

Aula 15

Evolução de Estrelas em Sistemas Binários

O Papel dos Aglomerados de Estrelas e de Estrelas Variáveis no Contexto da Evolução Estelar

Binárias: novas, novas recorrentes

Supernova tipo Ia

Nucleossíntese

Sandra dos Anjos

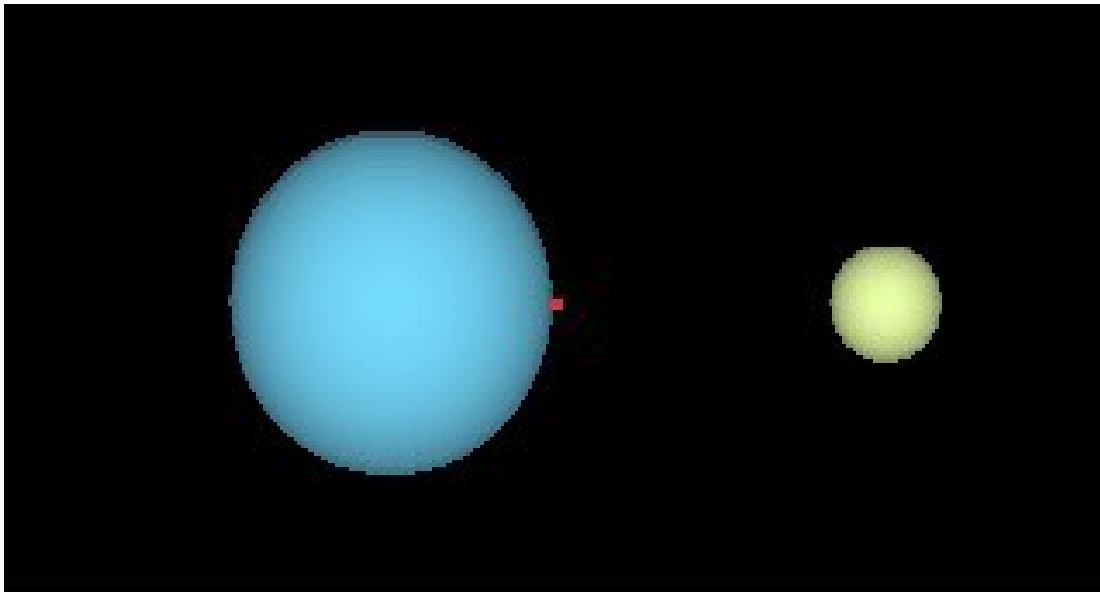
2º Semestre/2023

IAG/USP

Evolução de Estrelas em Sistemas Binários

Se uma estrela com **massa menor que $8 M_{\odot}$ evolui sozinha**, vai terminar como uma **Anã Branca**.

Contudo, muitas estrelas se encontram em sistemas múltiplos, em particular, em **sistemas binários**.



A evolução de estrelas muito próximas, em **sistemas binários cerrado** é bem diferente daquelas que evoluem sozinhas.

Evolução de Estrelas em Sistemas Binários

Em um par onde as estrelas têm massas diferentes:

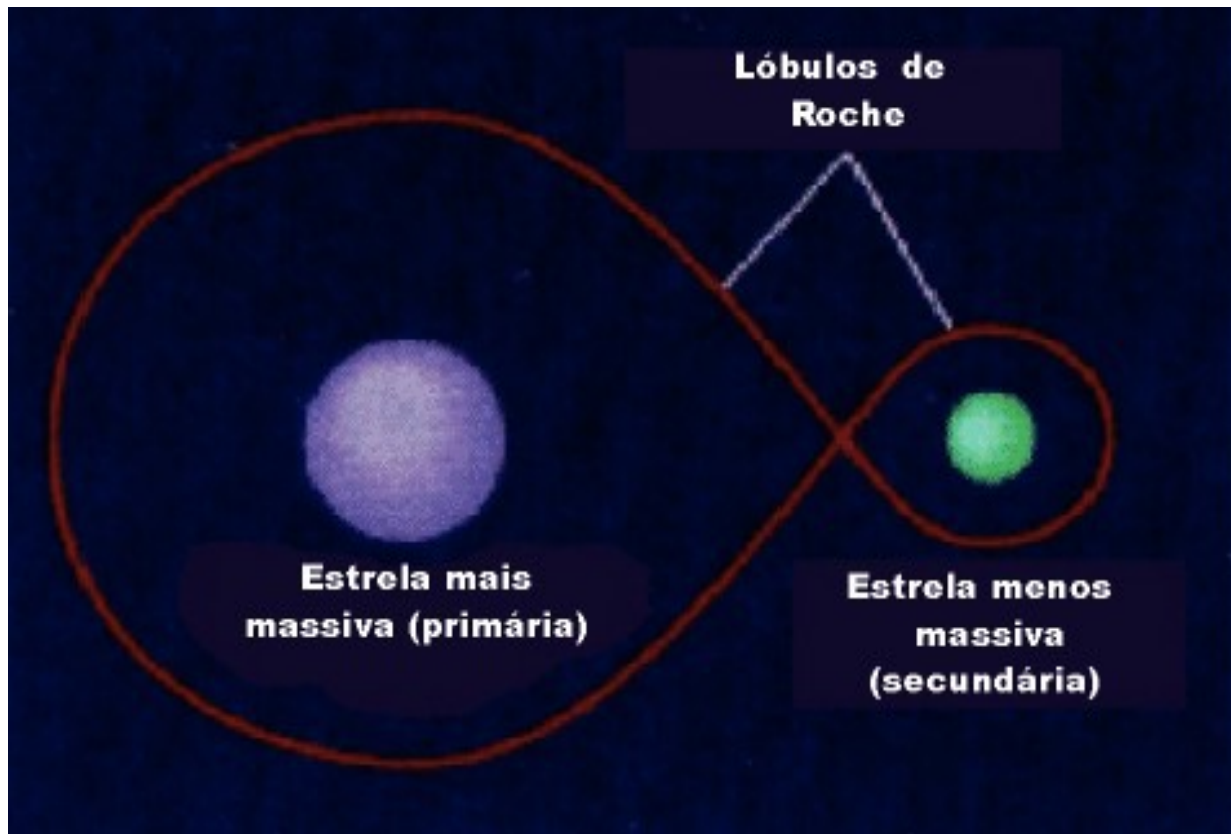
A estrela **mais massiva** do par evolui mais rápido e evoluirá para uma **Anã Branca**.
A outra estrela, **menos massiva**, ainda estará na **Sequência Principal**.

Ex:

- **Sírius A** ainda está na Sequência Principal (é uma estrela tipo A).
- Mas **Sírius B** é uma Anã Branca, já saiu da Sequência Principal.



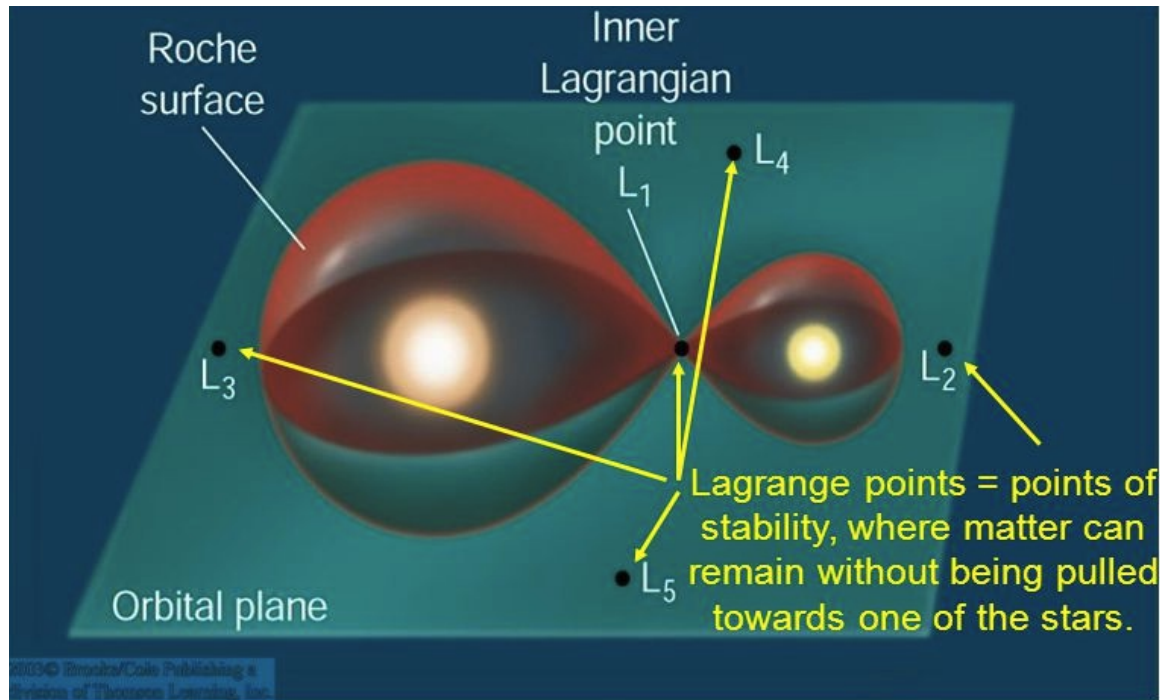
Nestes sistemas binários ocorrem fenômenos importantes relacionados ao **domínio de forças entre as estrelas**, que irão afetar a evolução destas estrelas que estão em fases de evolução diferentes...



Em um Sistema Binário cada estrela “gera” um domínio de força de gravidade própria, em forma de gota, resultando em uma superfície em forma de “8” e controla uma região finita do espaço definida como **Lóbulo de Roche**.

A superfície do “Lóbulo de Roche”, funciona como uma superfície equipotencial - uma região onde todos os seus pontos apresentam o mesmo potencial gravitacional.

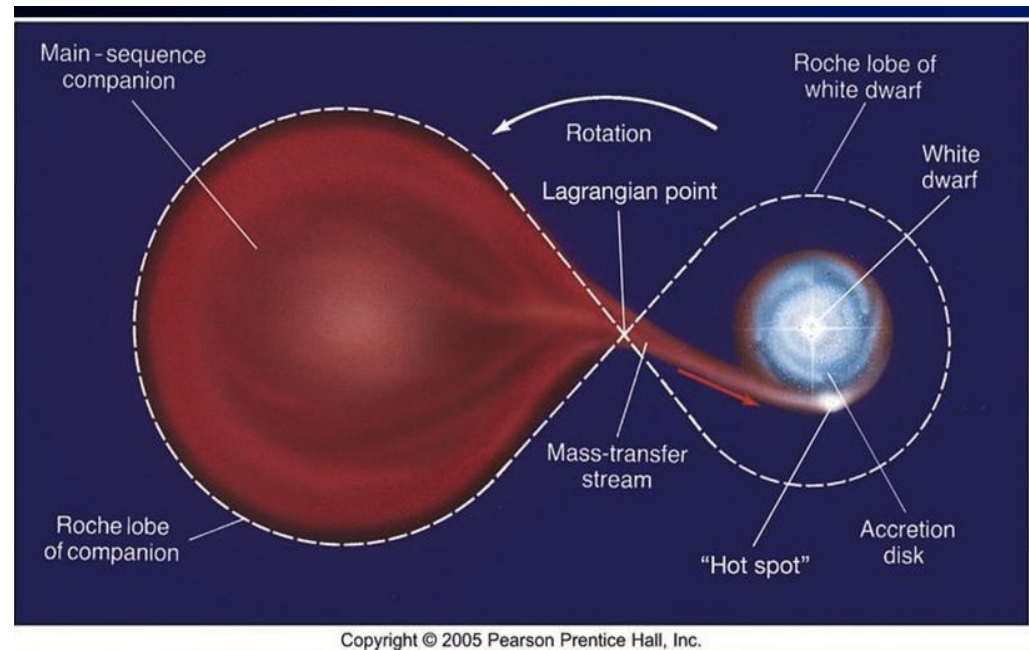
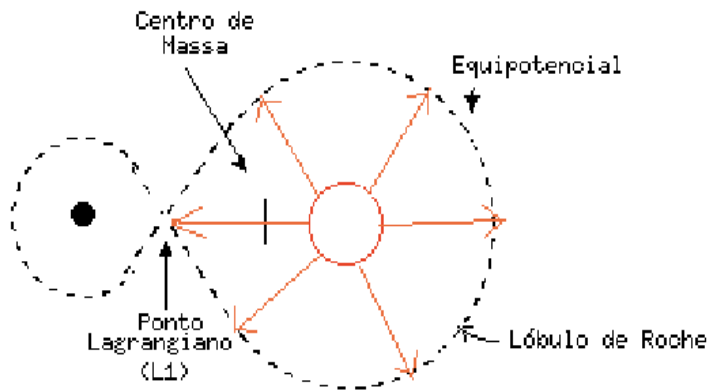
Nesta superfície existem pontos de equilíbrio, os pontos de Lagrange, onde a atração gravitacional de 2 estrelas equilibra exatamente a rotação do Sistema Binário.



