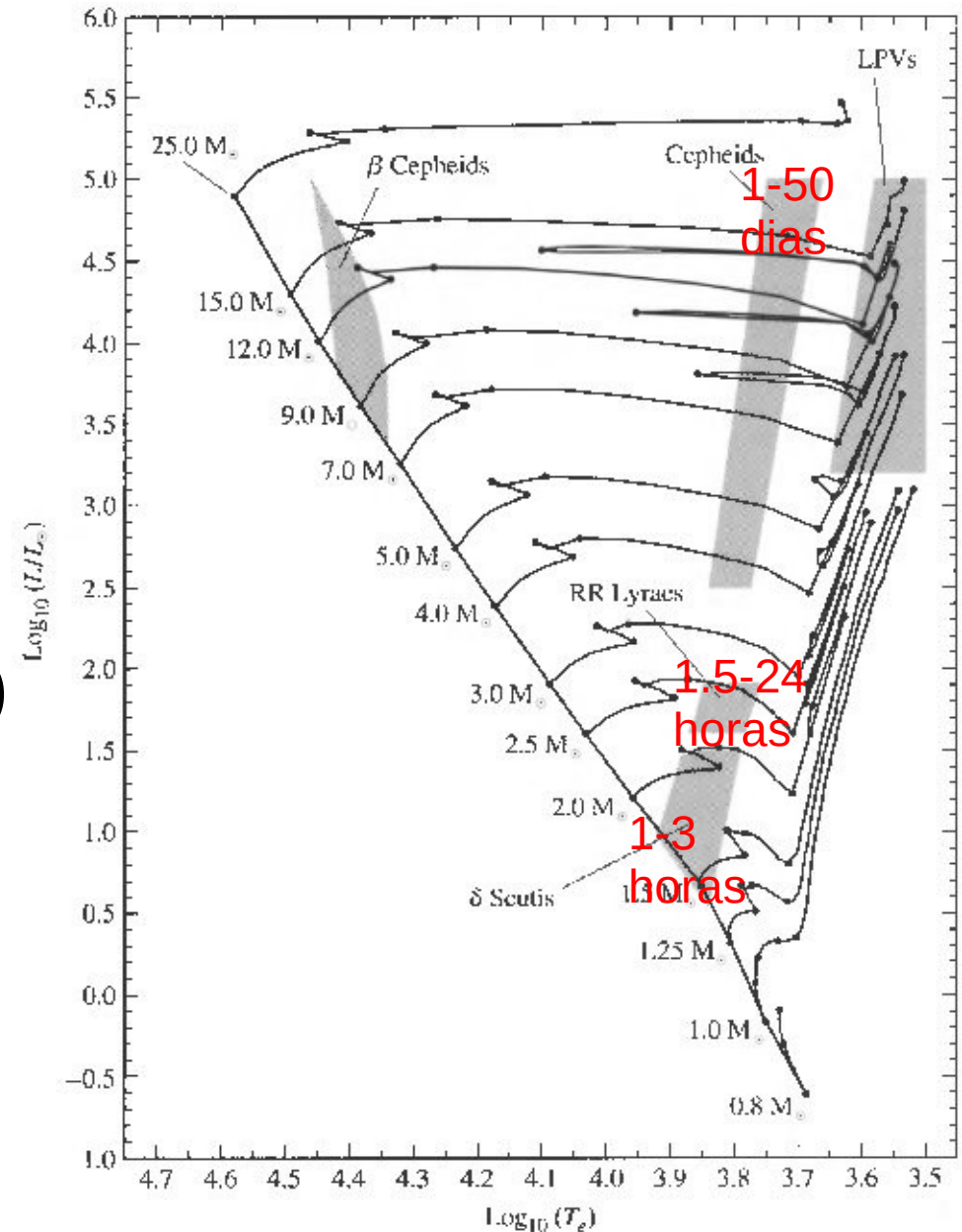
Até quantitativamente não está tão ruim:

Tomando valores típicos para cefeidas, $M = 5 M_{\odot}$ e $R = 50 R_{\odot}$, obtemos 10 dias, o que cai bonitinho na faixa de períodos medidos para cefeidas clássicas.

