

O papel de Aglomerados de Estrelas e de Estrelas Variáveis no contexto da **Evolução Estelar**

Sandra dos Anjos

IAG/USP

Aglomerados de Estrelas

...um caminho especialmente útil para estudar os efeitos da evolução das estrelas em diferentes estágios de suas vidas

2 tipos de aglomerados:

Aglomerados abertos ou galáctico, presentes em discos de galáxias espirais contendo estrelas jovens

- exemplos: Plêiades, Hyades.

Aglomerados globulares, presentes em halos de galáxias contendo estrelas

- exemplos: M3, M5, Centauro.



Aglomerados Abertos: estrelas jovens

Estrelas nascem em grupos
e no disco de galáxias espirais

- Ex: Aglomerado das Plêiades: ~ 3000 estrelas, 125 pc de distância, 4 pc de diâmetro, ainda se vê o gás em volta das estrelas

Aglomerados Globulares:

estrelas que nasceram juntas na fase inicial de formação da Galáxia...
são, portanto, objetos mais velhos que os aglomerados abertos



M 3



M13

100 mil ~ 1 milhão de
estrelas

~50-100 pc de diâmetro

Encontrados no halo da
Galáxia.

Há 158 conhecidos na
Galáxia.

Importância dos Aglomerados de Estrelas nos Estudos de Evolução Estelar

Assume-se que as estrelas foram formadas todas juntas e que estão gravitacionalmente ligadas orbitando um centro de massa comum. Têm, portanto, a **mesma idade**, a **mesma composição química inicial**, pois foram formadas a partir do mesmo MIS

Devido ao tamanho do aglomerado ser sempre menor do que a distância ao aglomerado, assume-se que as estrelas do aglomerado estão a **mesma distância da Terra**

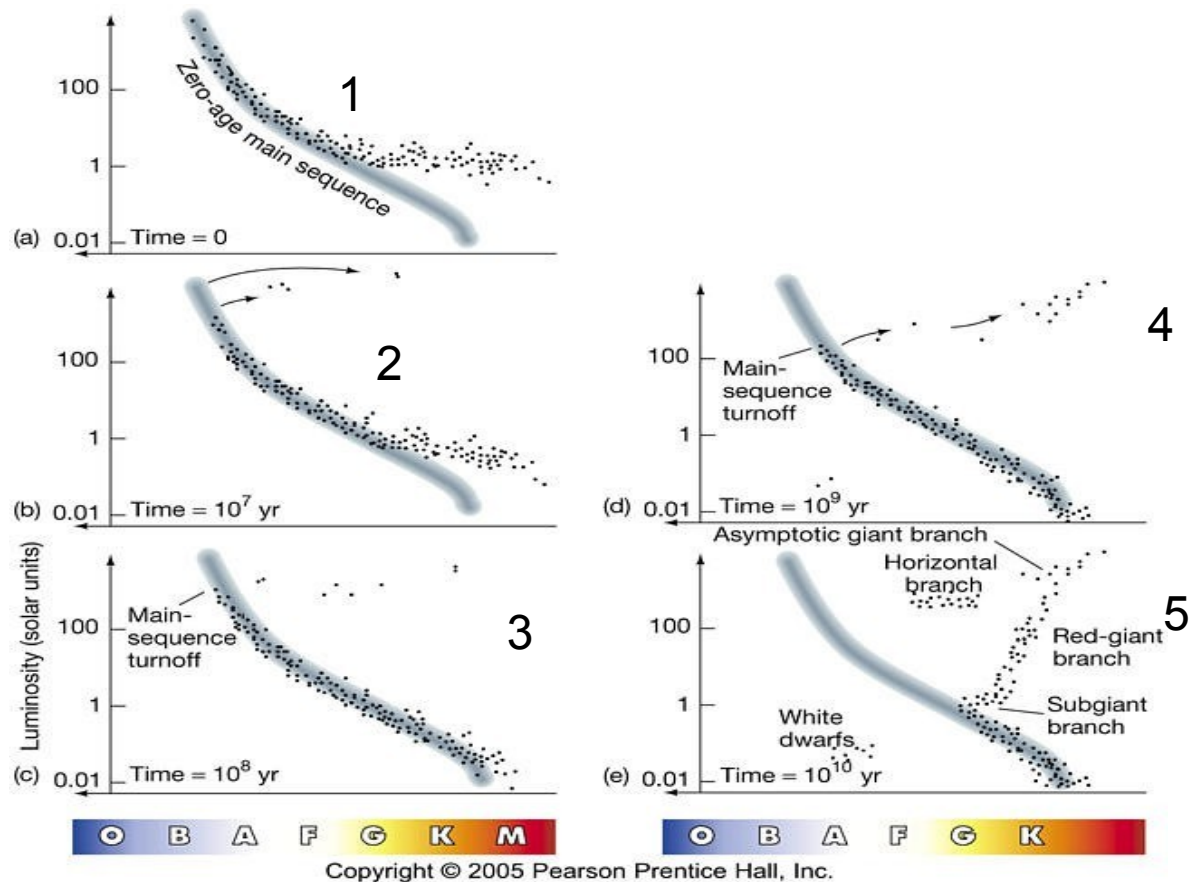
Estando as estrelas a **mesma distância**, a construção do Diagrama H-R (DH-R) de aglomerados é útil pois pode-se construir o diagrama utilizando-se a **magnitude aparente (V)** para indicar a luminosidade e o **Índice de Cor (B-V)** – **Diagrama Cor-Magnitude** e estimar a **idade**

Como estrelas em aglomerados possuem massas diferentes elas estão também em estágios diferentes de evolução. Estes diferentes estágios estão relacionados a mudanças nas condições físicas da vida de uma estrela causados pelos ciclos de exaustão de combustível e podem ser inferidos a partir das posições ocupadas por estas estrelas no D-HR.

Mudança de um diagrama HR com a idade do aglomerado é um instrumento poderoso para a construção de modelos de evolução estelar.

...vamos dar uma olhada a seguir vendo os D-HR destes objetos...