Um ponto em particular que vai nos interessar no caso da evolução de Sistemas Binários é o ponto **L1**, onde a gravidade efetiva é zero

O ponto **L1** de Lagrange

L1 é um ponto de equilíbrio instável e a presença de matéria aí pode ser transferida para a outra estrela, como se observa na figura abaixo

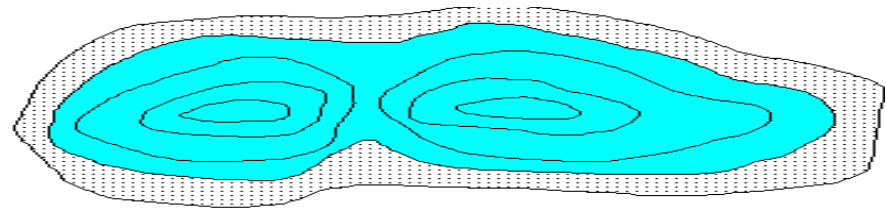
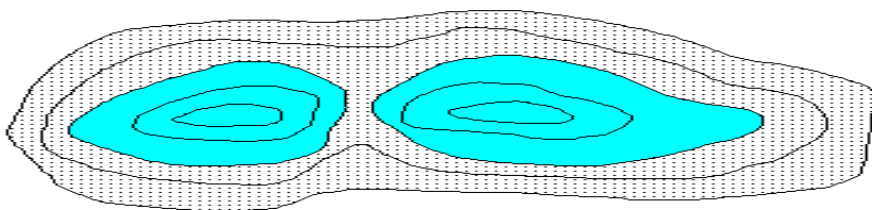


O Centro de Massa representa um ponto de equilíbrio da distribuição de massa.

Exemplo de Superfície Equipotencial

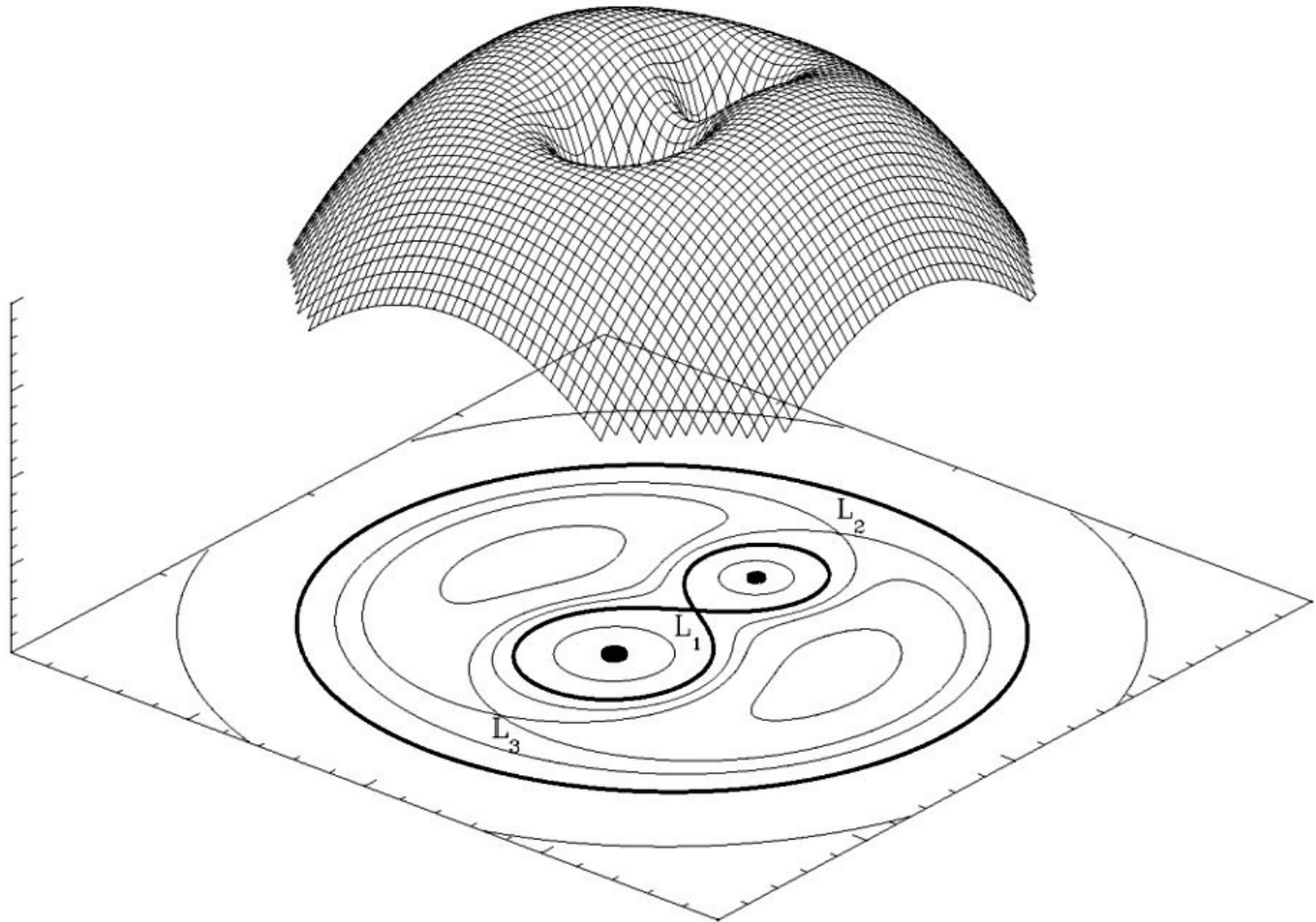
O **nível** de água de dois lagos separados por um morro é equivalente em ambos os lagos. A medida que este nível sobe, a cada instante, ele estará ocupando um determinado nível de água, ou seja, uma linha de **potencial constante, uma equipotencial**.

Ao **atingir a equipotencial do cume do morro**, a água dos dois lagos **se encontrarão**.



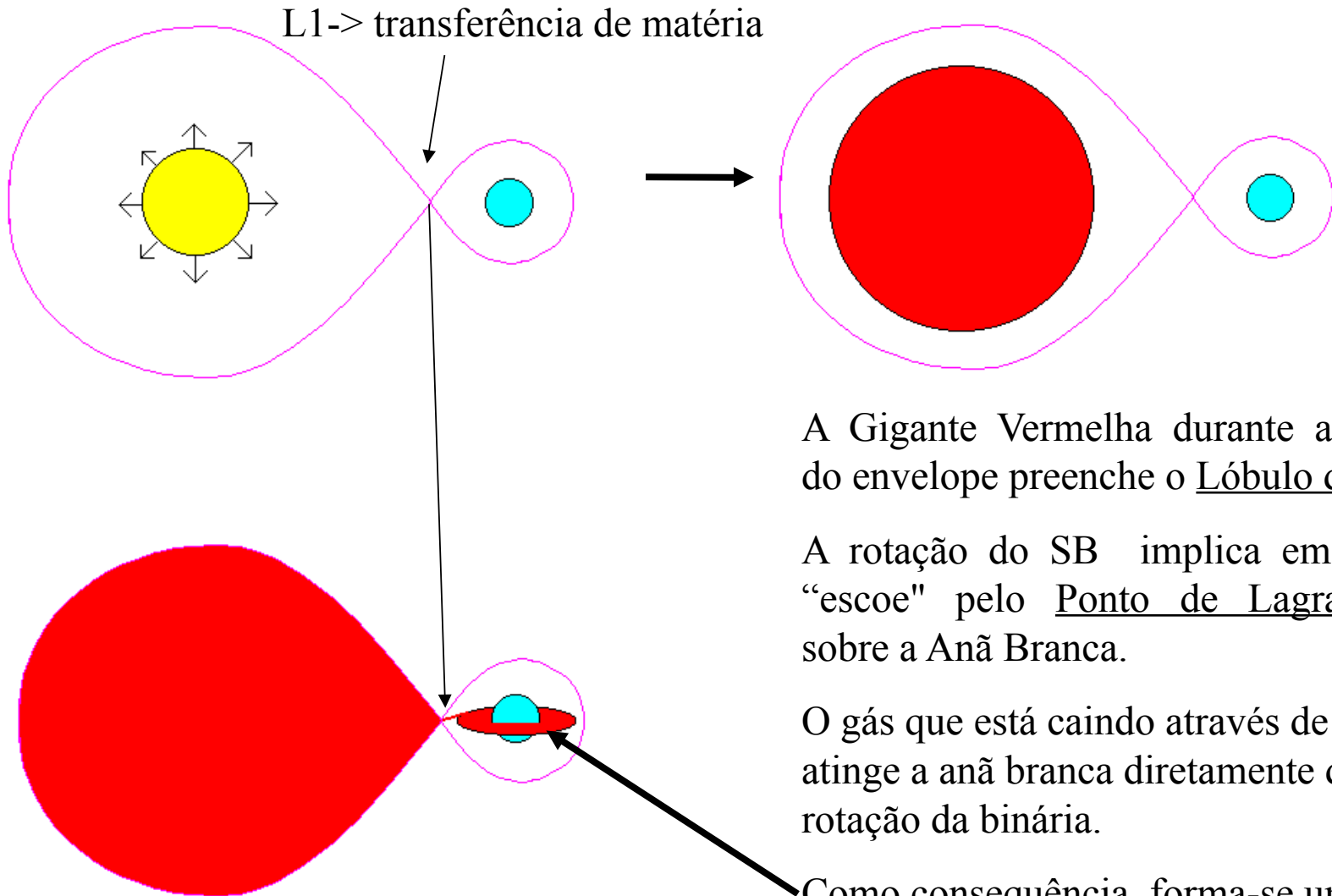
Linhas equipotenciais são semelhantes a linhas de contornos de mapas, onde cada contorno representa um nível. O nível de água no lago aumenta seguindo linhas de equipotencial. Pode acontecer do nível de água aumentar nos 2 lagos a ponto de se unirem e serem então representados por um único nível de água, e uma única linha equipotencial

Com Sistemas Binários ocorre um fenômeno semelhante...



Fases de Evolução em Sistemas Binários (SB)

exemplo: ...caso onde se tem uma Gigante Vermelha e uma Anã Branca

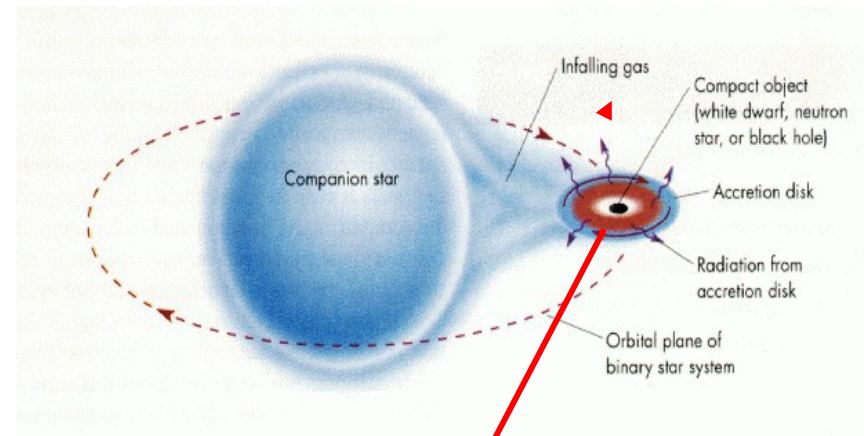


A Gigante Vermelha durante a expansão do envelope preenche o Lóbulo de Roche.

A rotação do SB implica em que o gás “escoe” pelo Ponto de Lagrange, L1, sobre a Anã Branca.

O gás que está caindo através de L1 não atinge a anã branca diretamente devido a rotação da binária.

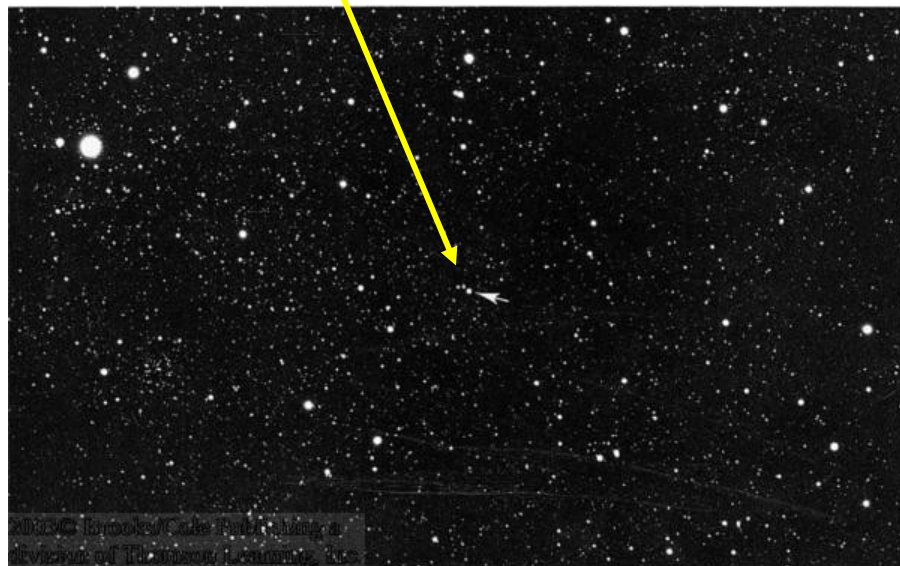
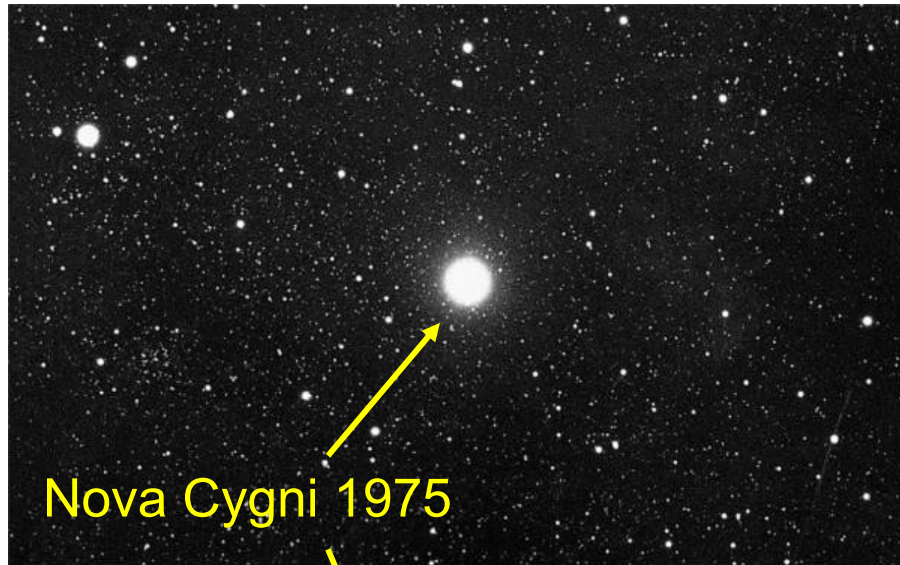
Como consequência, forma-se um disco de acreção em torno da anã branca



A estrela receptora do envelope da estrela que ocupa o lóbulos de Roche pode ser uma Anã Branca, Estrela de Neutrons ou Buraco Negro.

