

Evolução de Estrelas em Sistemas Binários

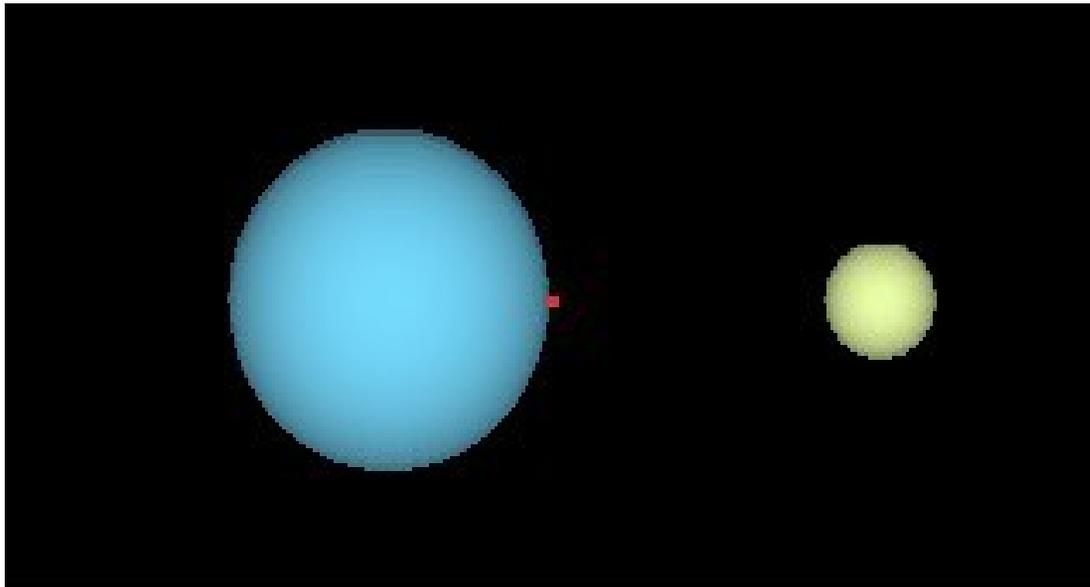
Binárias: novas, novas recorrentes
Supernova tipo Ia
Nucleossíntese

Sandra dos Anjos
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.

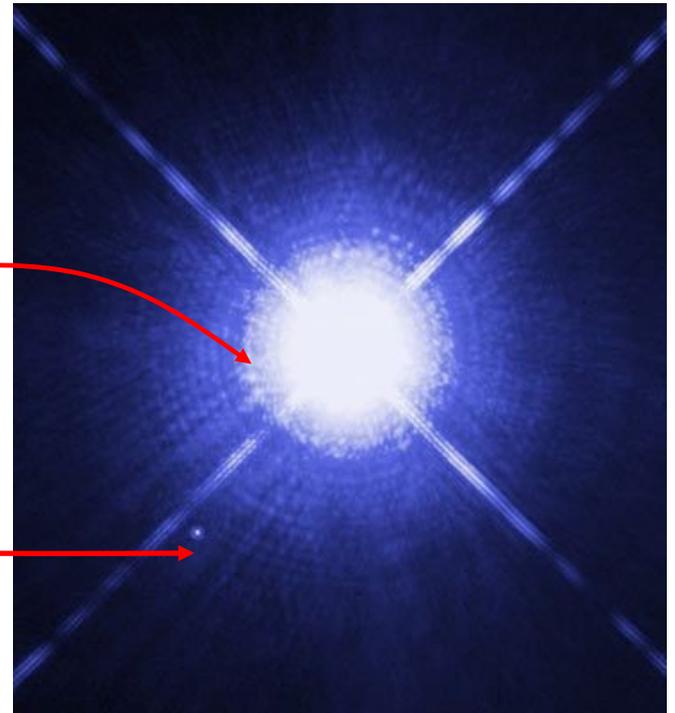
Evolução de Estrelas em Sistemas Binários

Em um par onde as estrelas têm massas diferentes:

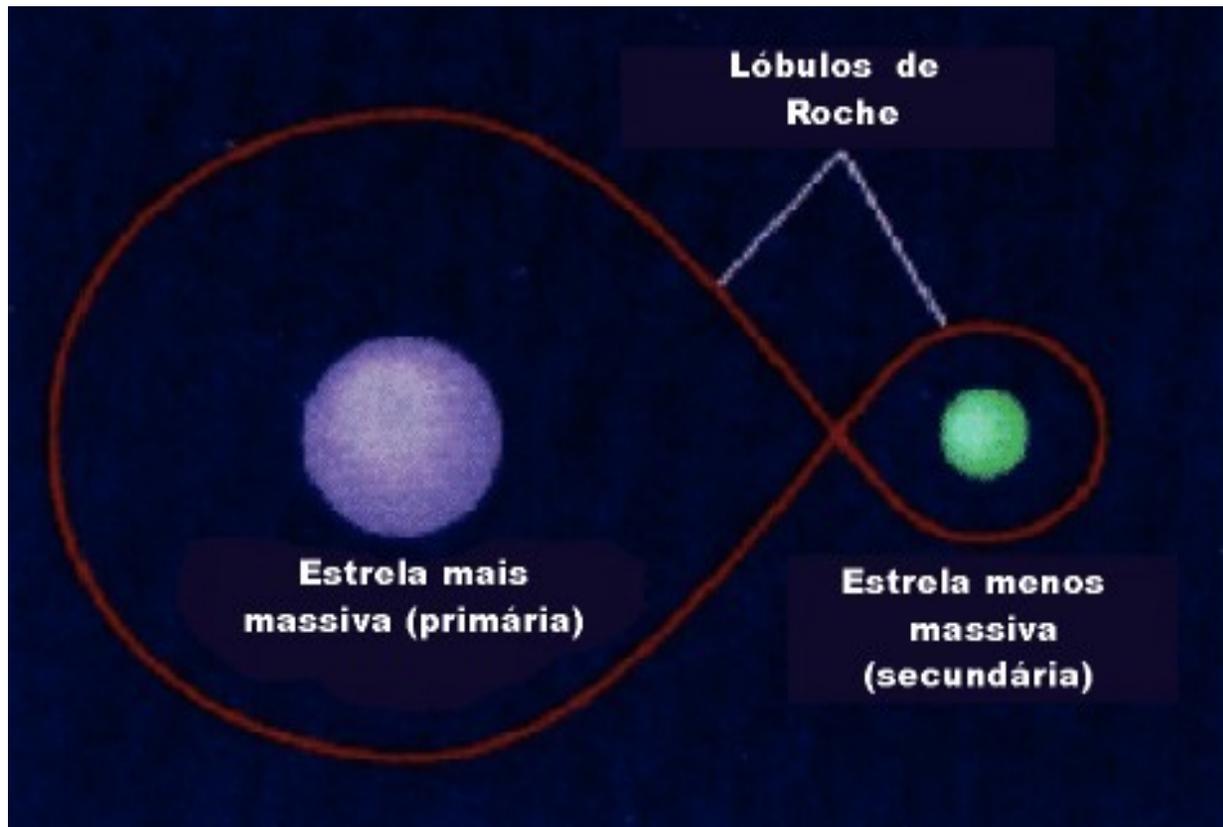
A estrela **mais massiva** do par evolui mais rápido e evoluirá para uma **Anã Branca**.
A outra estrela, **menos massiva**, ainda estará na **Sequência Principal**.