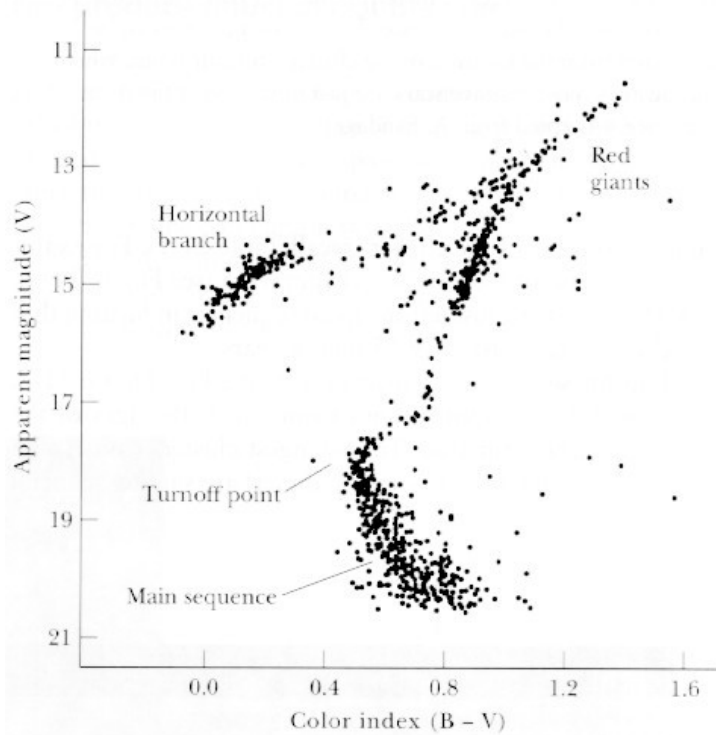
A Figura mostra o traçado evolutivo de estrelas de baixa massa no D-HR, Mostrando: (1)- a saída na SP; (2)- a posição das estrelas que evoluem mais rápido indo em direção ao ramo das gigantes; (3)- a saída da SP, o *ponto de "turnoff"- indica a idade; (4) ramo horizontal; (5)- terminando como anã branca



*Ponto de “**turnoff**” → ponto onde a SP termina e de saída das estrelas da SP devido a exaustão do H

Diagrama Cor-Magnitude do Aglomerado Globular M13

O que podemos inferir sobre a evolução deste aglomerado baseado neste diagrama ?



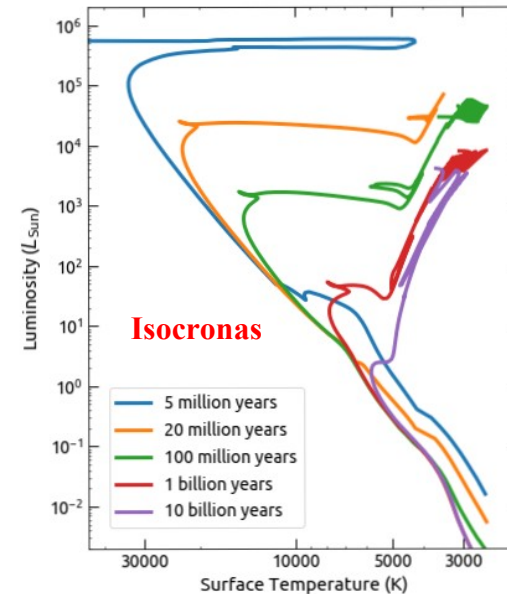
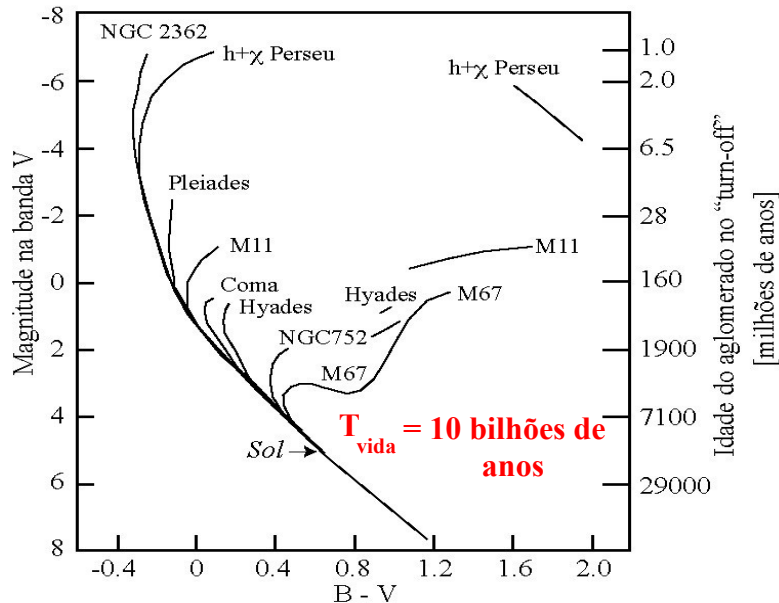
1- Na SP aparecem estrelas somente na porção inferior do Diagrama, indicando que existem ainda estrelas de massa intermediária ou baixa

2- As estrelas mais azuis do que o ponto de “**turnoff**” já exauriram seu hidrogênio nuclear e evoluíram para o Ramo das Gigantes ou Supergigantes

Ponto de “**turnoff**” → ponto de saída das estrelas da SP, devido a exaustão do H.

Comparação dos Diagrama H-R de Aglomerados Globulares

...comumente graficado em termos da magnitude aparente e índice de cor



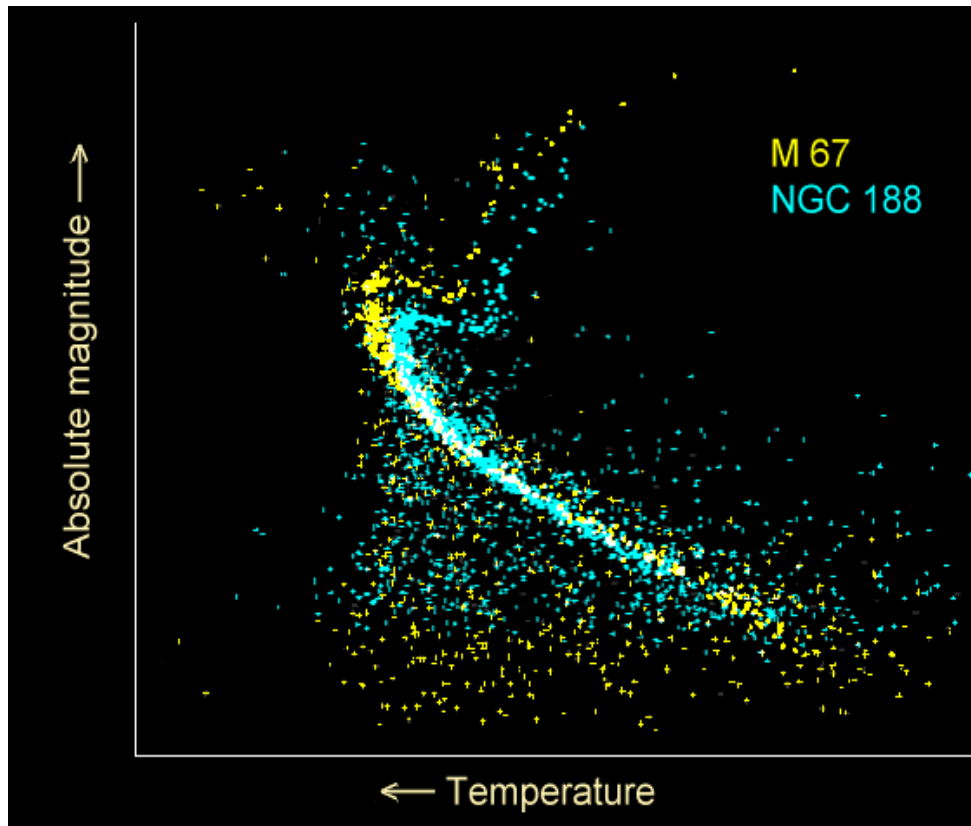
Evolução depende da Massa, portanto, as mais massivas saem mais cedo da SP ocupando a região da gigantes e supergigantes