Nova

...evolução de um Sistema Binário (GV + AB)



Hidrogênio depositado no disco se acumula ao redor da anã branca.

Este disco esquenta até que ocorre a fusão explosiva de hidrogênio na superfície da estrela.

Este **evento de explosão** que resulta em uma estrela: ...uma Nova !

Nova

...as diferentes classes de Novas dependem da luminosidade gerada no evento

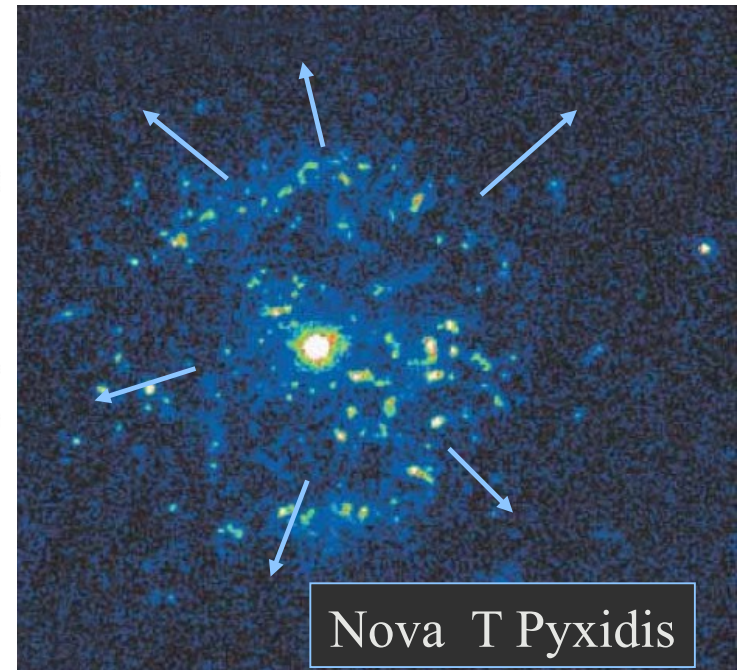
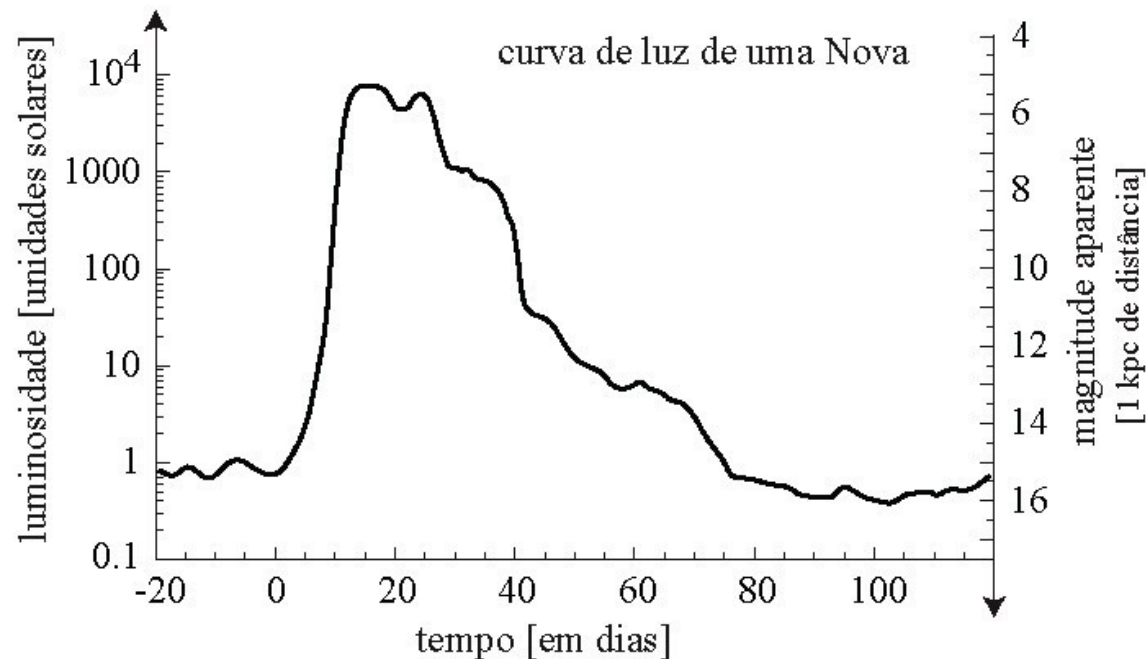
Se o aumento de luminosidade é de um **fator 10** (2,5 magnitudes):

– **Nova anã.**

Quando o aumento é de um **fator 10.000** (10 magnitudes):

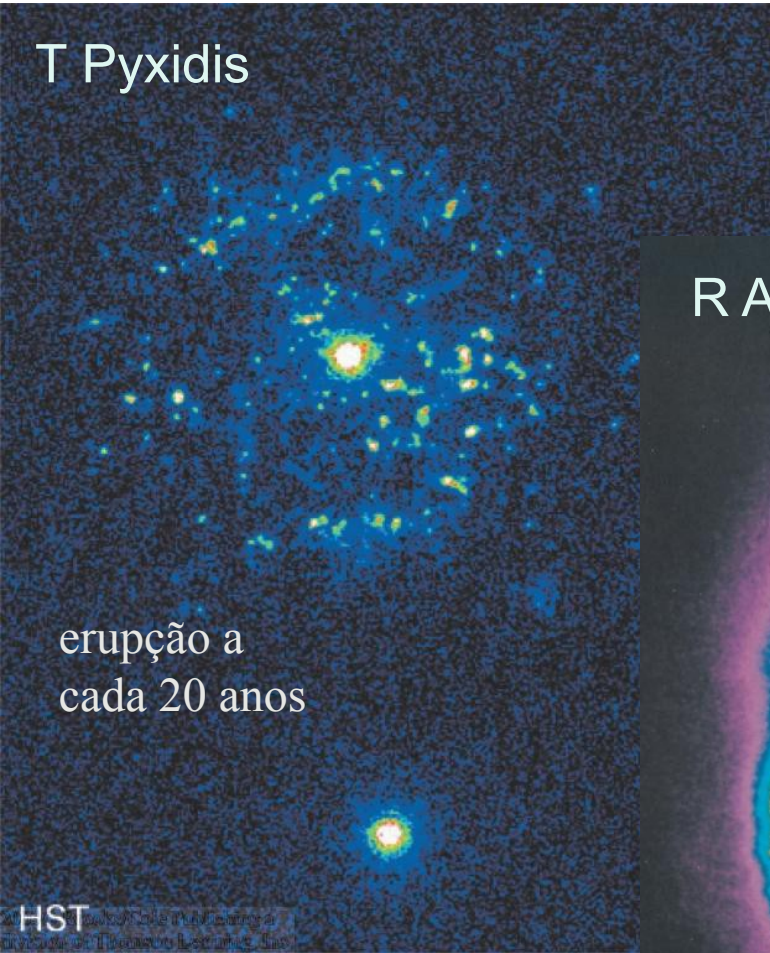
– **Nova clássica.**

A ejeção de matéria pode chegar a $\sim 2000\text{km/s}$.



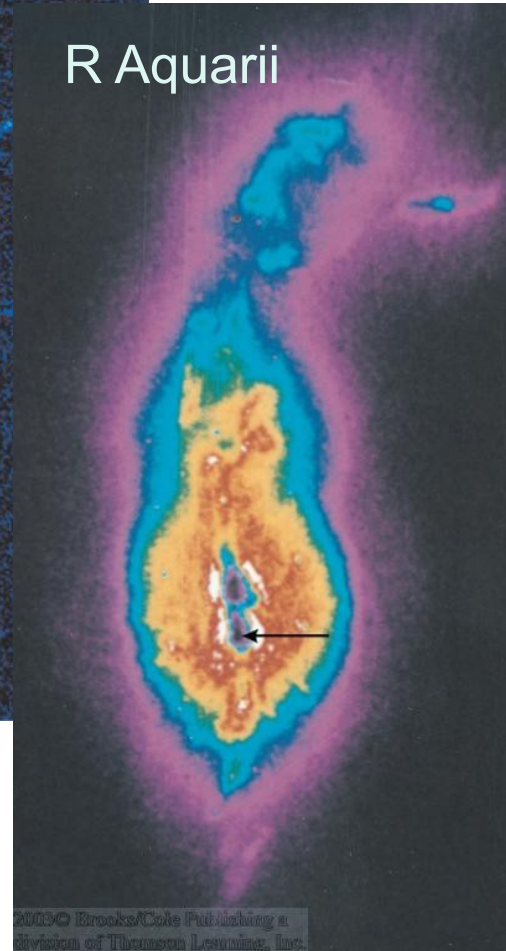
Nova Recorrentes

T Pyxidis



erupção a
cada 20 anos

R Aquarii



- Após a explosão da Nova, o ciclo pode recomeçar, já que pode existir ainda material a ser acrescido da Gigante Vermelha.
- A Anã Branca volta a acumular massa no disco de acreção.
- Densidade e temperatura voltam a aumentar.
- Outra Nova ocorre.

Acreção em Sistemas Binários

No caso de acreção sobre uma Anã Branca :

- Na explosão da Nova, nem todo material é expelido.
- A acrecção aumenta a massa da anã branca.
- A **pressão dos elétrons degenerados só pode suportar até $1,4 M_{\odot}$ - Limite de Chandrasekhar**.

Quando a massa da Anã Branca supera $1,4 M_{\odot}$:

- A estrela colapsa.
- O carbono e oxigênio iniciam uma fusão em toda a estrela.
- **Quase toda a estrela é transformada em Ferro e Níquel**
- A estrela inteira explode.

SUPERNOVA tipo Ia

Supernova Tipo Ia – só em sistema binário



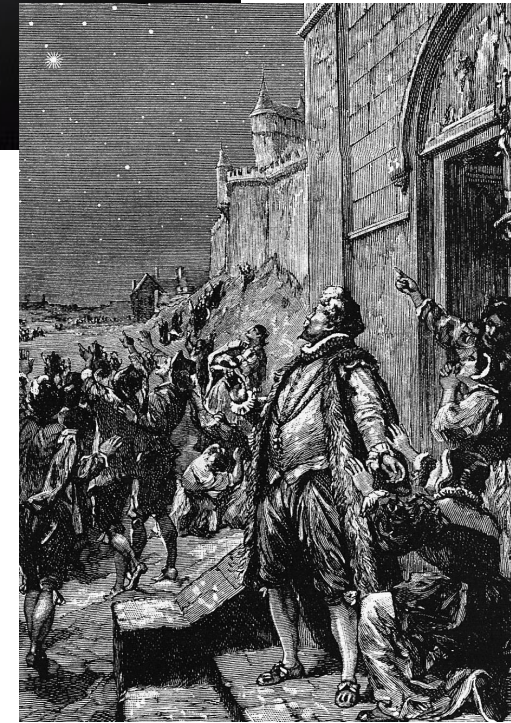
Anã Branca e detonação da Supernova Ia

Supernova Tipo Ia

- SN-Ia observada em 1994 pelo telescópio espacial Hubble, em uma galáxia a ~ 18 Mpc.



- Evento extremamente energético.
- Magnitude absoluta $-19,6$ (na banda B).
Se ocorresse uma SN Ia a 100 pc de distância, sua magnitude aparente seria $-14,5$,.. mais brilhante do que a Lua cheia!
- Supernovas observadas por Tycho Brahe (11/1572) e Johannes Kepler (10/1604) foram de Tipo Ia.



Diferenciadas pelos Espectros

Supernova Types

Type I

No H in spectra

Ia

Si Absorption line
@ 615nm

Found everywhere in the
universe

Always same luminosity?