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.



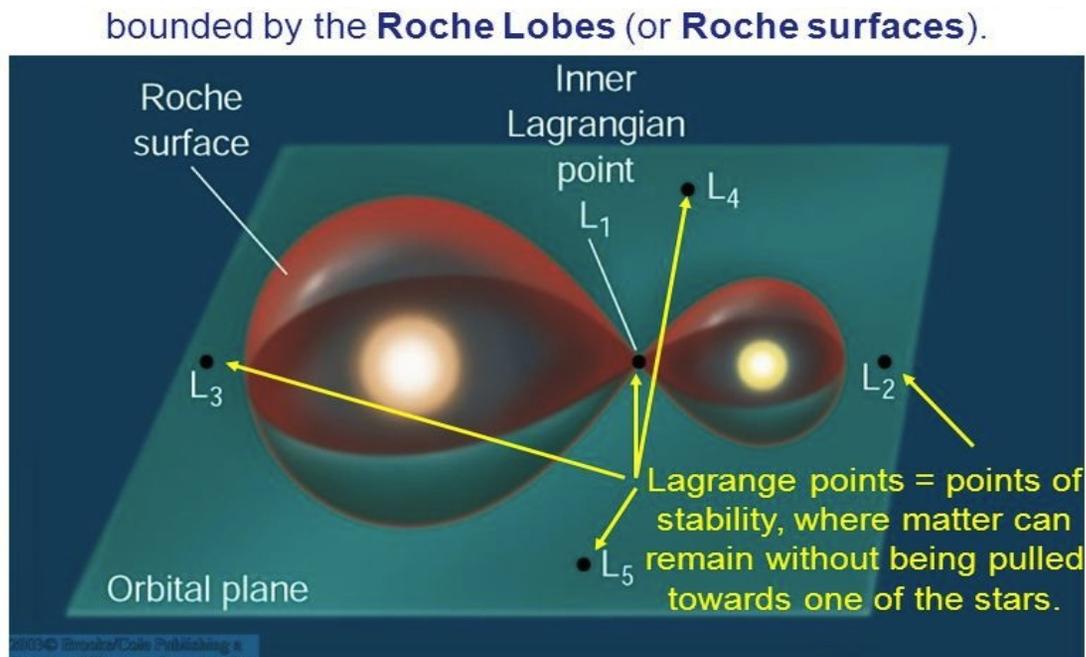
Nestes sistemas binários ocorrem fenômenos importantes relacionados ao **domínio de forças entre as estrelas**, que irão afetar a evolução destas estrelas que estão em fases de evolução diferentes...



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.

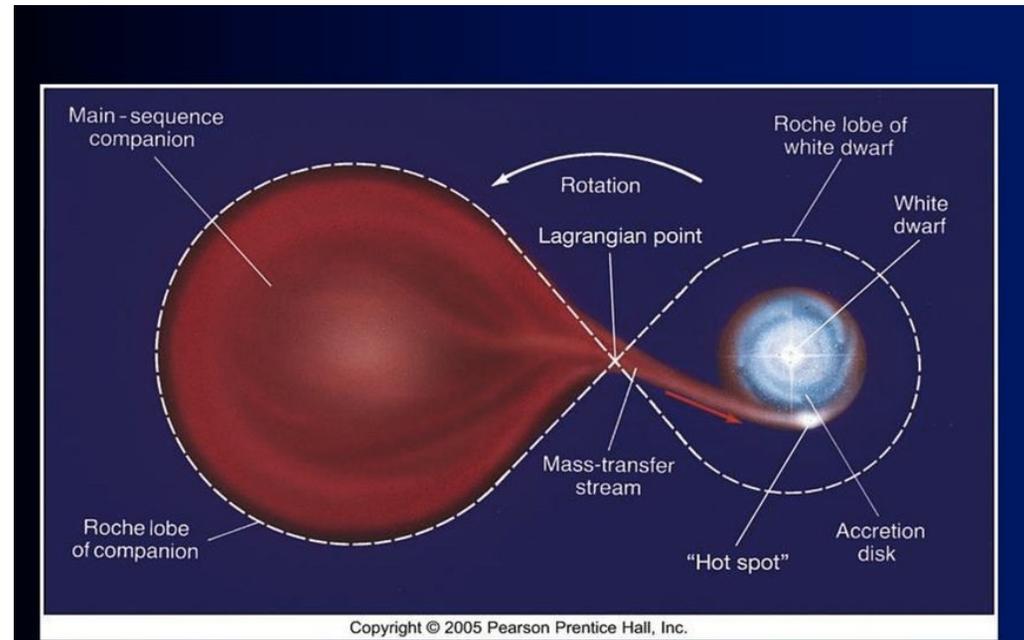
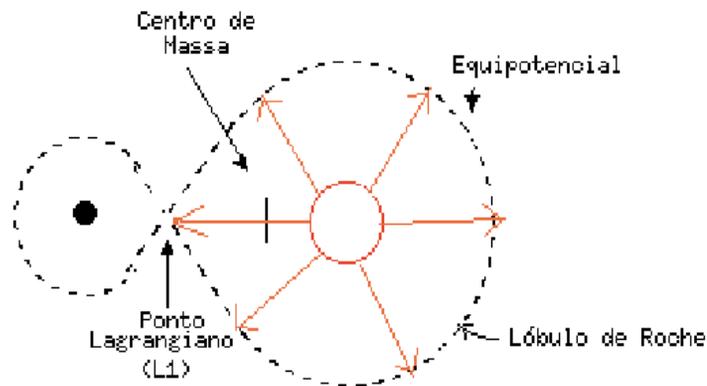
Nesta superfície existem **pontos de equilíbrio**, os pontos de Lagrange, onde a atração gravitacional de 2 estrelas se encontra em equilíbrio com a rotação do Sistema Binário.