Quanto **mais velho** o aglomerado, maior é **ausência de estrelas na parte superior da SP** e maior o número de estrelas Gigantes e Supergigantes na porção superior direita do D-HR

A partir da estimativa da magnitude aparente de estrelas em dois filtros (B e V) é possível posicioná-las no Diagrama-HR e estimar a idade comparando-as a “**isócronas**” - curvas teóricas correspondentes a diferentes idades.

Diagrama H-R de Aglomerados Globulares

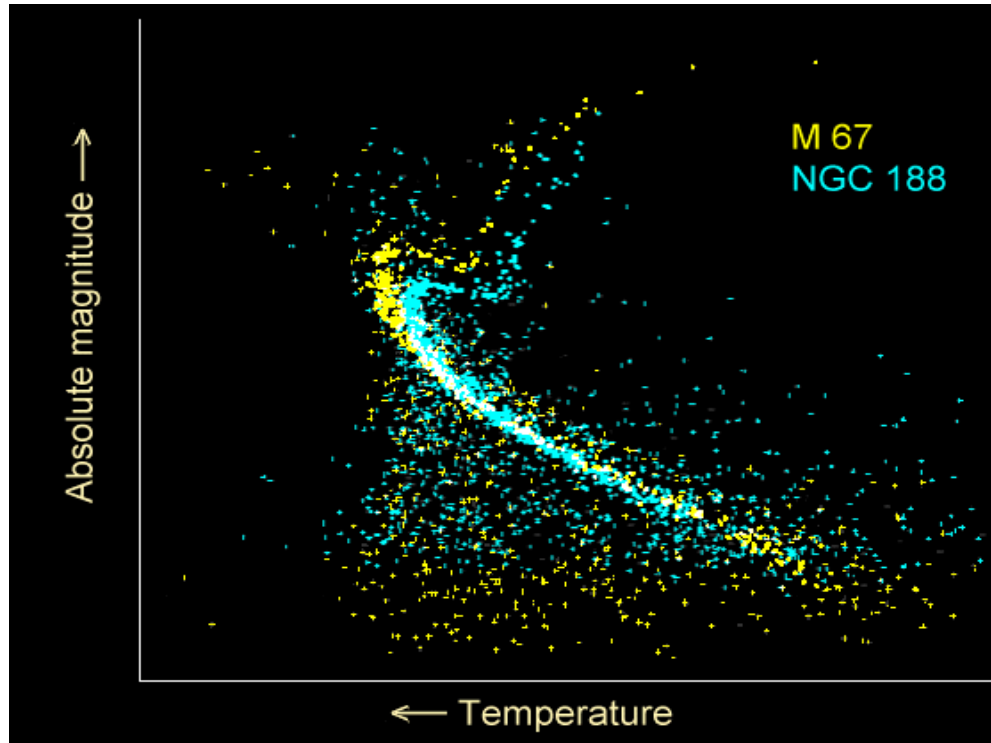
...a comparação dos aglomerados permite dizer qual deles é mais velho ou mais jovem



Qual destes aglomerados é mais velho?

(lembre-se: quanto menor a temperatura na Sequência Principal, menor a massa e maior o tempo de vida)

Diagrama H-R p/ aglomerados



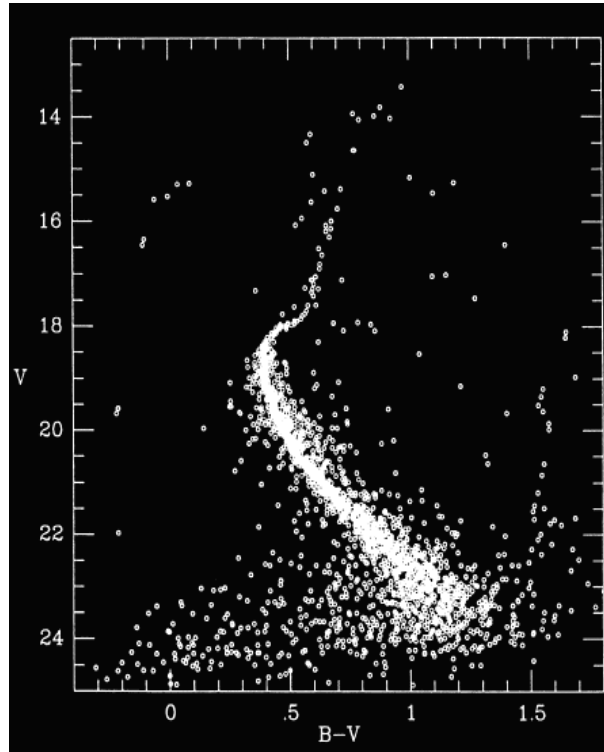
Para M 67 a idade é estimada entre 2 e 3×10^9 anos.

Para NGC 188, a idade estimada é de $3,6 \times 10^9$ anos.