Ib

No Si

Ic

No Si,
No He

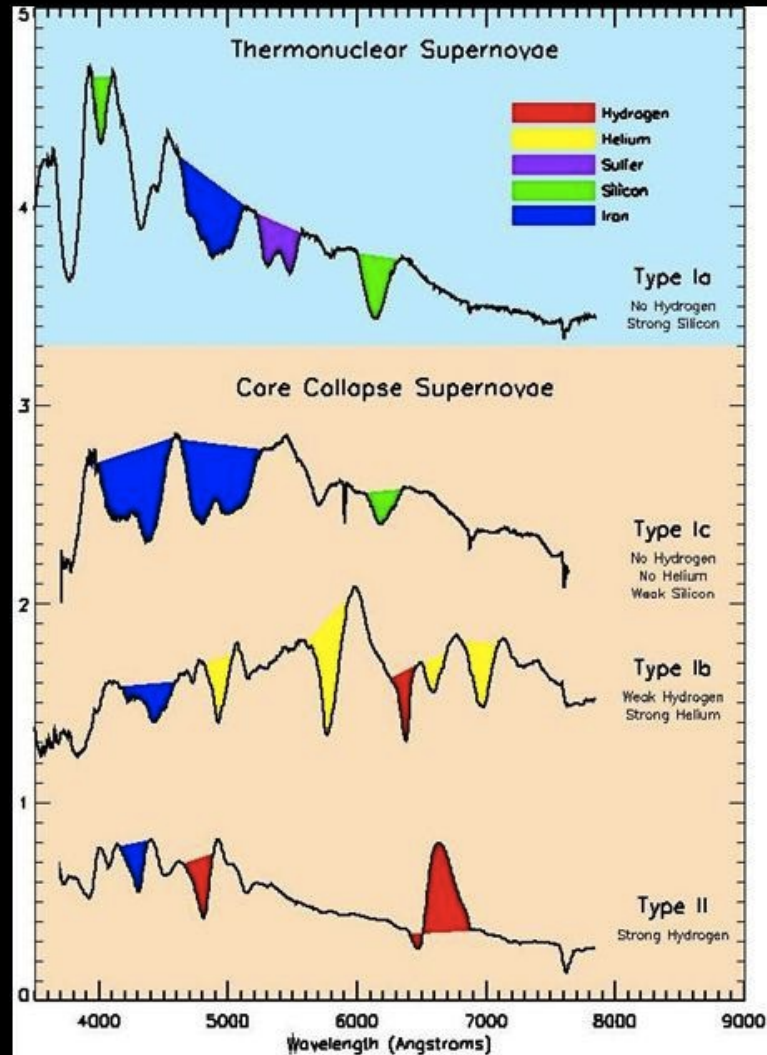
Found only in new star regions

Type II

H in spectra

May be further
subdivided based
on light curves

Espectros – Tipos 1 e 2



Supernova Tipo Ia

×

Supernova Tipo II

Explosão de uma anã branca em **sistema binário**

Colapso do caroço de **estrela massiva**

Enriquece o meio interestelar com Ferro e Níquel

Enriquece o meio com C, O, Ne, Mg, Si

Ocorre em todo tipo de galáxias

Ocorre em galáxias que ainda formam estrelas

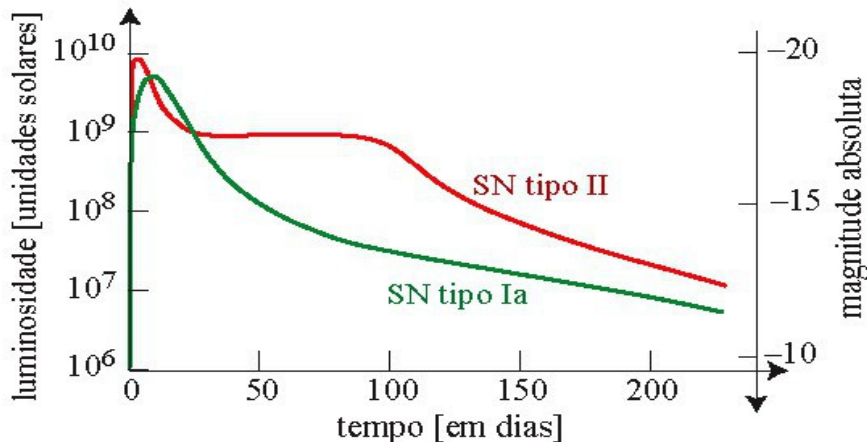
Luminosidade máxima é praticamente a mesma

Luminosidade máxima varia de uma SN p/ outra

Não há linhas de hidrogênio no espectro.

Tem linhas de hidrogênio no espectro

Curvas de luz normalizadas



Taxa de Supernovas

Ia	II	Outras (Ib e Ic)	total
2	4	0,8	6,8

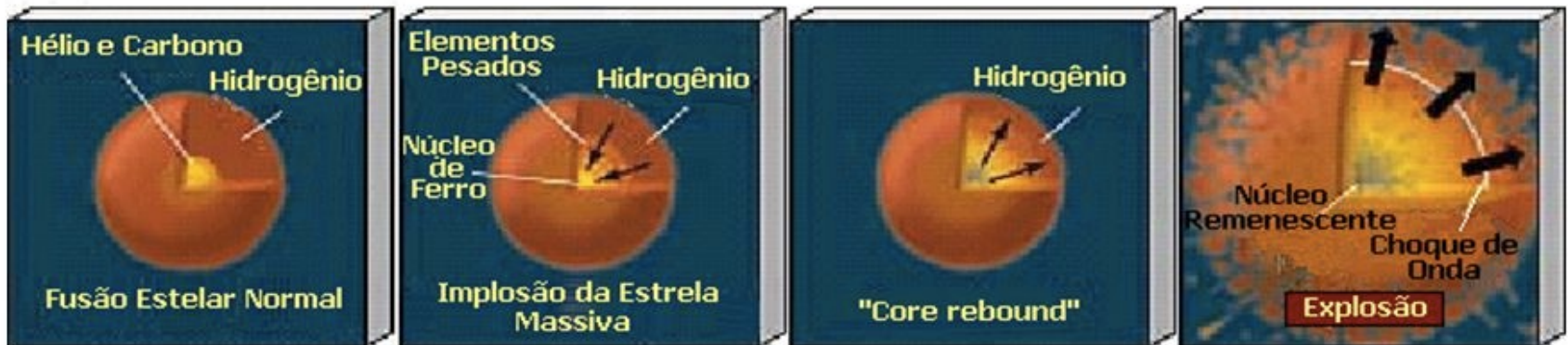
por século, para uma galáxia com luminosidade da Via Láctea

Supernovas Tipo I e Tipo II

(a) Tipo I - Supernova



(b) Tipo II - Supernova

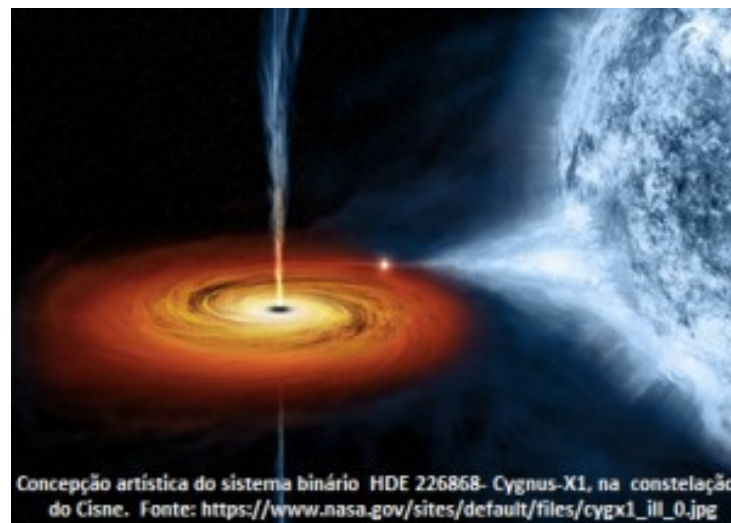
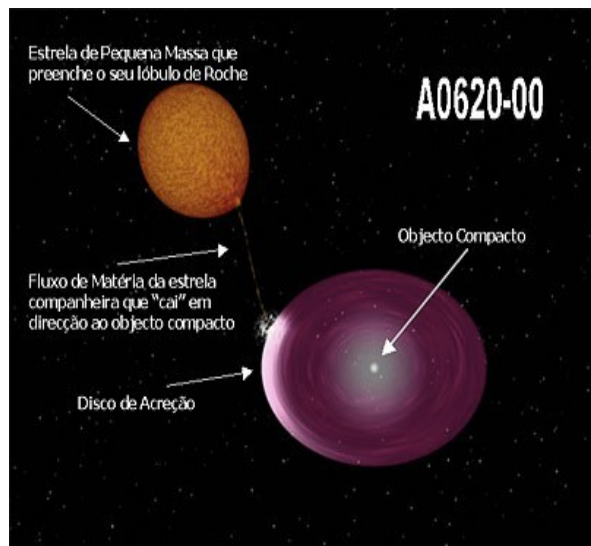


Objetos Compactos em Sistemas Binários

Além de anãs brancas, podem fazer parte de sistemas binários estrelas secundárias como **estrelas de nêutrons e buracos negros**.

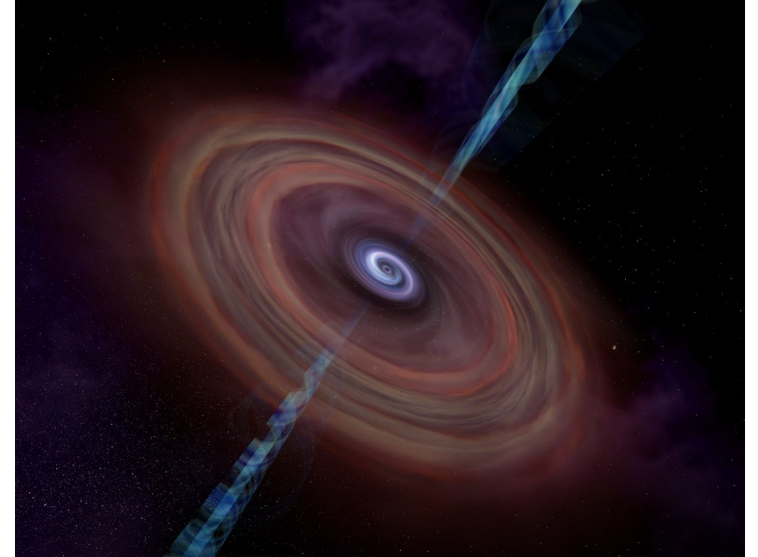
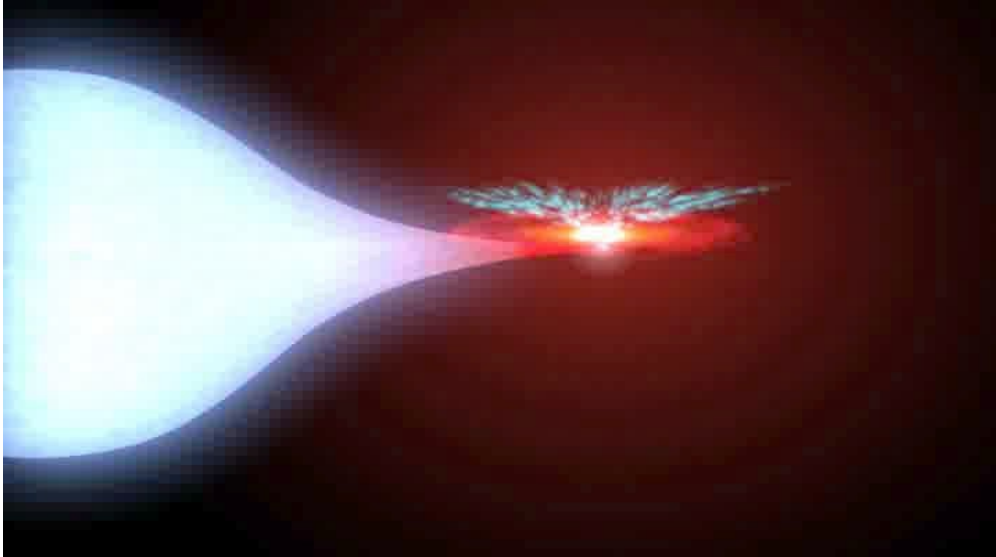
Buracos negros isolados são praticamente impossíveis de serem observados.

Em sistemas binários, observa-se indiretamente a emissão de radiação oriunda do disco de acreção, que neste caso é muito mais energético do que no caso da anã branca.



No caso da secundária ser um Buraco Negro a matéria cai no horizonte de eventos e “desaparece”. Entretanto, o gás cooptado da estrela companheira ao ser espiralado em direção ao Buraco Negro é aquecido por força gravitacional de maré e pela fricção, emitindo raios-X. É esta radiação que poderá ser detectada como evidência indireta da presença de BH. Não haverá o fenômeno de Novas

Observando Buracos Negros

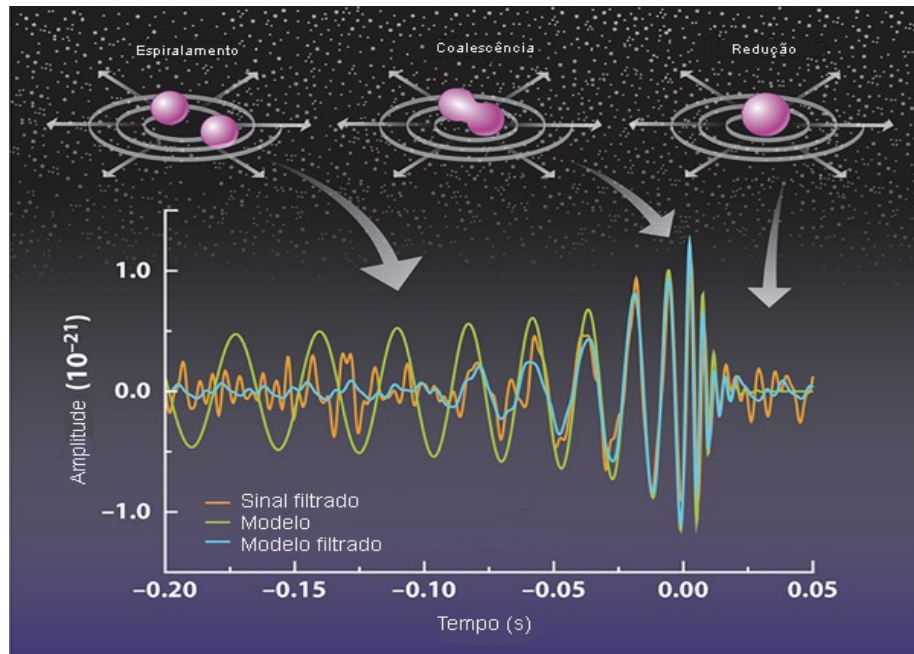


A interação com o campo magnético provoca a ejeção de partículas (jatos)

Detectando Buracos Negros

O Observatório Interferométrico de Ondas Gravitacionais (LIGO) - EUA, já detectaram 3 eventos que geraram ondas gravitacionais - ondulações no espaço-tempo - previstas por Einstein em 1916, causadas pela coalescência de **dois buracos negros estelares**.