A Relação Período-Densidade

O que podemos aprender do Período de Oscilação?

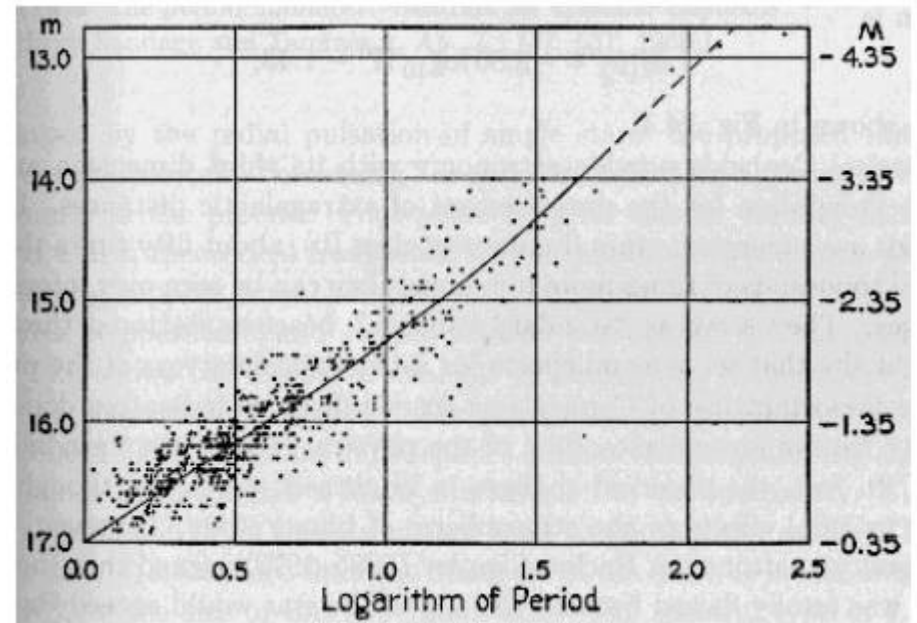
Isto explica, por que o período **diminui** ao longo da **faixa de instabilidade de cima** (onde estão as tênues gigantes) **para baixo** (as mais densas anãs) e até mais para baixo (as ainda mais densas Anãs Brancas pulsantes, não mostradas neste diagrama)



A Relação Período-Densidade

O que podemos aprender do Período de Oscilação?

Um exemplo disto é a
relação período-luminosidade
das cefeidas.



A Relação Período-Densidade

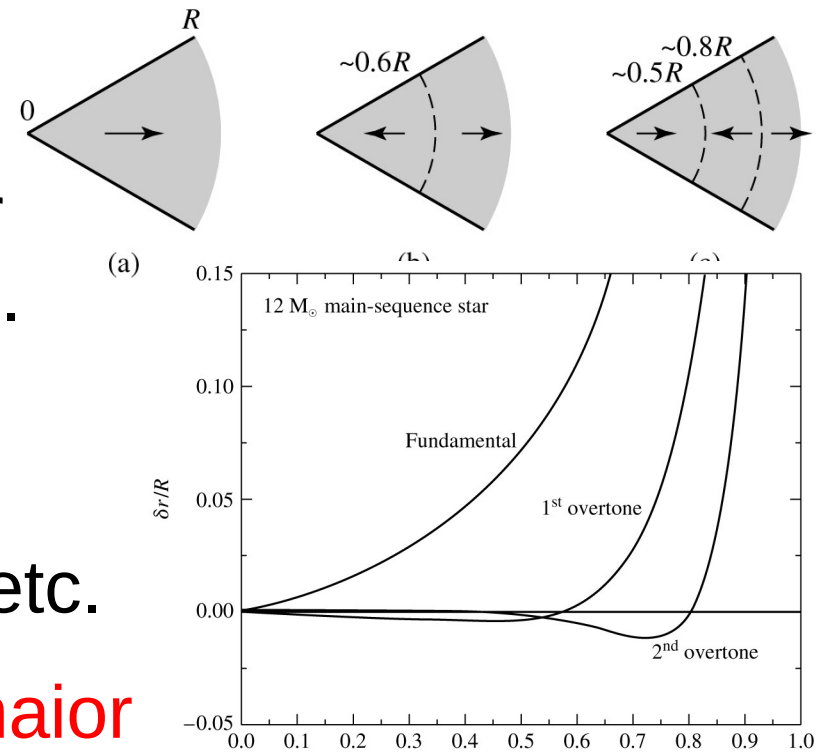
O que podemos aprender do Período de Oscilação?