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

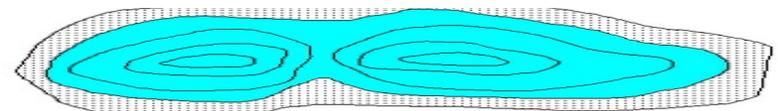
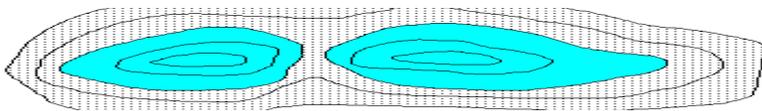


O Centro de Massa representa um ponto de equilíbrio da distribuição de massa.

Exemplo de Superfície Equipotencial

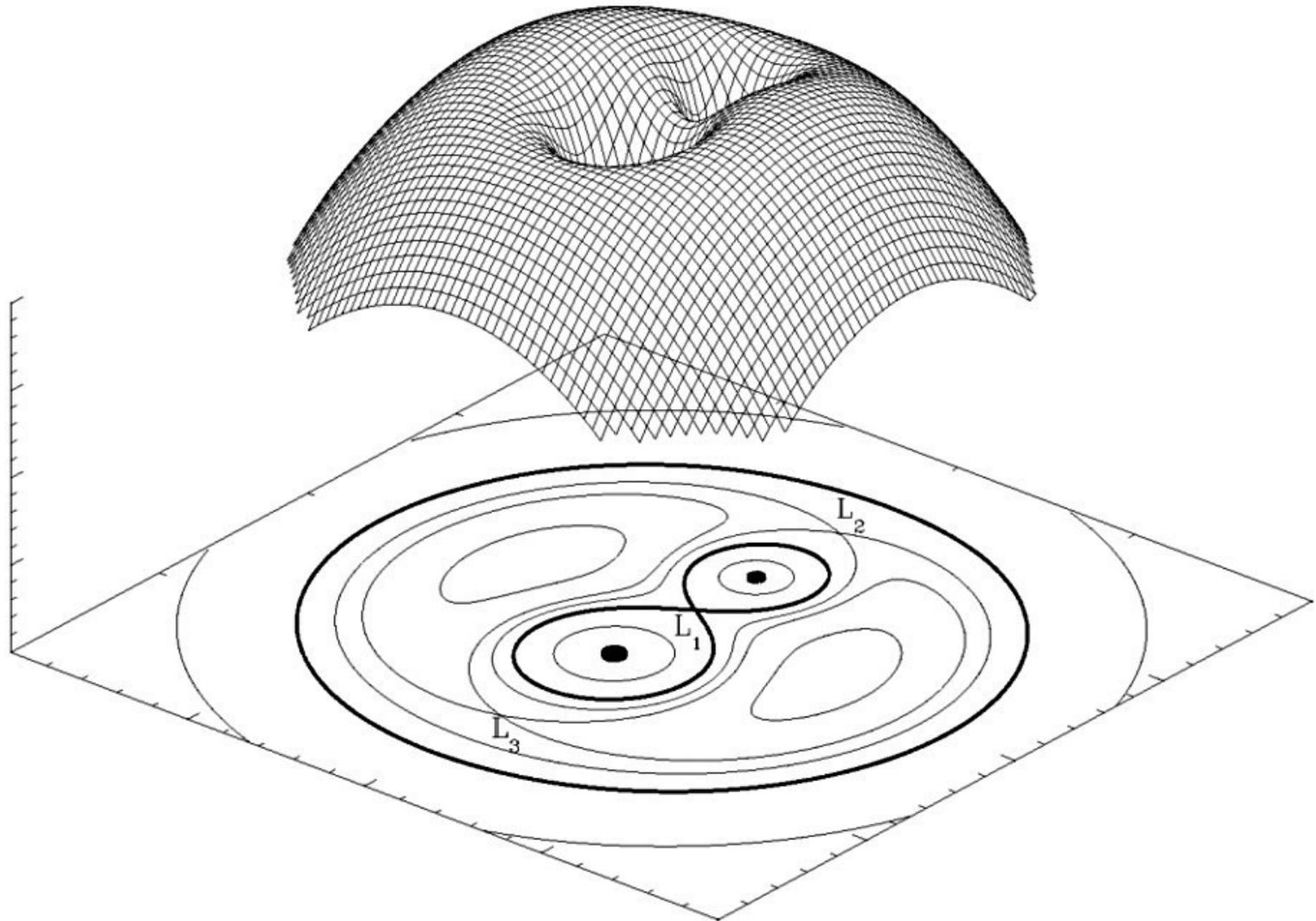
O **nível** de água de dois lagos separados por um morro é equivalente em ambos os lagos. A medida que este nível sobe, a cada instante, ele estará ocupando um determinado nível de água, ou seja, uma linha de **potencial constante, uma equipotencial**.