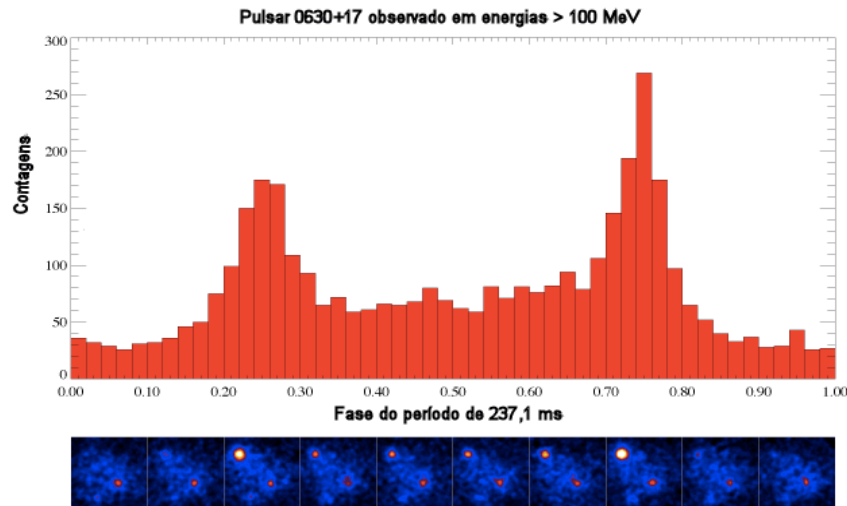
O primeiro, em setembro de 2015, com massa (35 ± 4) e outro com (30 ± 4) M_{Sol} , no núcleo de uma galáxia distante (fig. abaixo). O segundo, em dezembro de 2015, com buracos negros de 8 e 14 massas solares, resultando em um buraco negro de 21 massas solares, e convertendo 1 massa solar em energia. O sinal detectado durou 1 segundo, e a fonte está a uma distância de cerca de 1,3 bilhões de anos-luz. (Physical Review Letters 116, 241103 (2016)).



Ver detalhes do
experimento na
Aula 3

Binárias com Estrelas de Neutrons

Descobertas em 1967 por Joselin Bell são estrelas de neutrons que possuem forte campo magnético, rápida rotação e emitem pulsos em rádio. Entretanto, em sistemas binários a acreção de matéria sobre o disco de acreção faz com que a emissão seja detectada em raios-x e até mesmo em raios gama.



As massas das estrelas de nêutrons em pulsares binários são da ordem de $M_n = 1,37 M_{\odot} \pm 0,02$

Nucleossíntese

- Em estrelas massivas, até a explosão da supernova, a estrela sintetiza elementos **até o Fe**.
- Pelo processo de **captura lenta de nêutrons (chamado processo-s)** são sintetizados elementos pesados, até o Bismuto (elemento não radiativo mais pesado). É uma reação nuclear onde os neutrons se combinam com núcleos atômicos via colisão.
- A captura rápida de nêutrons (chamado **processo-r**) sintetiza elementos até o Urânio.

1A																	He																		
H 1.007																	He 4.002																		
2A																	2																		
Li 6.941	Be 9.012																	B 10.81	C 12.01	N 14.00	O 15.99	F 18.99	Ne 20.17												
3		4																		5		6		7		8		9		10					
Na 22.98	Mg 24.30																	Al 26.98	Si 28.08	P 30.97	S 32.06	Cl 35.45	Ar 39.94												
11		12																		13		14		15		16		17		18					
K 39.09	Ca 40.07	Sc 44.95	Ti 47.86	V 50.94	Cr 51.99	Mn 54.93	Fe 55.84	Co 58.93	Ni 58.69	Cu 63.54	Zn 65.39	Ga 69.72	Ge 72.64	As 74.92	Se 78.96	Br 79.90	Kr 83.80																		
19		20		21		22		23		24		25		26		27		28		29		30		31		32		33		34		35		36	
Rb 85.46	Sr 87.62	Y 88.90	Zr 91.22	Nb 92.90	Mo 95.94	Tc 99	Ru 101.0	Rh 102.9	Pd 106.4	Ag 107.8	Cd 112.4	In 114.8	Sn 118.7	Sb 121.7	Te 127.6	I 126.9	Xe 131.2																		
37		38		39		40		41		42		43		44		45		46		47		48		49		50		51		52		53		54	
Cs 132.9	Ba 137.3	La 138.9	Hf 178.4	Ta 180.9	W 183.8	Re 186.2	Os 190.2	Ir 192.2	Pt 195.0	Au 196.9	Hg 200.5	Tl 204.3	Pb 207.2	Bi 208.9	Po 210	At 210	Rn 222																		
55		56		57		72		73		74		75		76		77		78		79		80		81		82		83		84		85		86	
Fr 223	Ra 226	Ac 227	Rf 261	Db 262	Sg 263	Bh 262	Hs 265	Mt 266	Ds 281	Rg 272	Uub 277	Uut ---	Uuq ---	Uup ---	Uuh ---	Uus ---	Uuo ---																		
87		88		89		104		105		106		107		108		109		110		111		112		113		114		115		116		117		118	

Ce 140.1	Pr 140.9	Nd 144.2	Pm 145	Sm 150.3	Eu 151.9	Gd 157.2	Tb 158.9	Dy 162.5	Ho 164.9	Er 167.2	Tm 168.9	Yb 173.0	Lu 174.9														
58		59		60		61		62		63		64		65		66		67		68		69		70		71	
Th 232.0	Pa 231.0	U 238.0	Np 237.0	Pu 244	Am 243	Cm 247	Bk 247	Cf 251	Es 254	Fm 257	Md 260	No 259	Lr 262														
90		91		92		93		94		95		96		97		98		99		100		101		102		103	

Nucleossíntese e Enriquecimento Químico

- **SN II** => ejeção de “elementos-alfa”:
 - elementos formados pela fusão sucessiva de núcleos de hélio (também conhecido como partícula alfa). **Exemplos: carbono, oxigênio, neônio, silício, enxofre, cálcio.**
- **SN Ia** => ejeção de elementos do “grupo do ferro”:
 - **Níquel e ferro** (produzidos durante a explosão da Anã Branca).
- Observe na Tabela abaixo quais os elementos químicos que são produzidos em diferentes tipos de estrelas e processos. Estrelas de baixa massa (como o Sol) contribuem muito pouco com o enriquecimento químico do meio interestelar.

Big Bang		Supernovae		Small Stars		Cosmic Rays											
H							He										
Li	Be					B	C	N	O	F	Ne						
Na	Mg					Al	Si	P	S	Cl	Ar						
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra																
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

O papel dos Aglomerados de Estrelas
no contexto da **Evolução Estelar**

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.



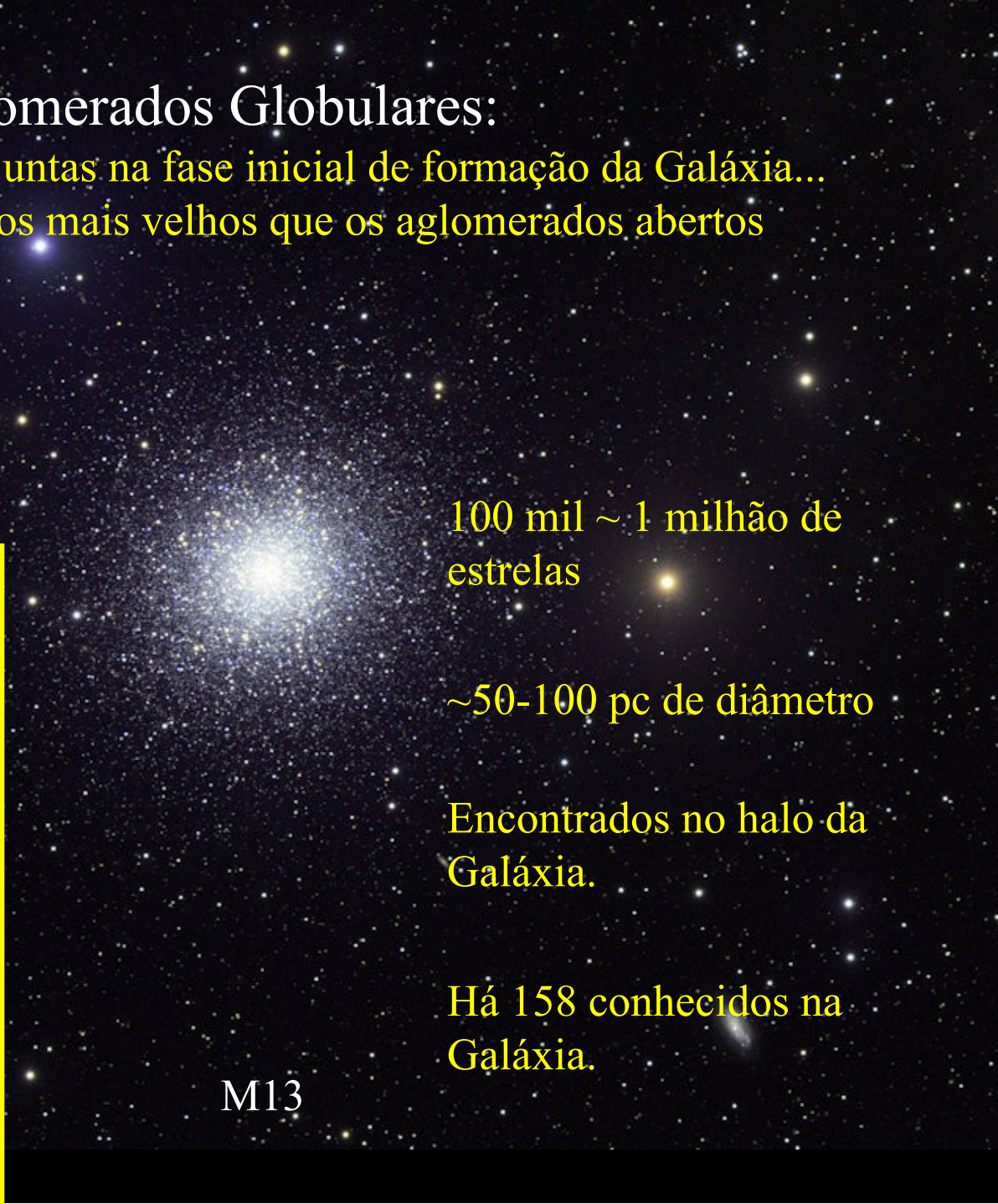
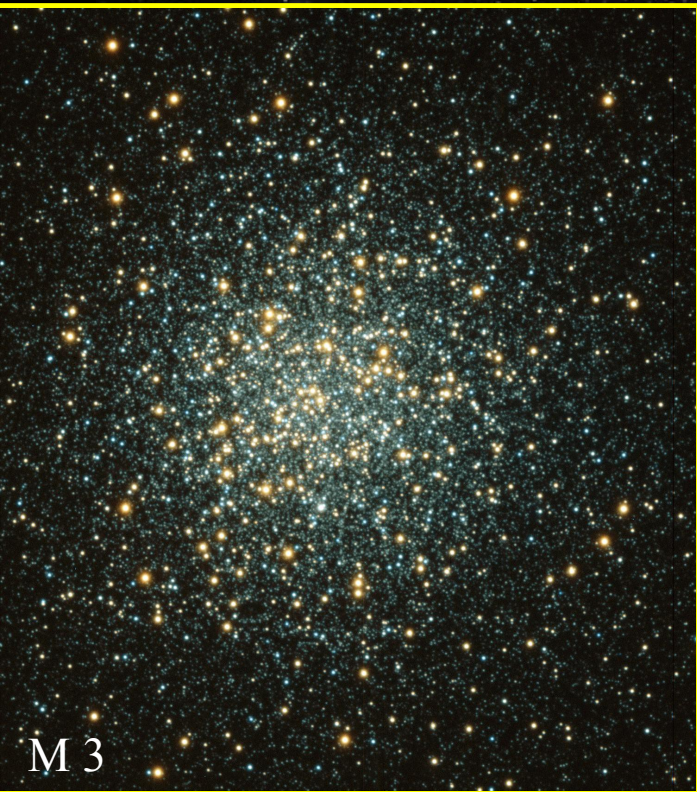
Aglomerados Abertos: estrelas jovens

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



100 mil ~ 1 milhão de
estrelas

~50-100 pc de diâmetro

Encontrados no halo da
Galáxia.