Estas ondas de som radiais são **ondas estacionárias**, e têm um nó no centro da estrela.

A, daquela acabamos de calcular o período, é o **modo fundamental**.

O **segundo harmônico** tem uma "esfera nodal" em $r = \sim 0.6 R$,
O **terceiro** tem 2 esferas nodais, etc.

A **amplitude** das oscilações é o **maior** na **superfície** da estrela.



Deslocamento fracional do material em relação à posição de equilíbrio em função da distância até o centro, normalizado em $r = R$

A Relação Período-Densidade

O que podemos aprender do Período de Oscilação?

A grande maioria das **Cefeidas** clássicas e das estrelas **W Virginis** pulsam no **modo fundamental**,

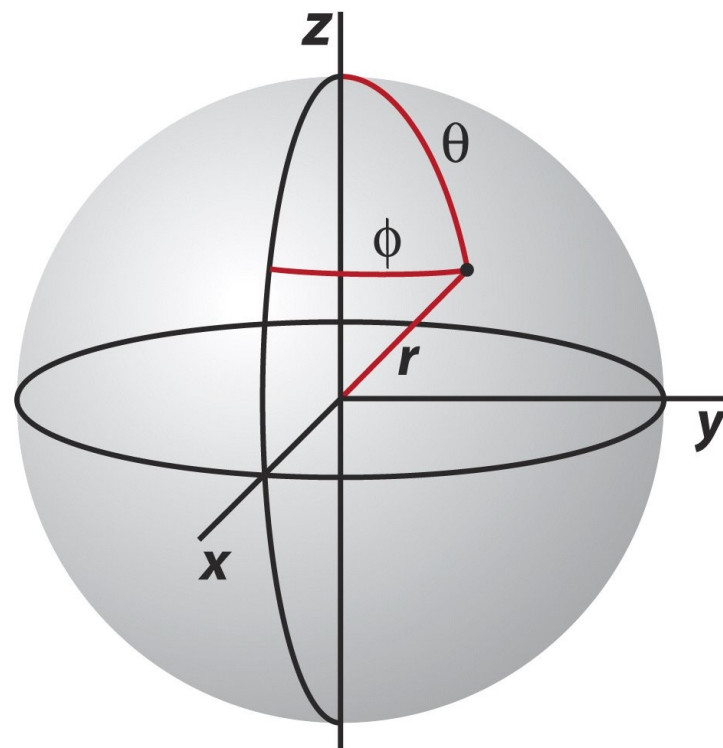
as **RR Lyrae**, no **fundamental** ou no **segundo harmônico**, algumas simultaneamente nos dois,

e as de **longo período** como as **Miras**, também em **um dos dois** e estas possivelmente podem **oscilar** entre os dois modos, mas isto ainda é assunto de estudos.

Pulsações Não-Radiais

Algumas estrelas não pulsam (só) de modo radial, mas (também) de modo **não-radial**, isto é, material se desloca em **direções paralelas à superfície** da estrela, assim **regiões** da superfície **expandem**, enquanto outras **se contraem**.

Assim, os **deslocamentos** serão **funções** não apenas da coordenada radial r , mas também das **coordenadas angulares** θ e ϕ .