DH-R de M92

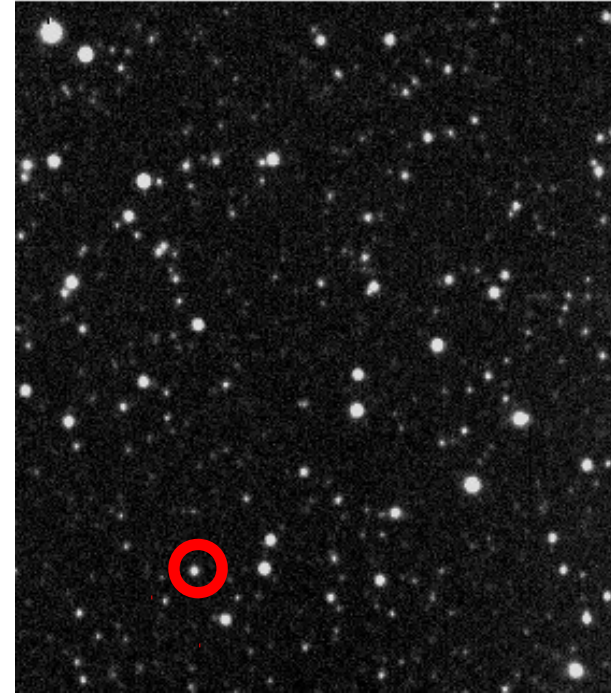
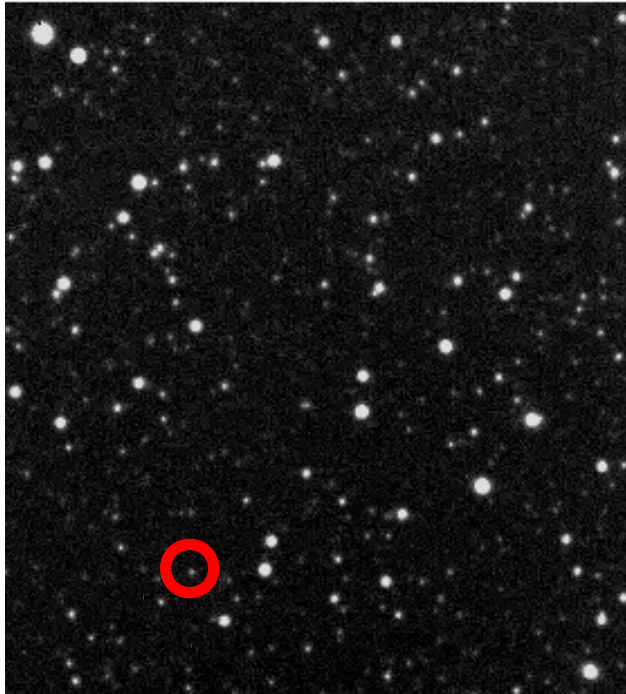


Tipo espectral	B-V	Idade (10^9 anos)
O	-0.4	<0.001
B	-0.2	0.03
A	0.2	0.4
F	0.5	4
G	0.7	10
K	1.0	60
M	1.6	>100



O aglomerado globular M92, em Hércules, é mais velho que as Hyades.

Muito comum em aglomerados são as Estrelas Variáveis



Pode-se observar nas figuras acima que uma das estrelas deste campo tem **Luminosidade Variável**

Existem várias classes de estrelas variáveis. Uma de interesse particular são as estrelas Variáveis Pulsantes, que devido a correlação entre período-luminosidade (R-PL) permite estimar sua distância.

(cuidado! Não confundir com pulsares!!)

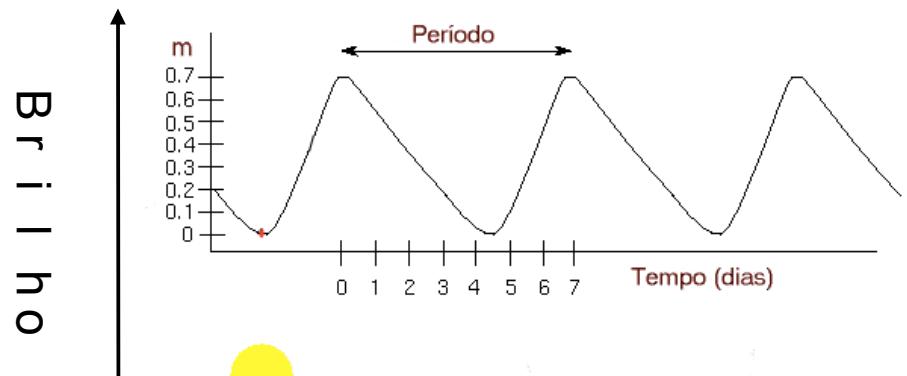
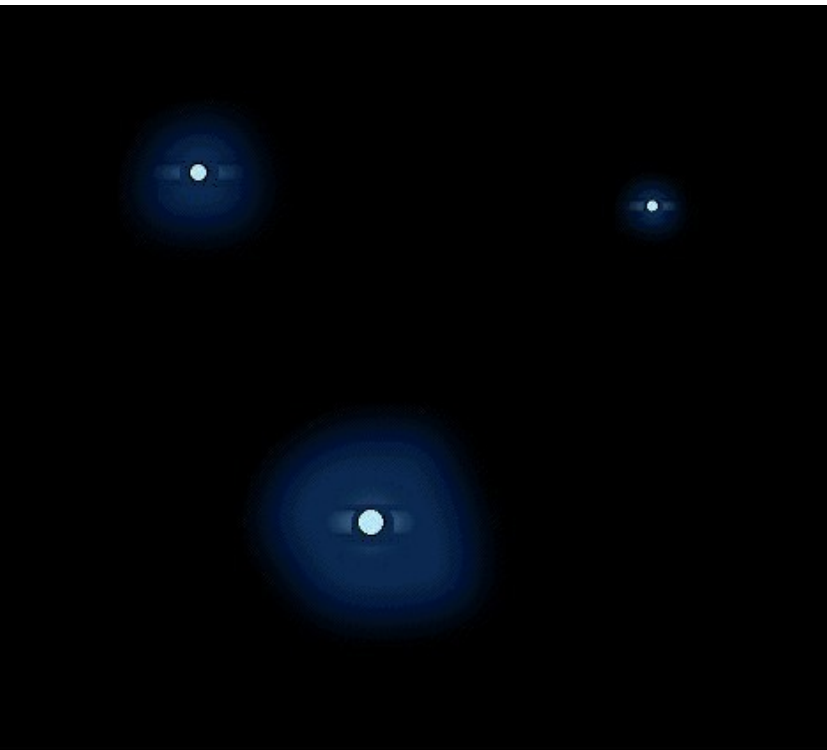
Estrelas Pulsantes

...classe de estrelas com variabilidade extrínseca e intrínseca

Algumas estrelas quando saem da SP passam períodos de fases de instabilidades periódicas variando a sua luminosidade.

→ **Variabilidade extrínseca:** variam por razões mecânicas (ex: rotação).

→ **Variabilidade intrínseca:** variam suas propriedades físicas periodicamente (L, raio e temperatura). São internamente instáveis.