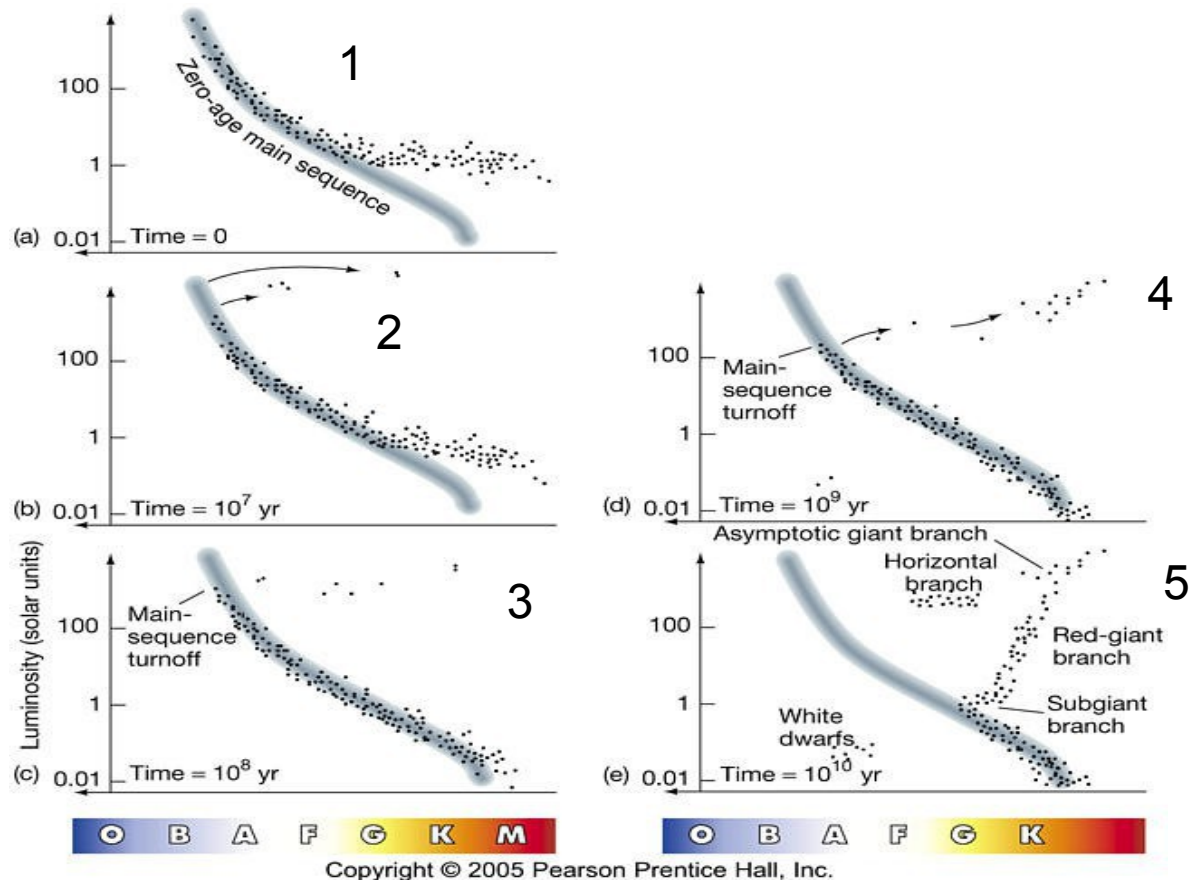
Há 158 conhecidos na
Galáxia.

Importância dos Aglomerados de Estrelas

- 1– Assume-se que as estrelas foram formadas todas juntas e, portanto, tem a **mesma idade, mas massas diferentes**
- 2– Se foram formadas juntas, foram formadas do mesmo material do MIS e, portanto, tem a **mesma composição química inicial**
- 3– Devido ao tamanho do aglomerado ser sempre menor do que a distância ao aglomerado, assume-se que as estrelas tem a **mesma distância da Terra.**
- 4– A construção do Diagrama-HR (D-HR) é realizada através de medidas fotométricas de **magnitude aparente** e é usada para indicar a L , já que as estrelas estão a mesma distância.
- 5- Mudança de um diagrama HR com a idade do aglomerado é um instrumento poderoso para os modelos de evolução estelar.

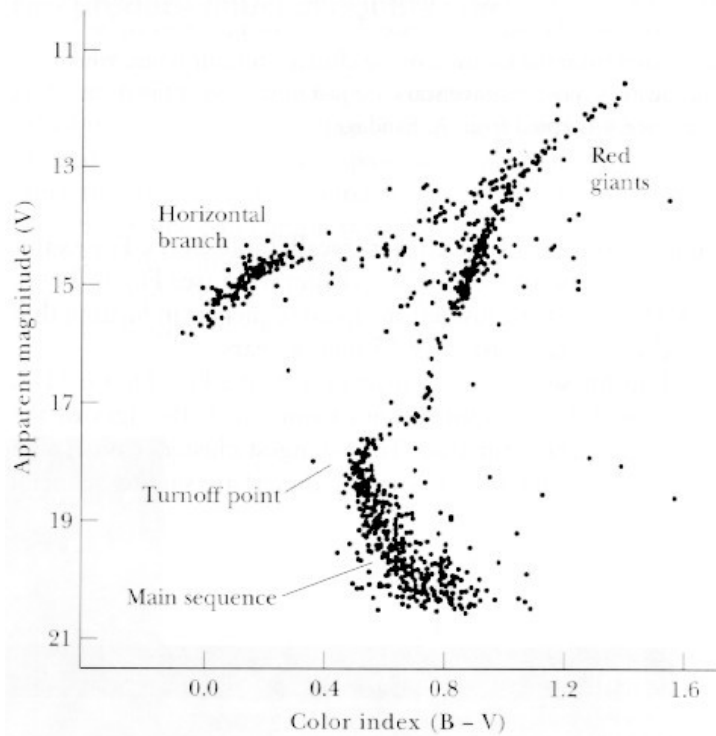
...vamos dar uma olhada a seguir vendo os D-HR destes objetos...

A Figura mostra o traçado evolutivo de estrelas de baixa massa no D-HR, mostrando desde a saída na SP (1), a posição das estrelas que evoluem mais rápido indo em direção ao ramo das gigantes (2), a saída da SP, "turn-off" (3)- oferece a idade, ramo horizontal (4) e terminando como anã branca (5)



Aglomerado Globular M13

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



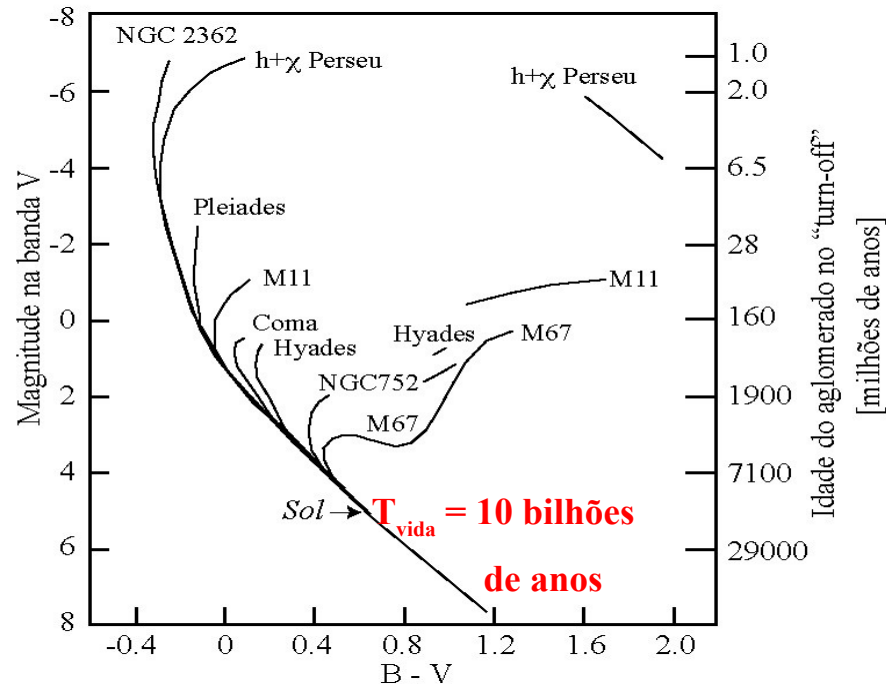
1- Na SP aparecem estrelas somente na porção inferior do Diagrama, indicando que existem ainda estrelas de massa intermediária ou baixa

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

Ponto de “**Turn-off**” → 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



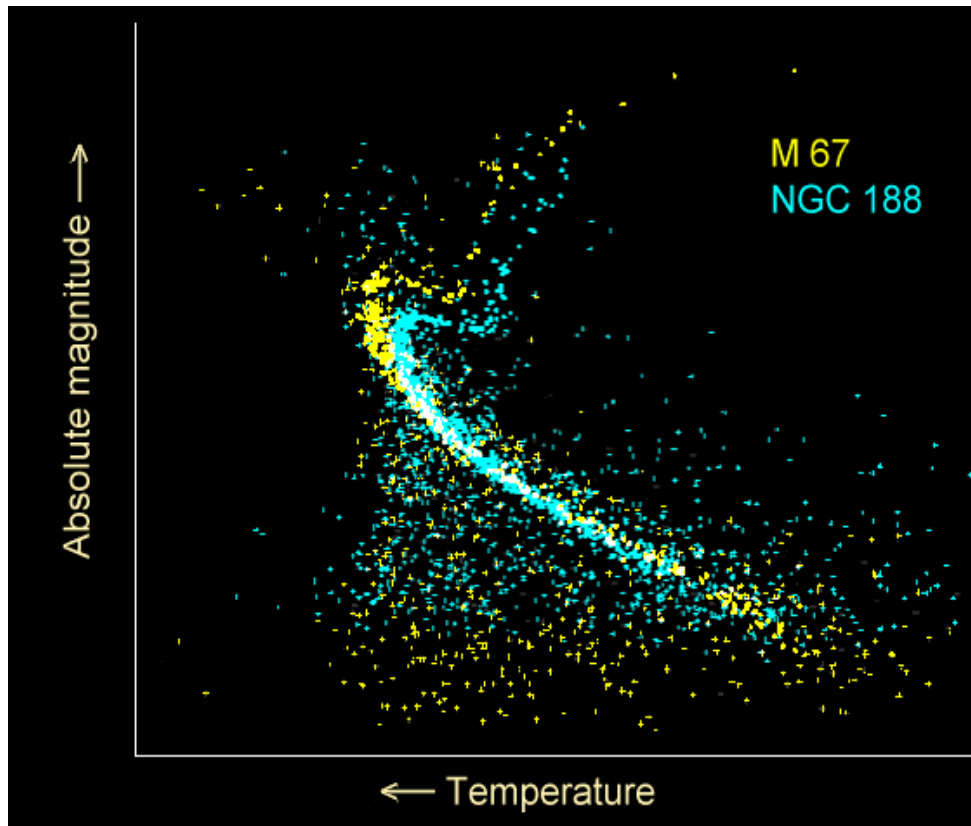
O ponto de saída da SP é chamado “turn-off” e indica onde a Sequência Principal “termina”

Evolução depende da Massa, portanto, as mais massivas saem mais cedo da SP

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

Diagrama H-R de Aglomerados Globulares

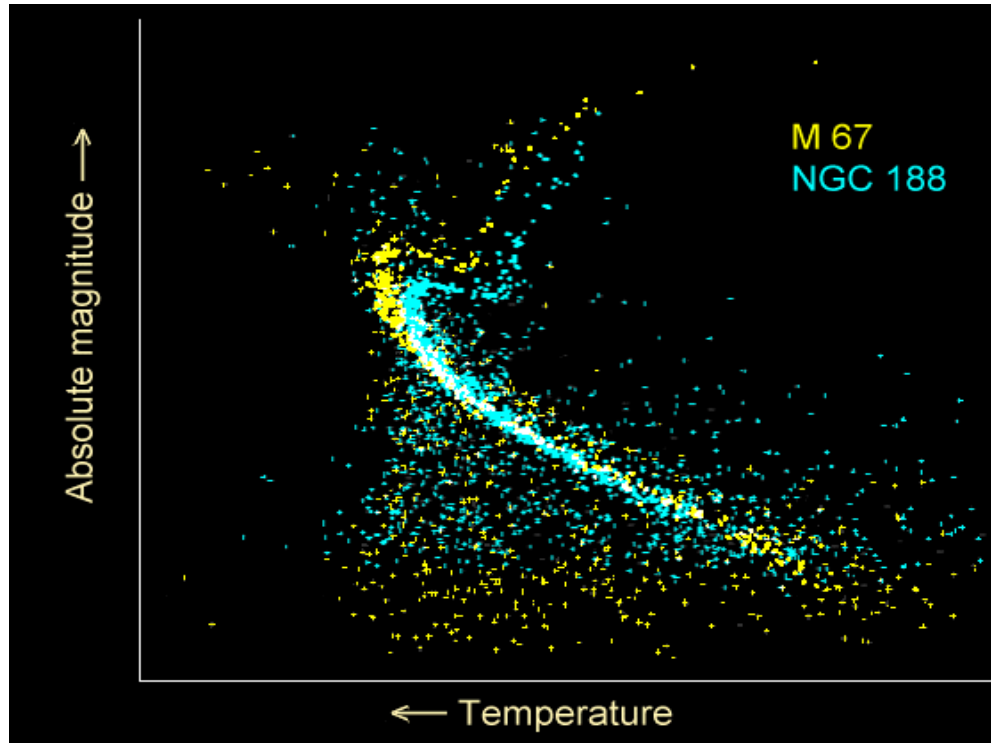
...a comparação dos aglomerados permite dizer qual deles é mais velho ou mais jovem



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



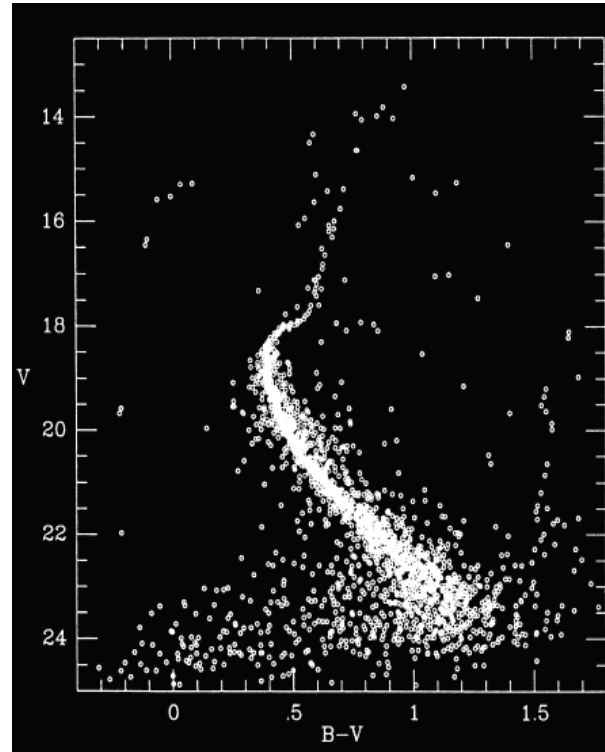
Para M 67 a idade é estimada entre 2 e 3×10^9 anos.