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



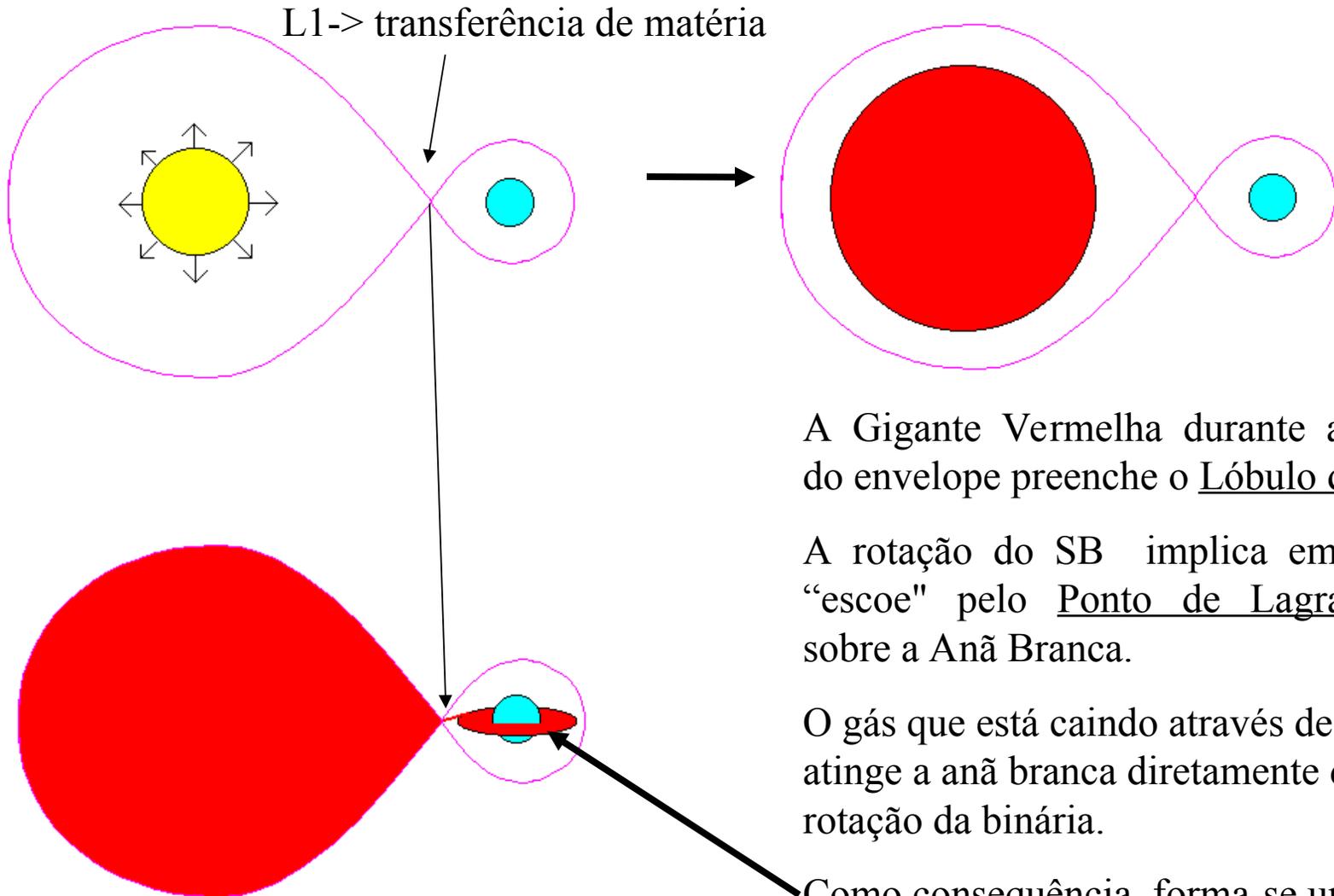
Linhas equipotenciais são semelhantes a linhas de contornos de mapas, onde cada contorno representa um nível. O nível de água no lago aumenta seguindo linhas de equipotencial. Pode acontecer do nível de água aumentar nos 2 lagos a ponto de se unirem e serem então representados por um único nível de água,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

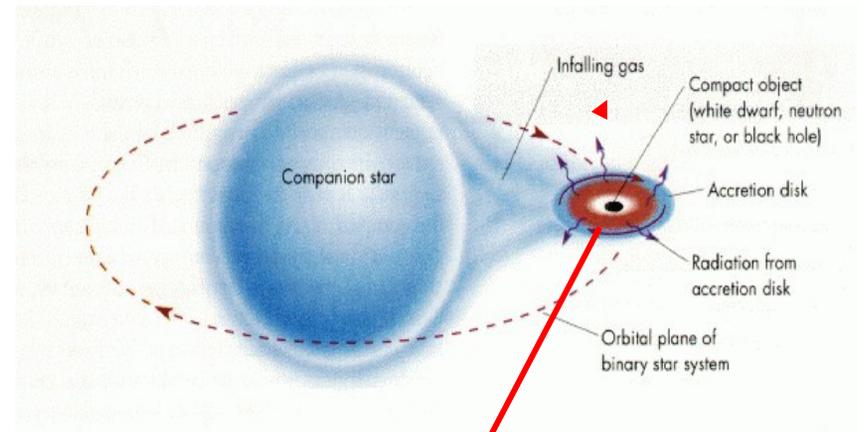
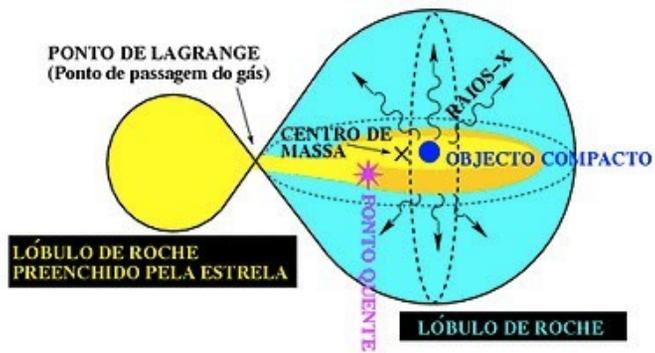


A Gigante Vermelha durante a expansão do envelope preenche o Lóbulo de Roche.

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.