Estrelas Pulsantes

...localização no D-HR

Faixa de instabilidade:

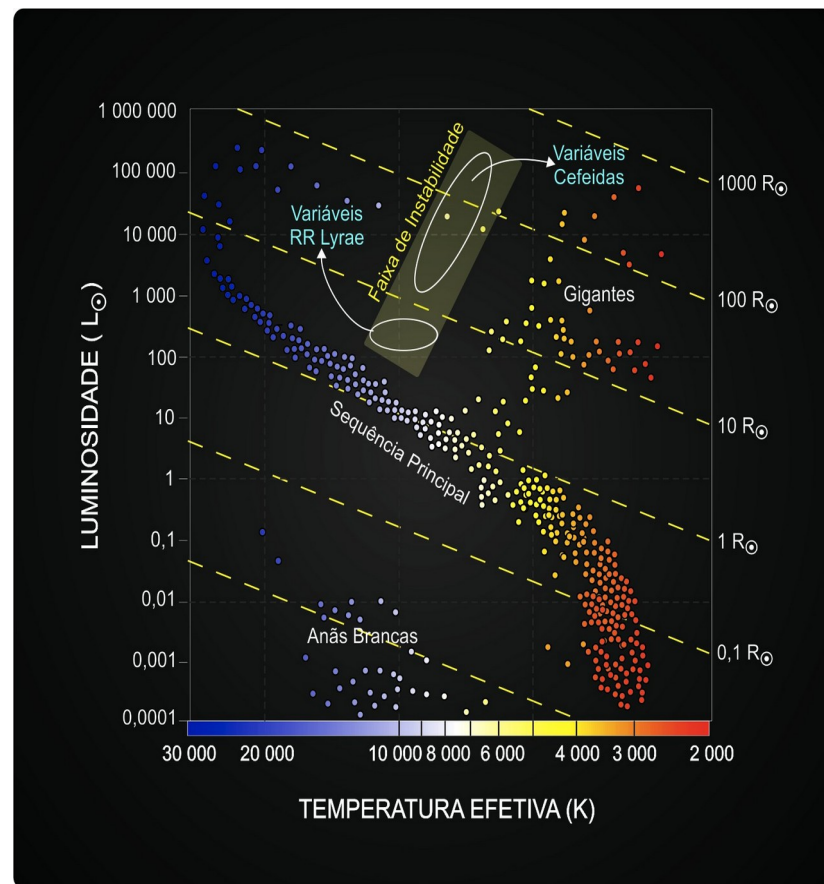
- Entre a SP e as gigantes vermelhas.
- Estrelas nesta região pulsam regularmente.

* **Cefeidas** (SG- K e F): variáveis pulsantes de **alta massa** e período de pulsação entre 1 e 100 dias; amplitude de pulsação: 0,3 → 3,5 mag

* **RR Lyrae** (B8 e F2): variáveis de **baixa massa** e período de pulsação curto (menos que um dia). Amplitude de pulsação menor que 1 mag. Comuns em aglomerados globulares

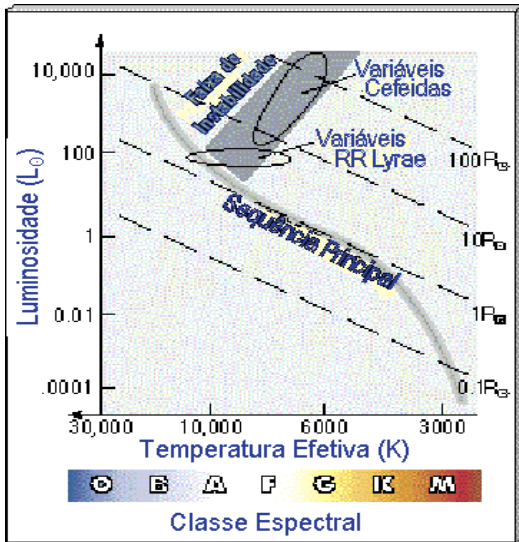
Variáveis de longo período

(~ 1 ano).



Cefeidas e RR Lyrae

...o mecanismo físico da oscilação foi explicado por A. Eddington



Quando uma variável Cefeida ou RR Lyrae **pulsa** a fotosfera da estrela oscila como uma mola.

A pulsação está relacionada com a expansão e contração do envelope e é a causa da variabilidade da luz.

Estas estrelas estão na **fase de queima de He → C no núcleo**

No **envelope** ocorre expansão e contração do envelope

Pulsa porque?

Quando raio está menor: E_c é maior → T é maior → ioniza o H → aumenta o número de partículas (n) → aumenta pressão (P) → **aumenta raio → envelope estende e esfria** →

Quando raio está maior: T diminui → ocorre recombinação do H (H se liga ao átomo) → n diminui → P diminui → envelope se contrai → T aumenta → ...e o ciclo recomeça !

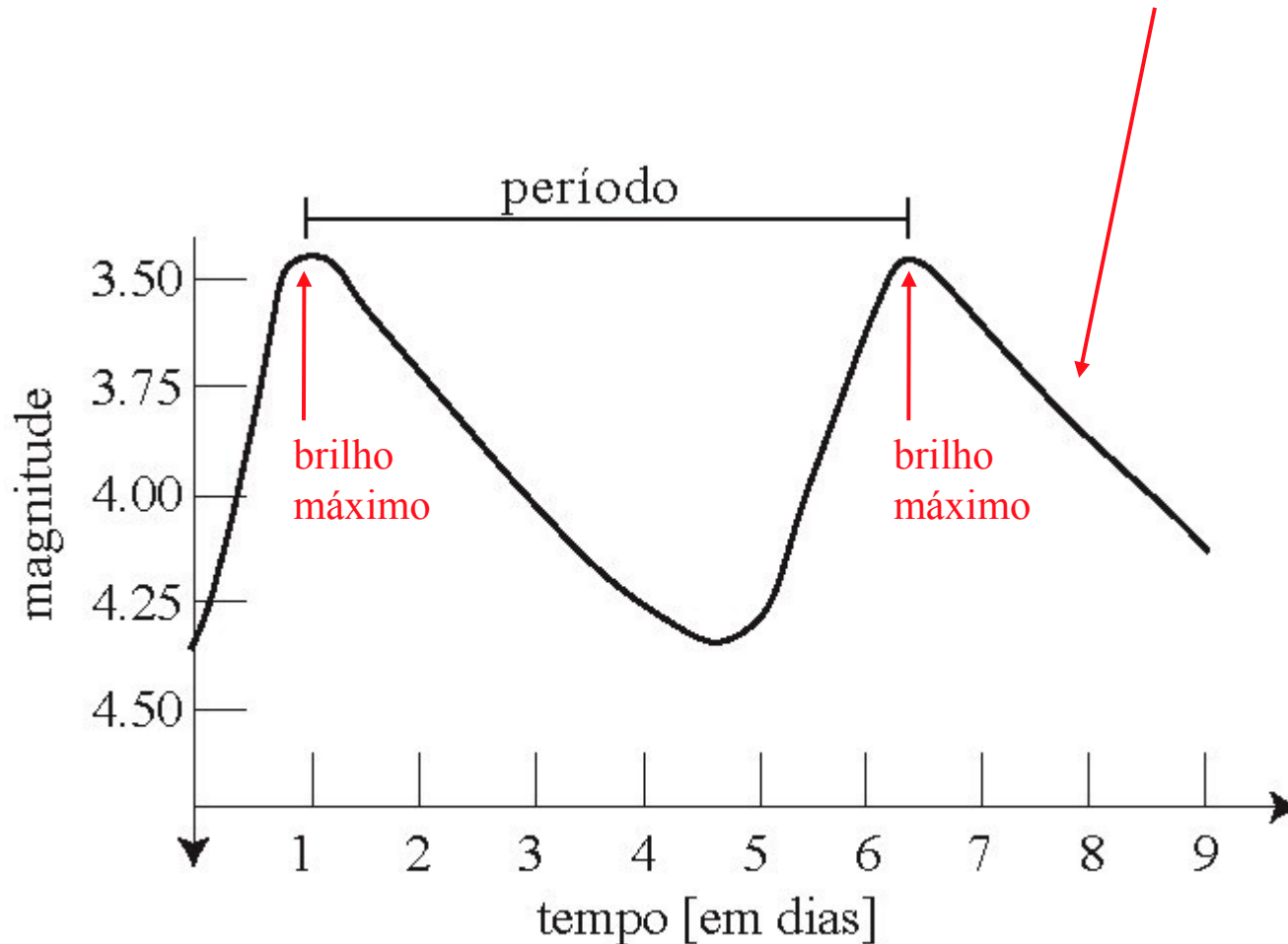
O processo funciona como uma válvula.