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

DH-R de M92

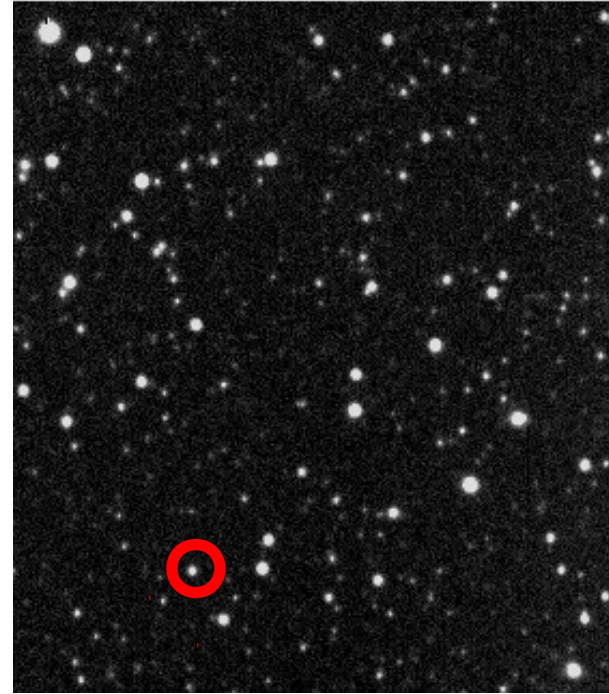
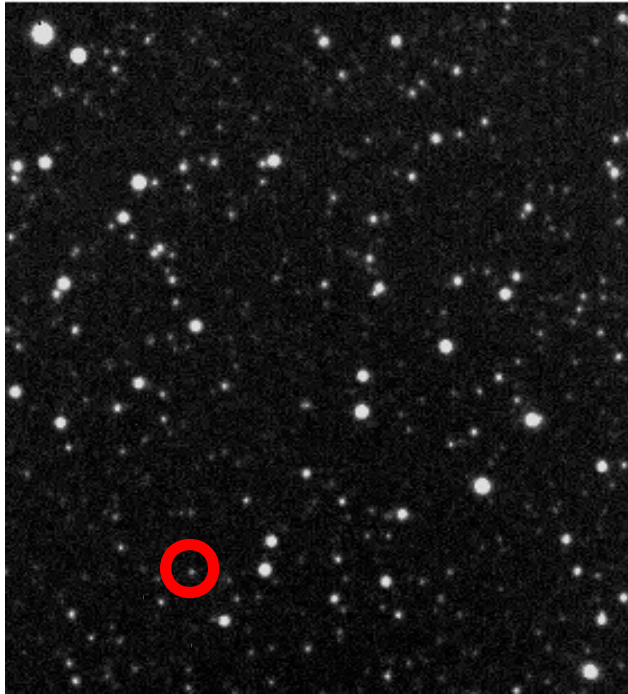


Tipo espectral	B-V	Idade (10^9 anos)
O	-0.4	<0.001
B	-0.2	0.03
A	0.2	0.4
F	0.5	4
G	0.7	10
K	1.0	60
M	1.6	>100



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!!)

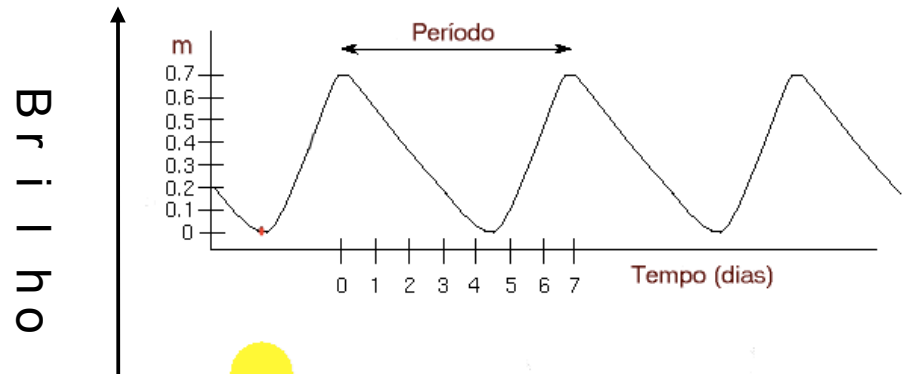
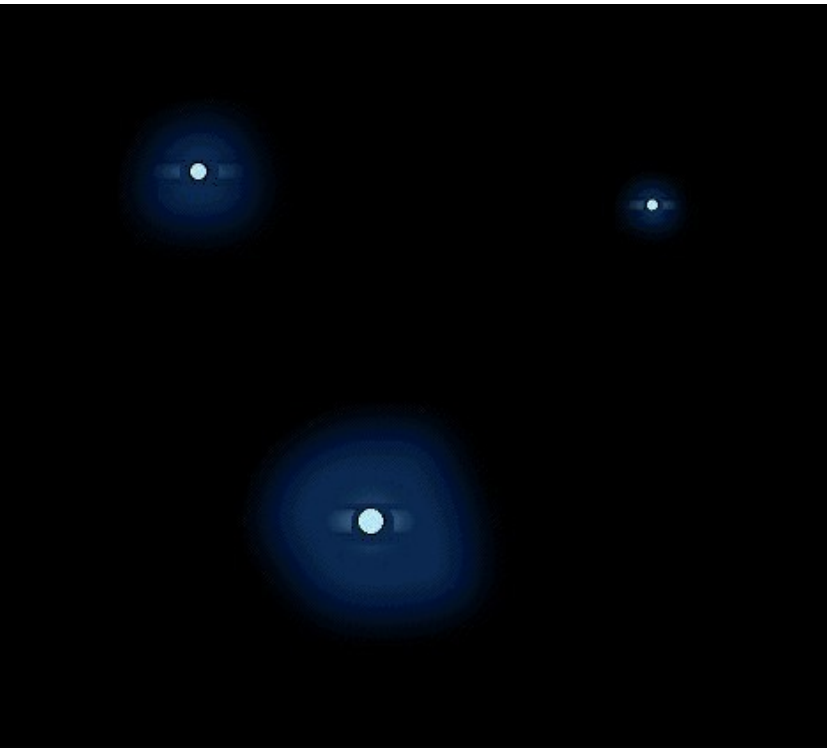
Estrelas Pulsantes

...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:

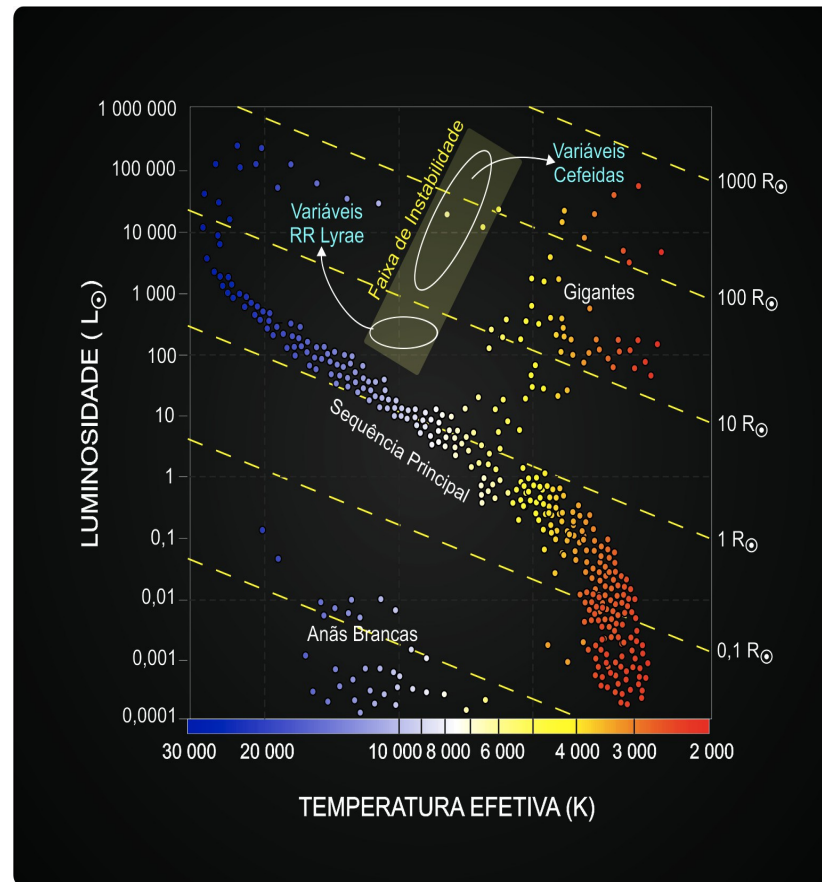
- Entre a SP e as gigantes vermelhas.
- Estrelas nesta região pulsam regularmente.

* **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

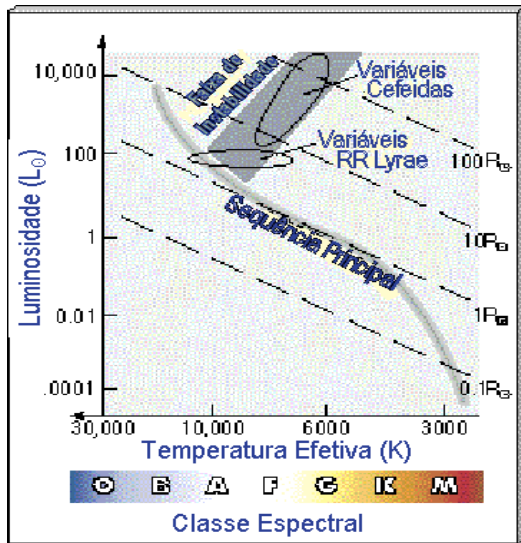
Variáveis de longo período

(~ 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 superfície 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 \rightarrow C no núcleo**

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

Pulsa porque?

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

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

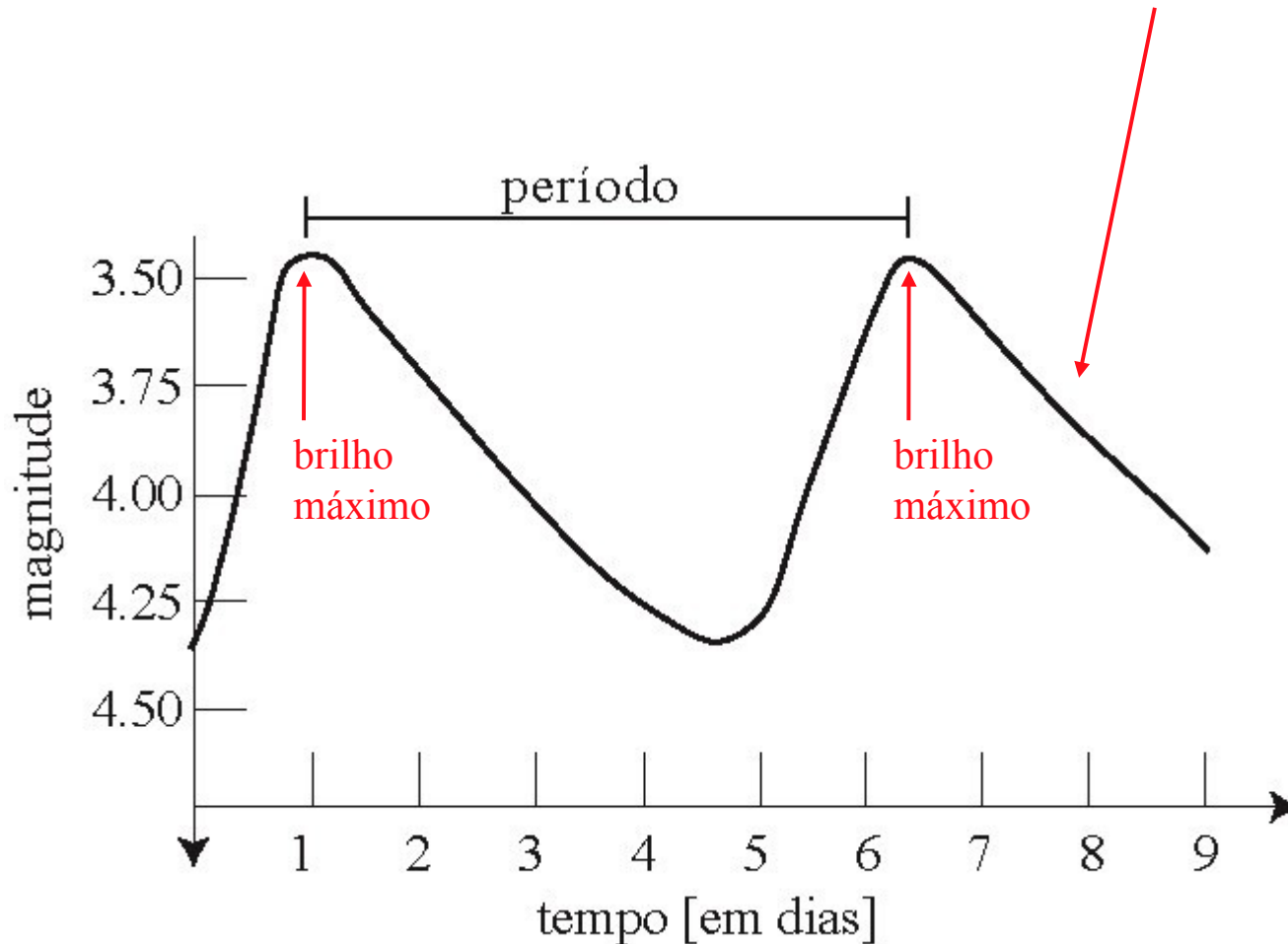
O processo funciona como uma válvula.