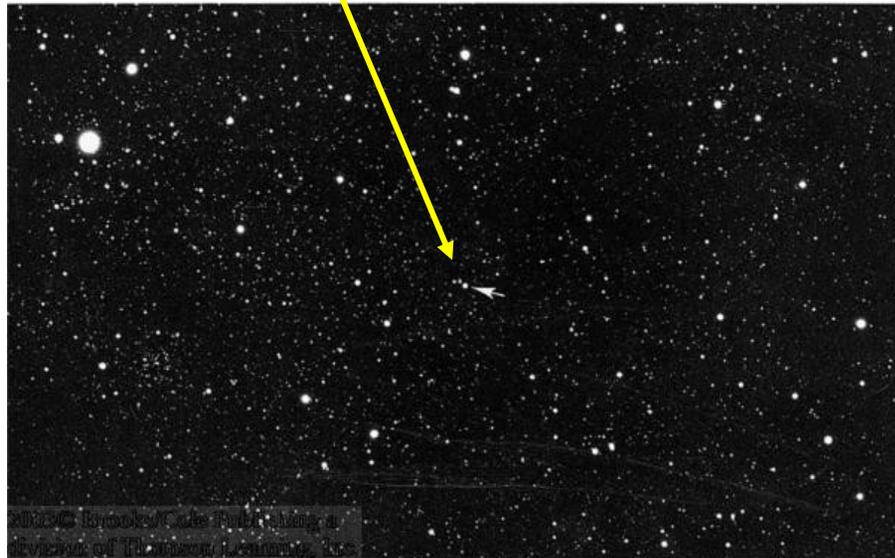
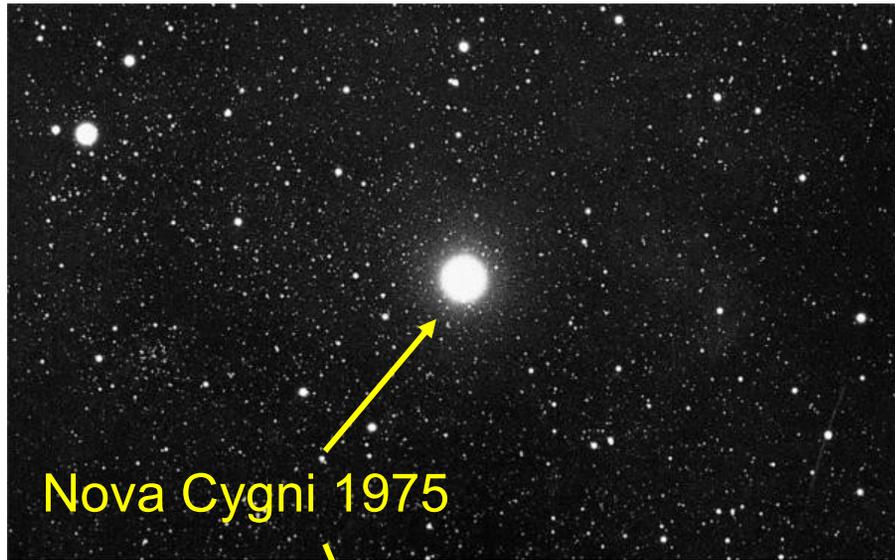
Como consequência, forma-se um disco de acreção em torno da anã branca



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

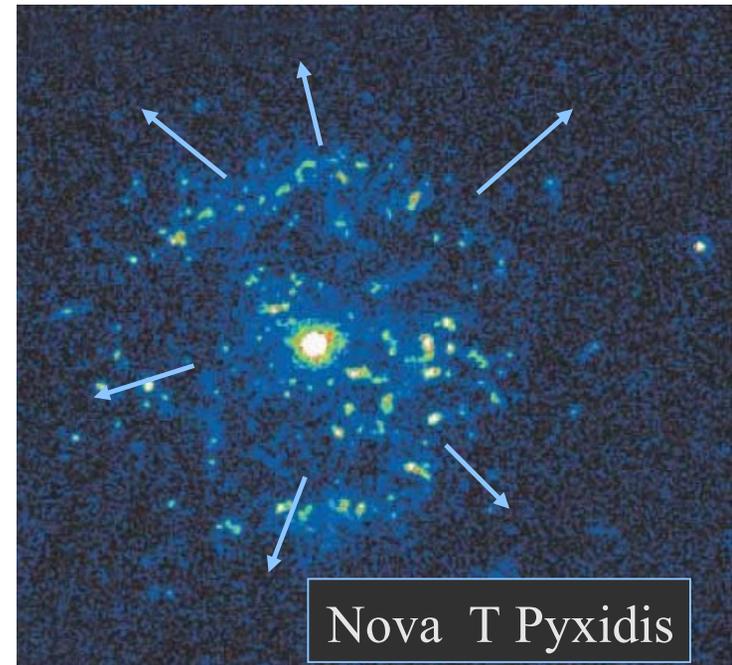
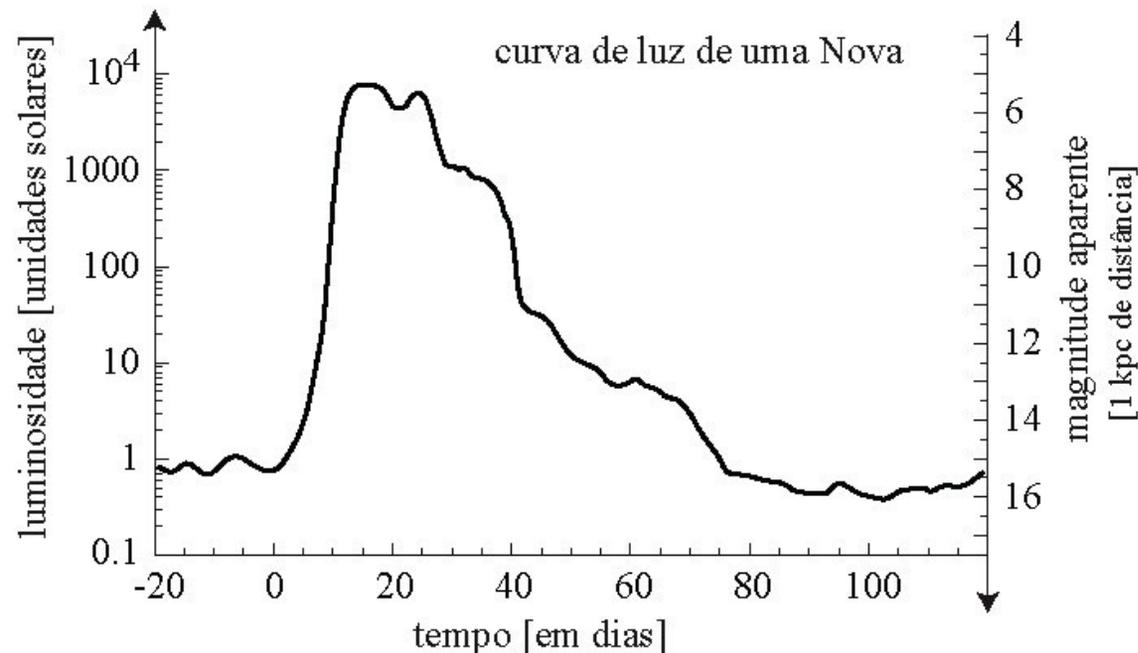
Se o aumento de luminosidade é de um **fator 10** (2,5 magnitudes):