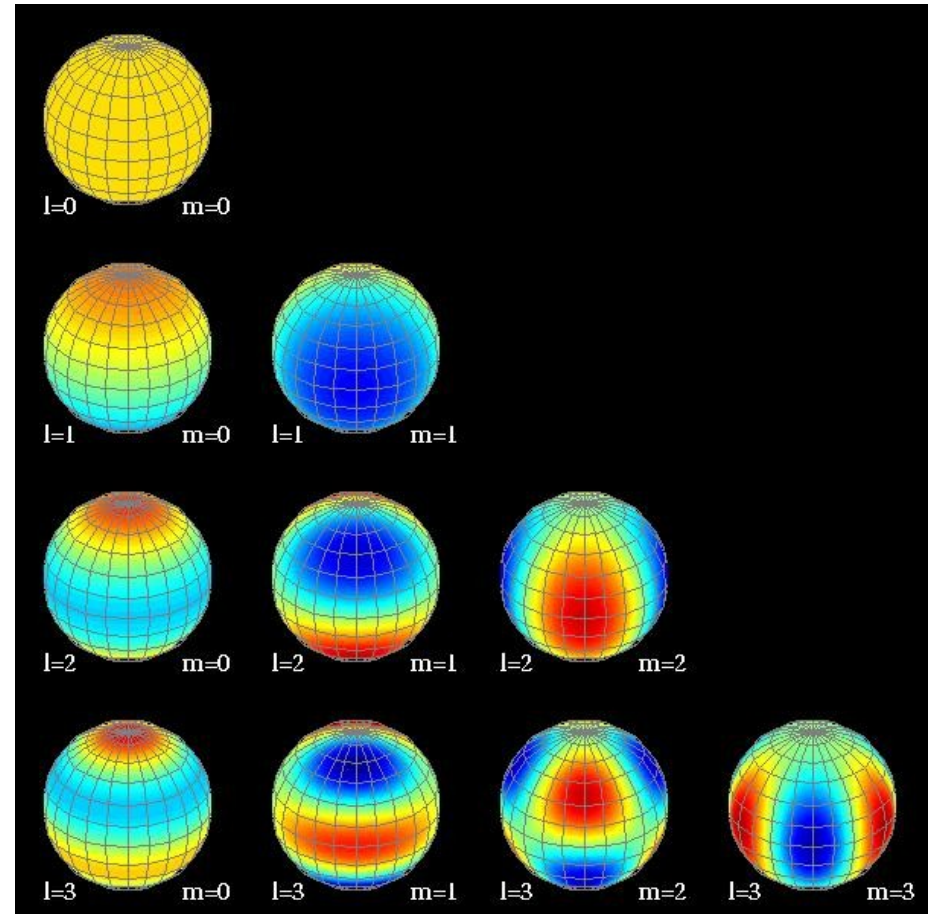


Pulsações Não-Radiais

Os **padrões** destes **deslocamentos** podem ser descritos por funções chamados **harmônicas esféricas**:

$$Y_{lm}(\theta, \varphi),$$

que vocês conhecem de Física Quântica (parte angular da função de onda do elétron no átomo de hidrogênio).



Não vamos entrar em detalhes. Para quem quer saber mais: No capítulo 14 do Carroll e Ostlie há muito mais material sobre estrelas variáveis e suas pulsações radiais e não-radiais.

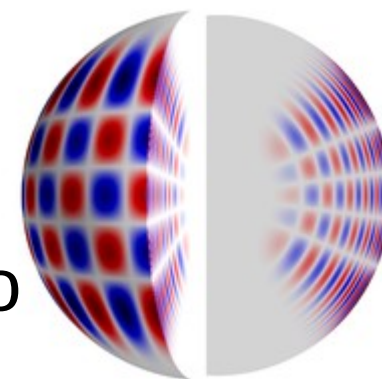
Estrelas Variáveis

As **pulsações observadas** (seus **períodos**, **amplitudes** e **curvas de luz** e **velocidade radial**) ajudam a saber mais sobre o **interior** das estrelas, similar à maneira, como a propagação de ondas sísmicas pela Terra fornecem informações sobre a estrutura no interior do nosso planeta.

=> **Asterossismologia** ou **Astrossismologia**.

No caso do **Sol** (onde conseguimos observar as ondas se propagando pela superfície com uma certa resolução espacial) chamamos isto **Hélio-sismologia**.

Exemplo: um modo de oscilação não-radial do Sol, com período de 5 min ajudou a estudar uma camada da zona de convecção a baixo da fotosfera.





Universidade Federal do ABC

Introdução à Física Estelar

FIM PRA HOJE