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

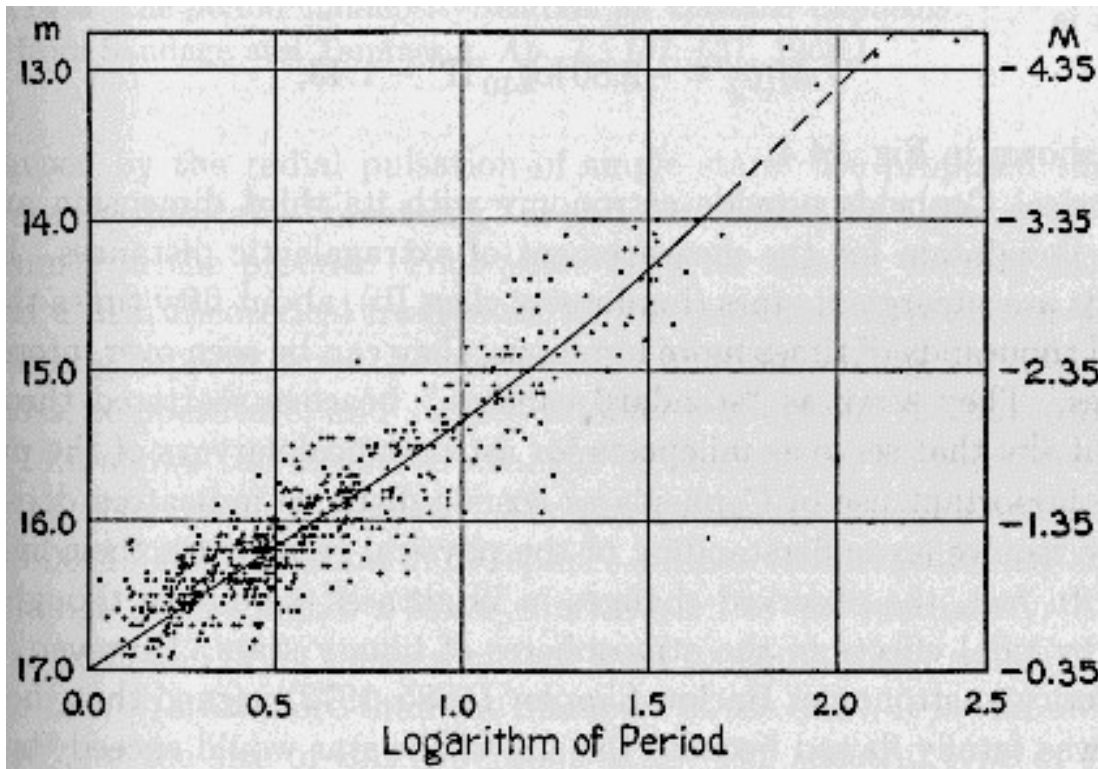
- Protótipo é Delta Cephei, estrela cuja luminosidade varia de um fator 2,3 (quase uma magnitude) em cerca de 5 dias e 10 horas.
- A variação da luminosidade pode ser apresentada como uma Curva de Luz:



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

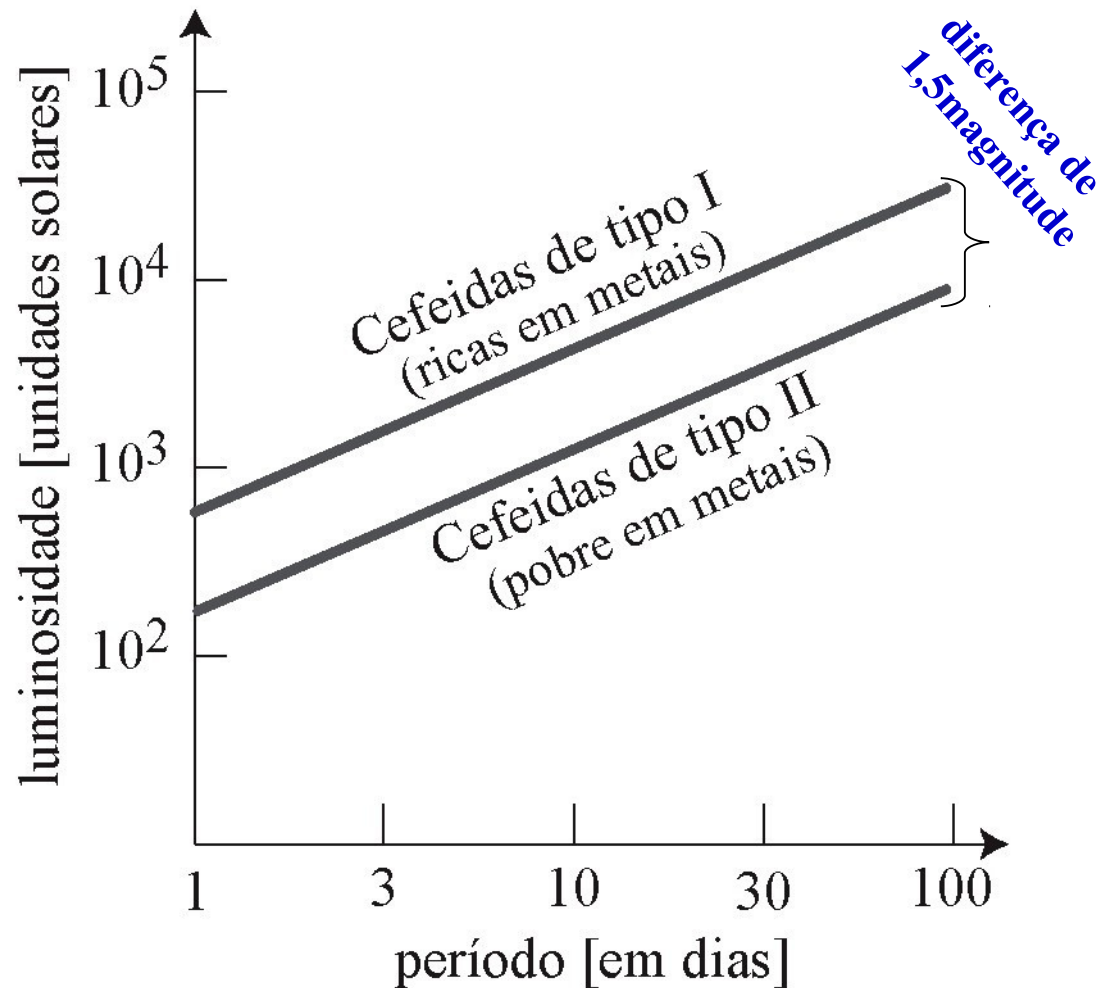
$$M_{bol} = -3,125 \log P - 1,525$$

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...



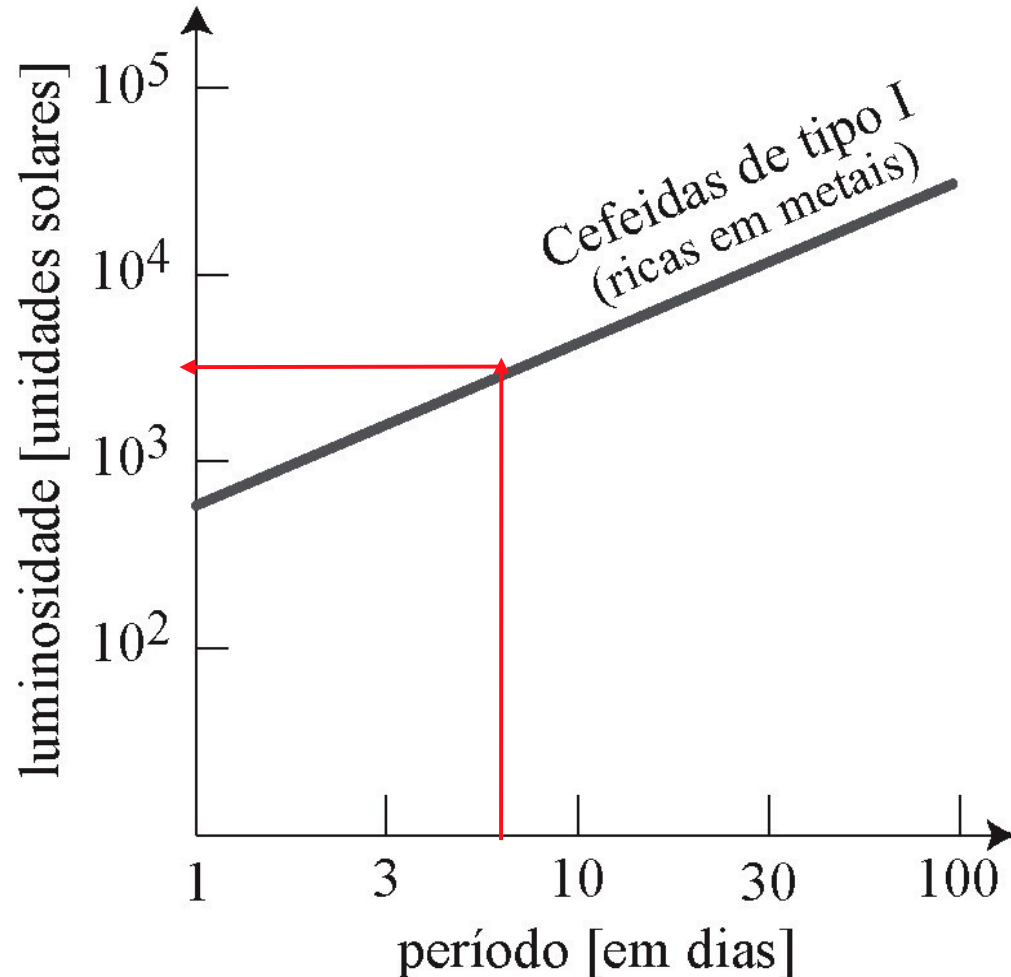
2- **Obtem-se** a luminosidade intrínseca.

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.

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

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

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

→ a **1 Mpc de distância:**

sua magnitude aparente será $m_V = 20$.

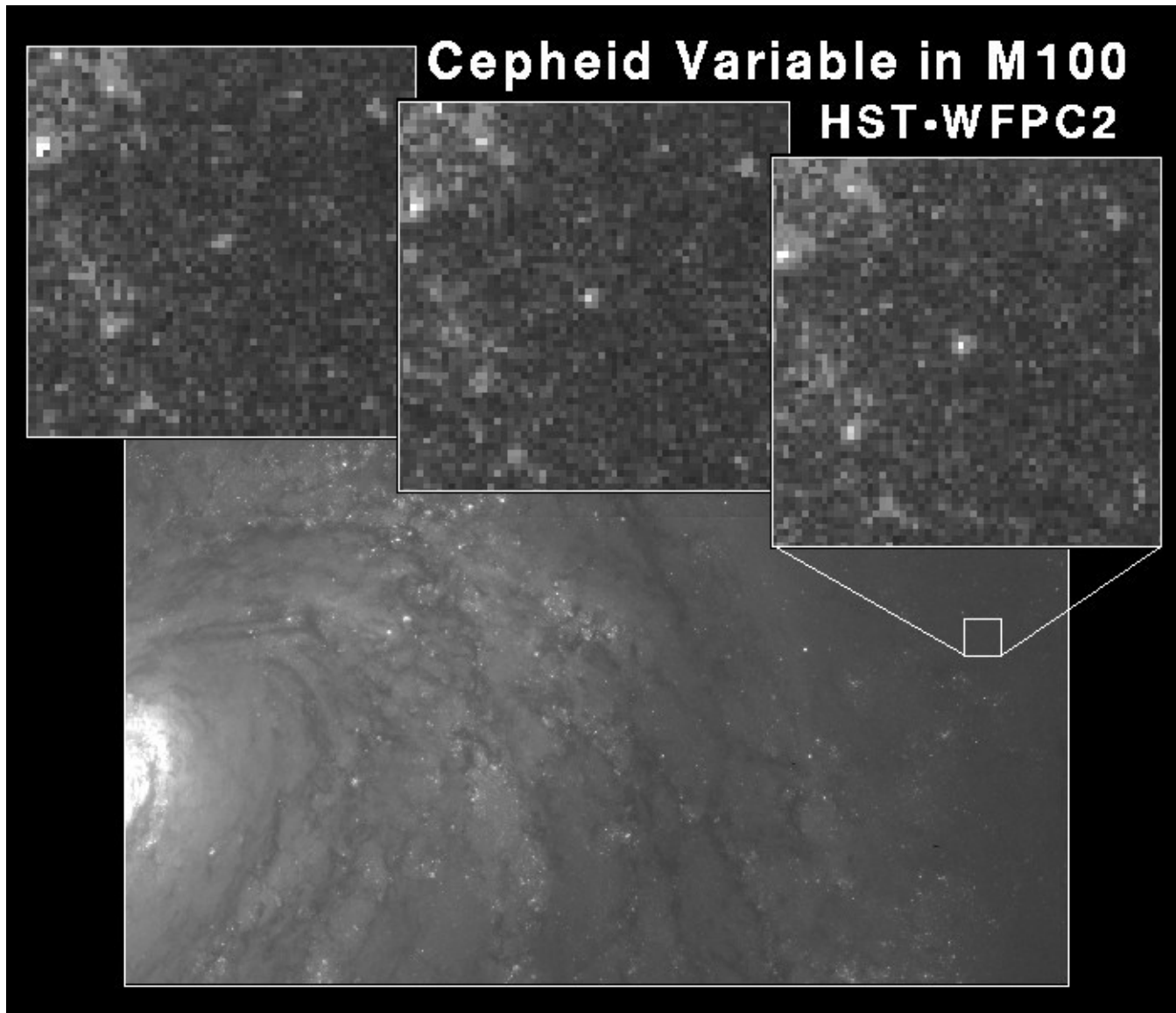
Observável em um bom telescópio de $\approx 2,5\text{m}$ de diâmetro.

→ 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

Na próxima aula veremos o que ocorre com o material das nuvens moleculares que não foram transformados em estrelas....