- **Nova anã.**

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

- **Nova clássica.**

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



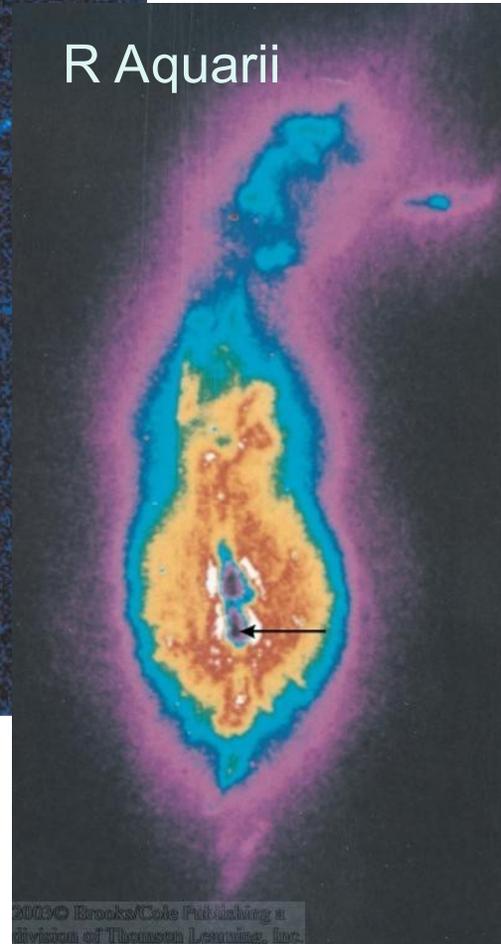
Nova Recorrentes

T Pyxididis



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



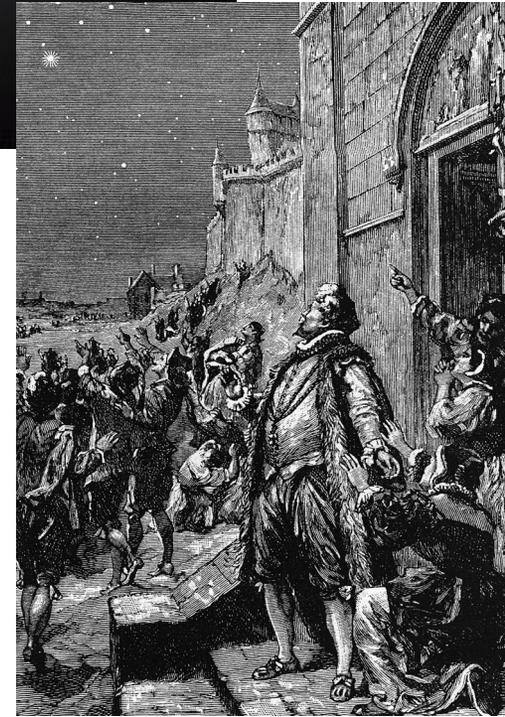
Anã Branca e detonação da Supernova Ia

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

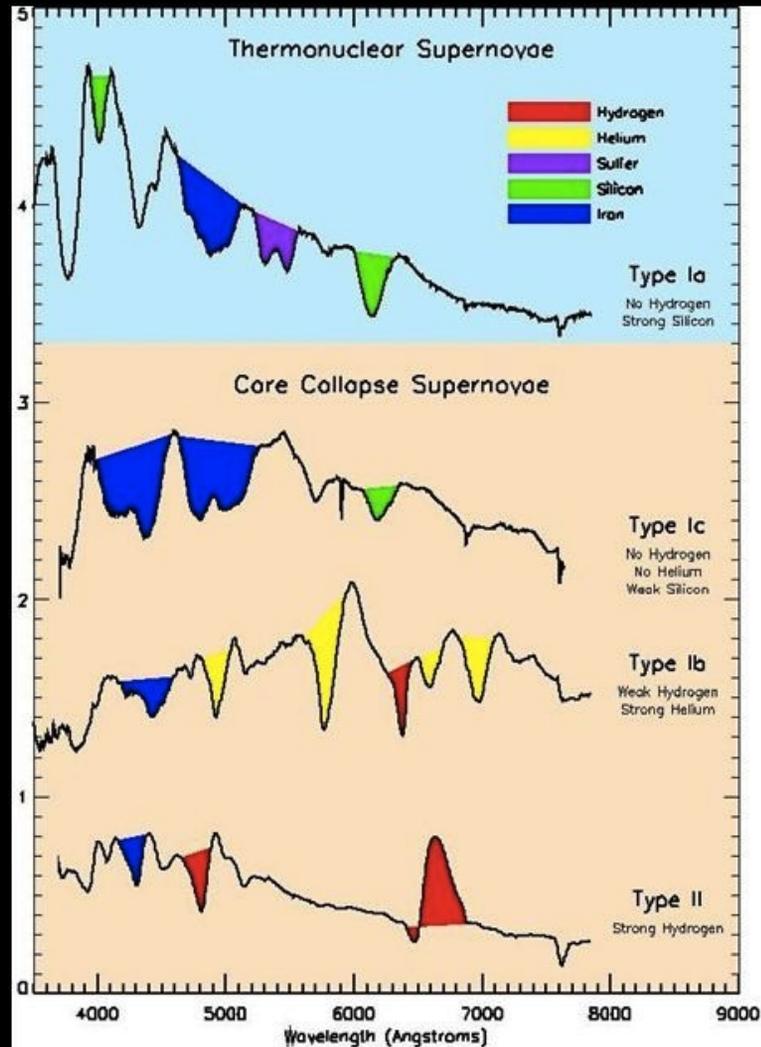
Found only in new star regions

Type II

H in spectra

May be further
subdivided based
on light curves