Consequência: o gás dentro da estrela esquentando e esfriando alternadamente!

Quando esta oscilação é observada e medida pode ser representada por uma **Curva de Luz**, como se observa a seguir

Cefeidas

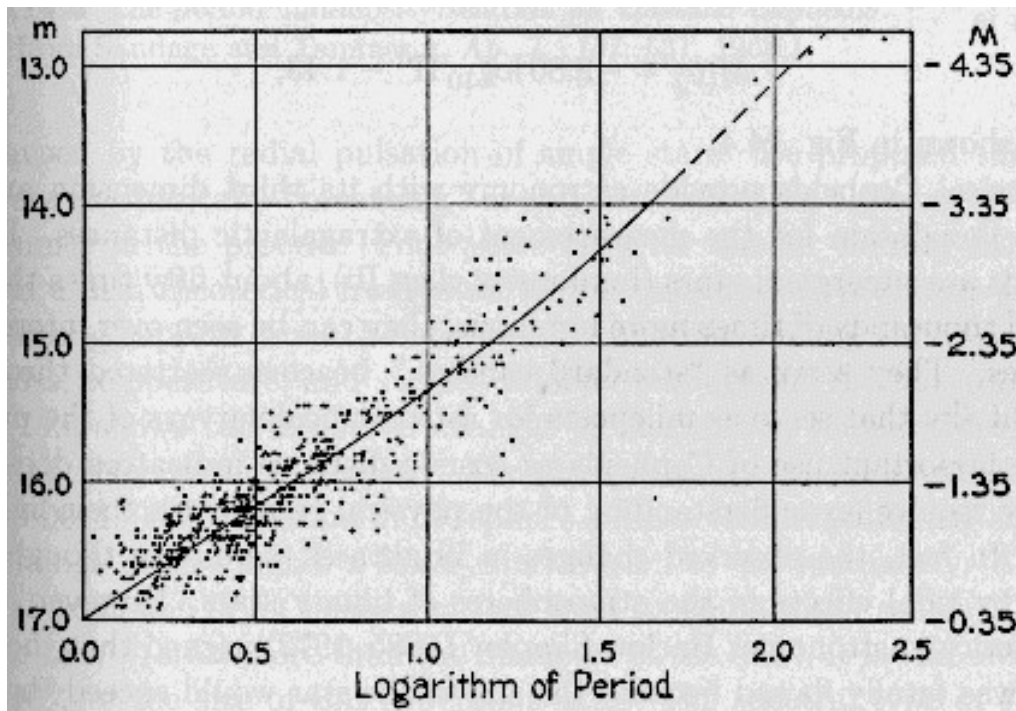
- Protótipo é Delta Cephei, estrela cuja luminosidade varia de um fator 2,3 (quase uma magnitude) em cerca de 5 dias e 10 horas.
- A variação da luminosidade pode ser apresentada como uma Curva de Luz:



Relação Período-Luminosidade

...uma relação que em 1926 abre as portas para a Astrofísica Extragaláctica...

Em 1912, Henrietta Leavitt descobre que o período de pulsação das Cefeidas é proporcional à sua luminosidade intrínseca (M_{bol}).



1868 – 1921

$$\log \frac{\langle L \rangle}{L_{\odot}} = 1.15 \log P + 2.47$$

$$M_{bol} = -3.125 \log P - 1.525$$

$$M_v = -2.80 \log P - 1.43$$

Fig-Cefeidas clássicas na Pequena Nuvem de Magalhães, com período em unidades de dias