Espectros – Tipos 1 e 2



Supernova Tipo Ia

X

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

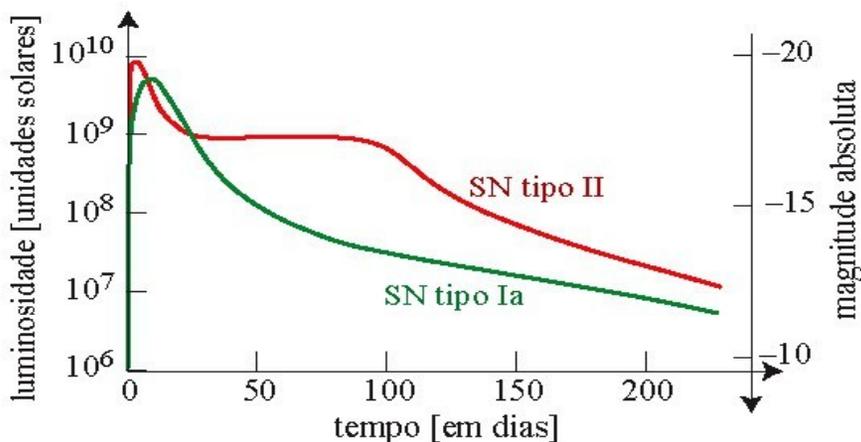
Luminosidade máxima é praticamente a mesma

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

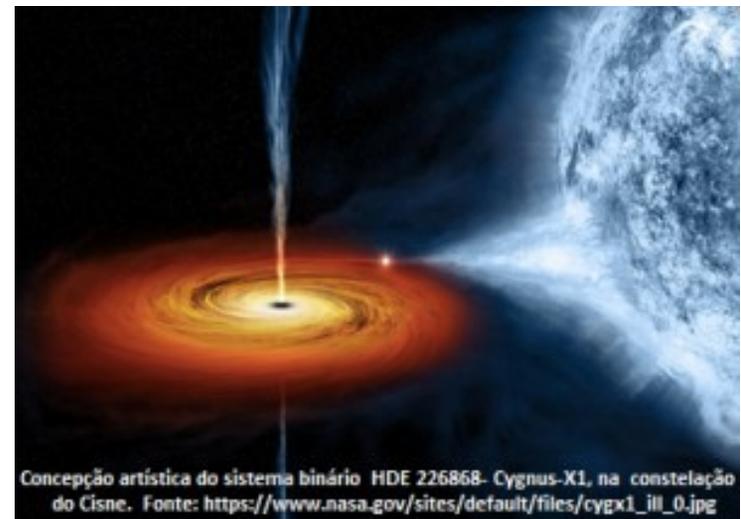
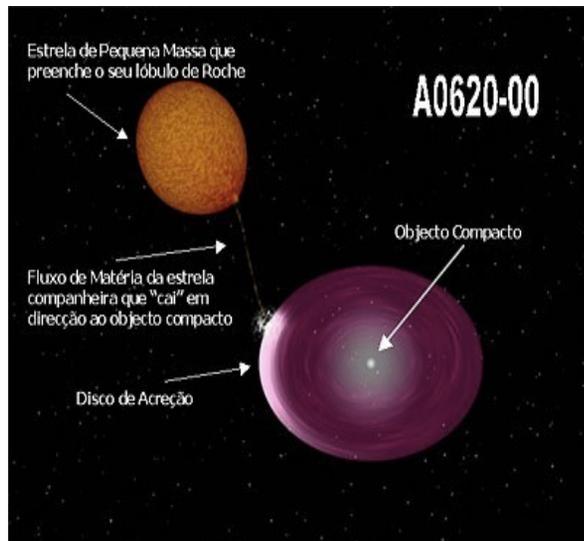


Objetos Compactos em Sistemas Binários

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

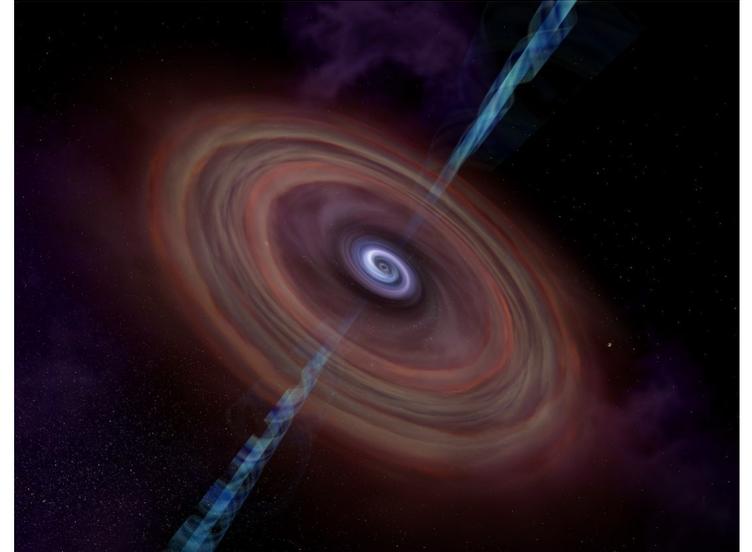
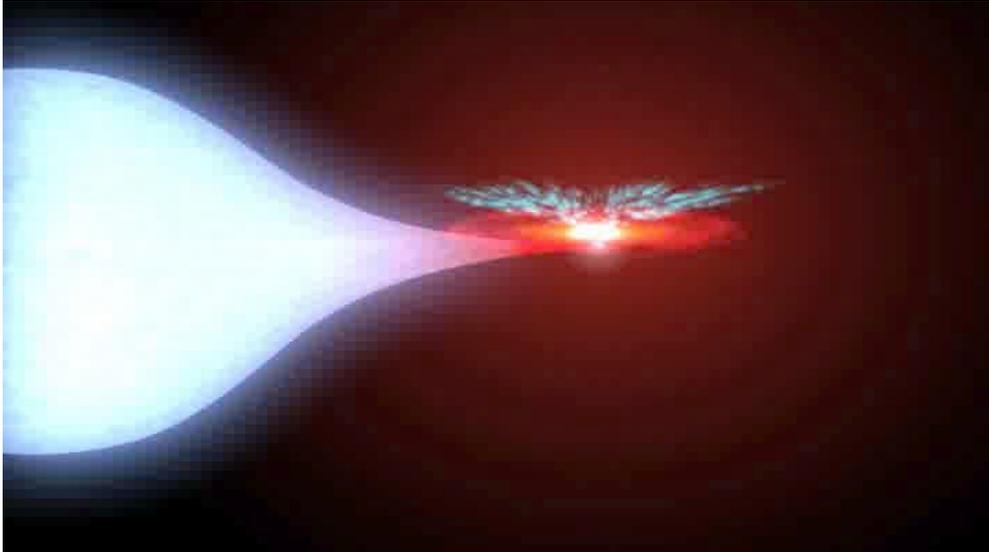
Buracos negros isolados são praticamente impossíveis de serem observados.