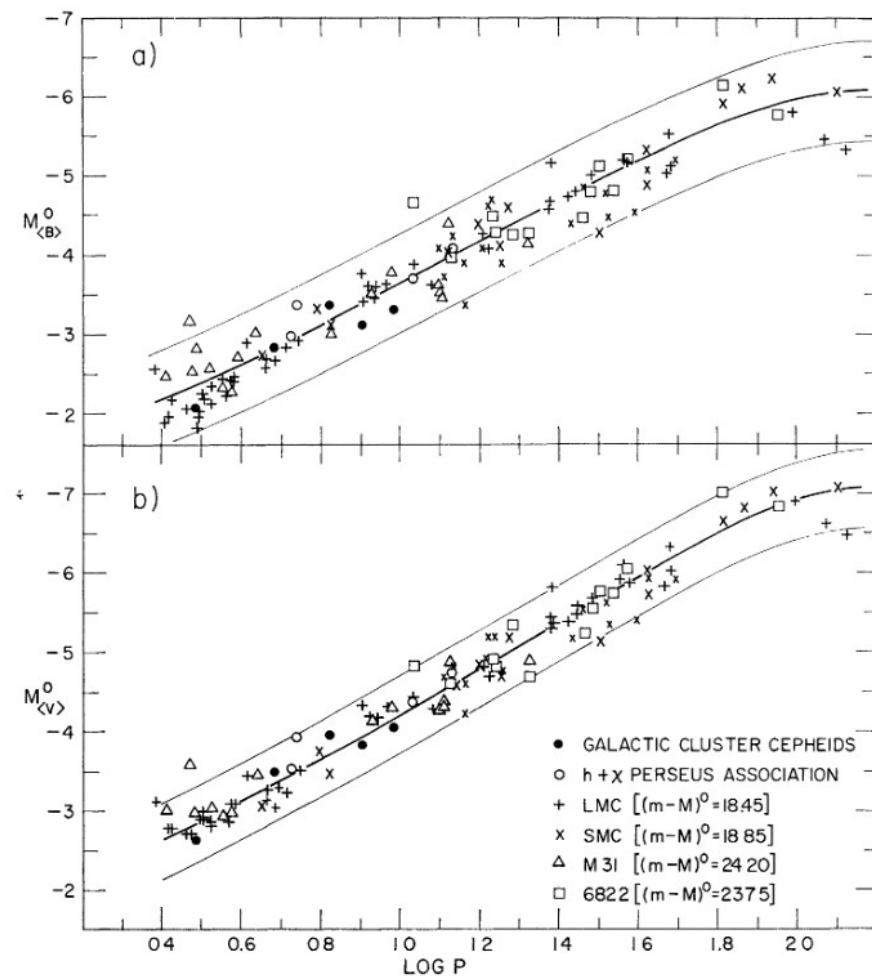


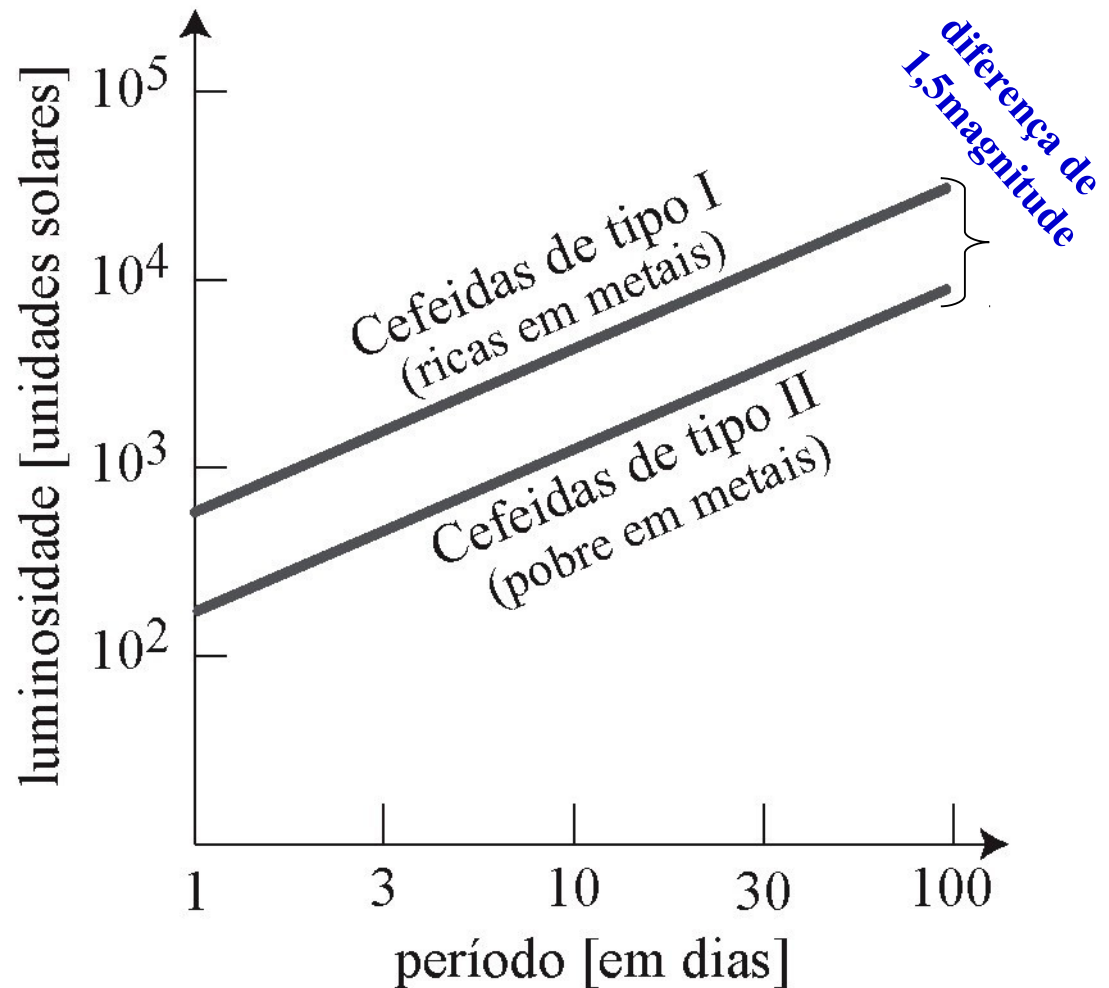
FIG. 1.—The composite period-luminosity relation at mean intensity in B and V wavelengths derived from the sources indicated at the lower right. The absolute calibration was made by using the nine Cepheids of the galactic system shown as open and filled circles. The photographic data from the SMC are plotted with smaller crosses than the Gascoigne and Kron photoelectric data.

Relação Período-Luminosidade

2 tipos de Cefeidas:

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

Diferentes relações Período-Luminosidade.



Relação Período-Luminosidade

Esta relação pode ser utilizada para **determinação de distância. Como?**

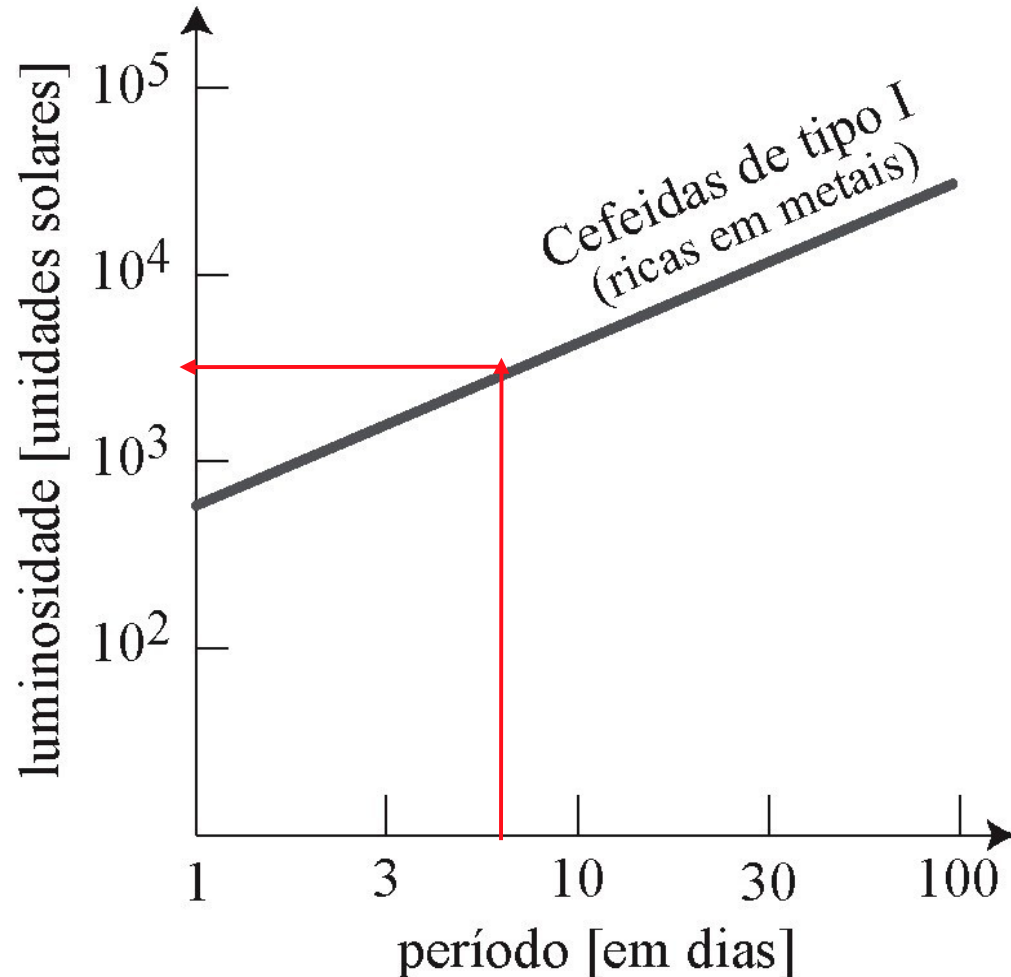
1- **Mede-se** o período de pulsação...

2- **Obtem-se** a luminosidade intrínseca.

3- **Mede-se** o brilho da estrela, ou a magnitude aparente (m) em uma determinada banda

4- **Calcula-se** a distância usando o Módulo de Distância.

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



obtemos distâncias até 20 Mpc (20.000.000 pc).

Relação Período-Luminosidade

As Cefeidas têm magnitudes médias intrínsecas de $M_V = 0$ a -5 .

Tomando uma Cefeida de $M_V = -5$,

módulo de distância

→ a **1 Mpc de distância:**

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

sua magnitude aparente será $m_V = 20$.

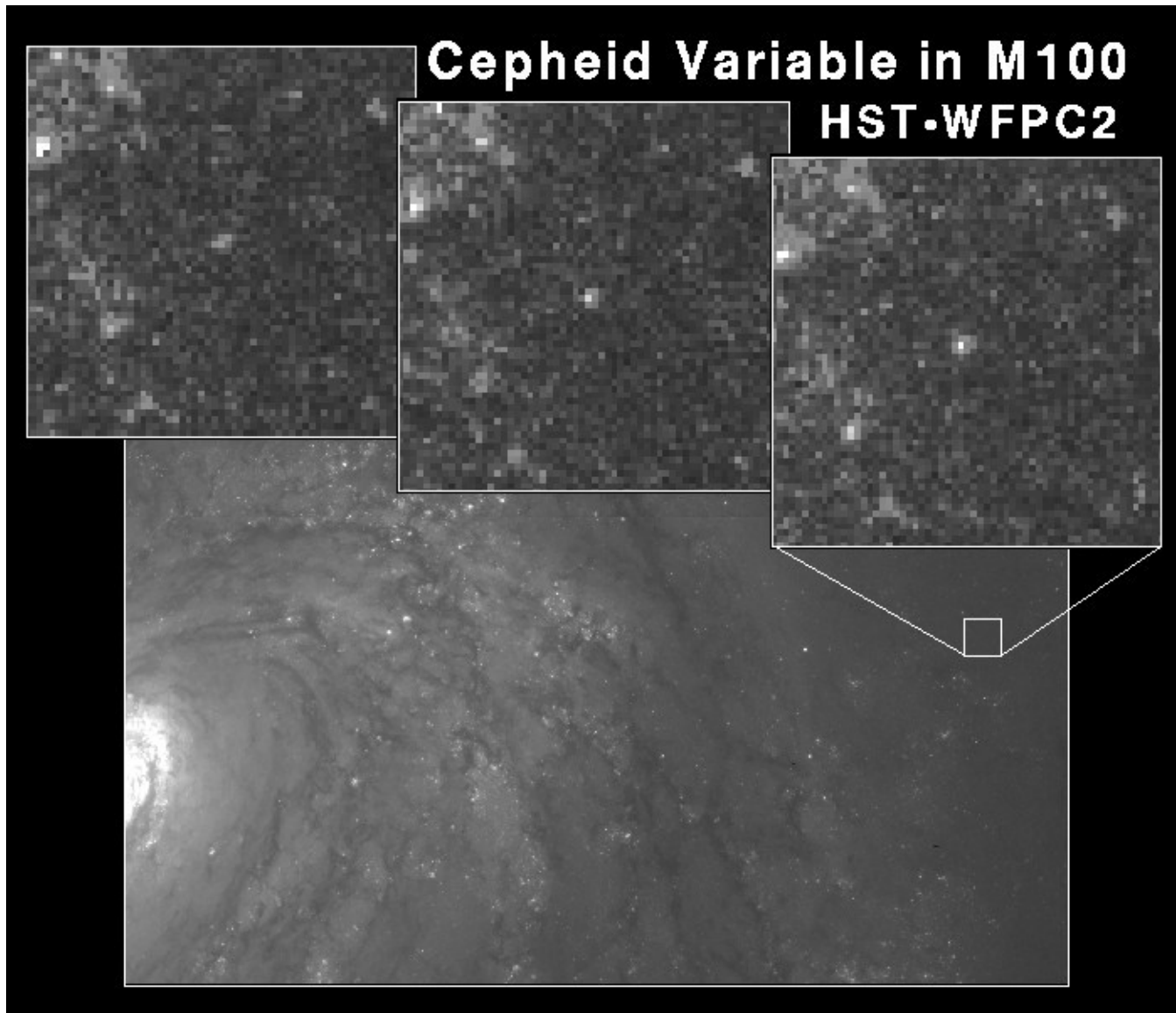
Observável em um bom telescópio de $\approx 2,5\text{m}$ de diâmetro.

→ a **20 Mpc de distância:**

sua magnitude será $m_V = 26,5$.

Observável em um bom telescópio de $\approx 2,5\text{m}$ de diâmetro no espaço (Telescópio Espacial Hubble).

Distância usando Cefeidas



Distância 17Mpc