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

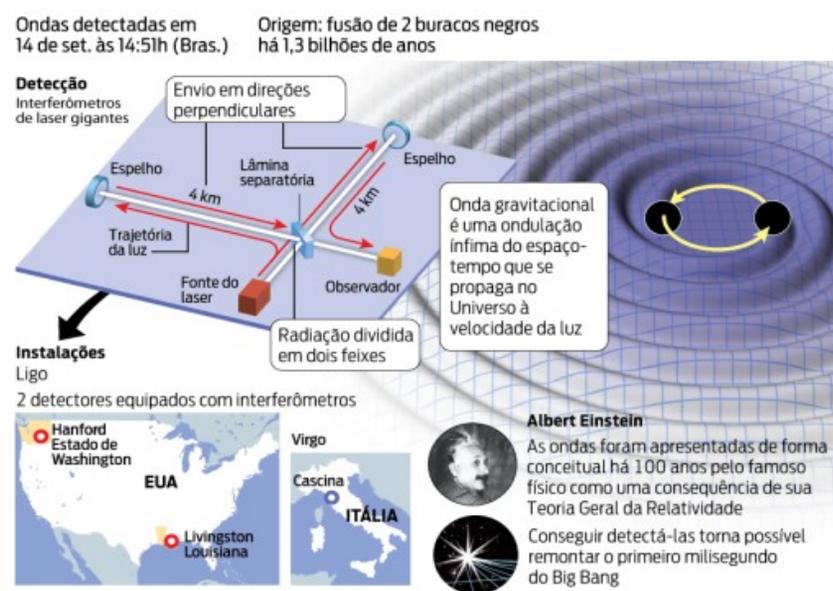
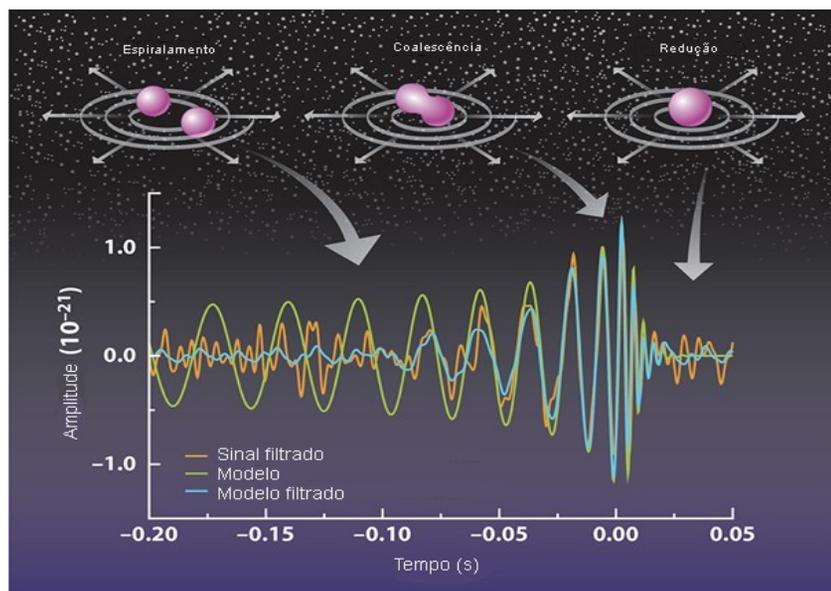


A interação com o campo magnético provoca a ejeção de partículas (jatos)

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**.

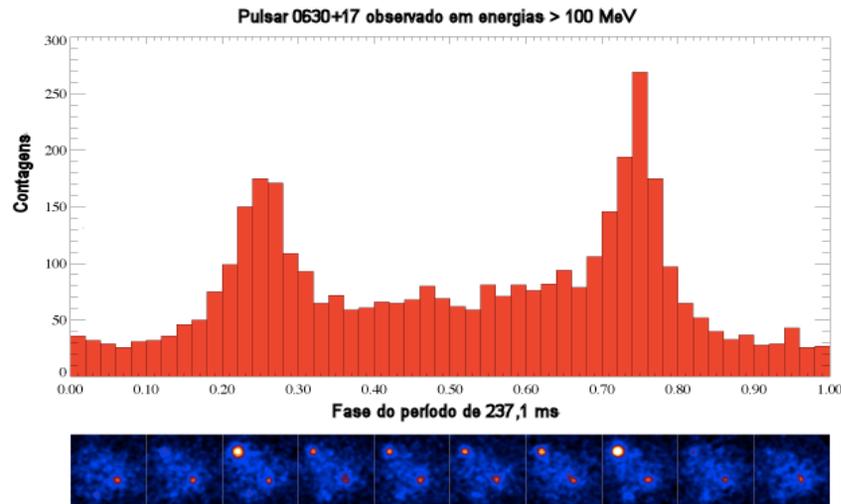
O primeiro, em setembro de 2015, com massa (35 ± 4) e outro com (30 ± 4) M_{Sol} , no núcleo de uma galáxia distante (fig. abaixo). O segundo, em dezembro de 2015, com buracos negros de 8 e 14 massas solares, resultando em um buraco negro de 21 massas solares, e convertendo 1 massa solar em energia. 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 1 (pags 41-43)

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

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.

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		

Veremos a seguir o papel dos Aglomerados de Estrelas e de Estrelas Variáveis no contexto da **Evolução Estelar**