

Evolução de Estrelas em Sistemas Binários

Binárias: novas, novas recorrentes
Supernova tipo Ia
Nucleossíntese

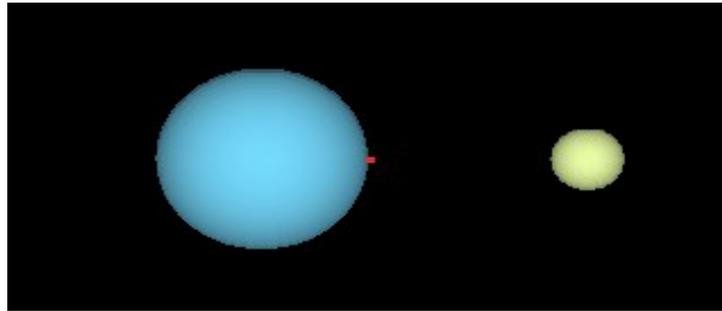
2º Semestre/2020

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.

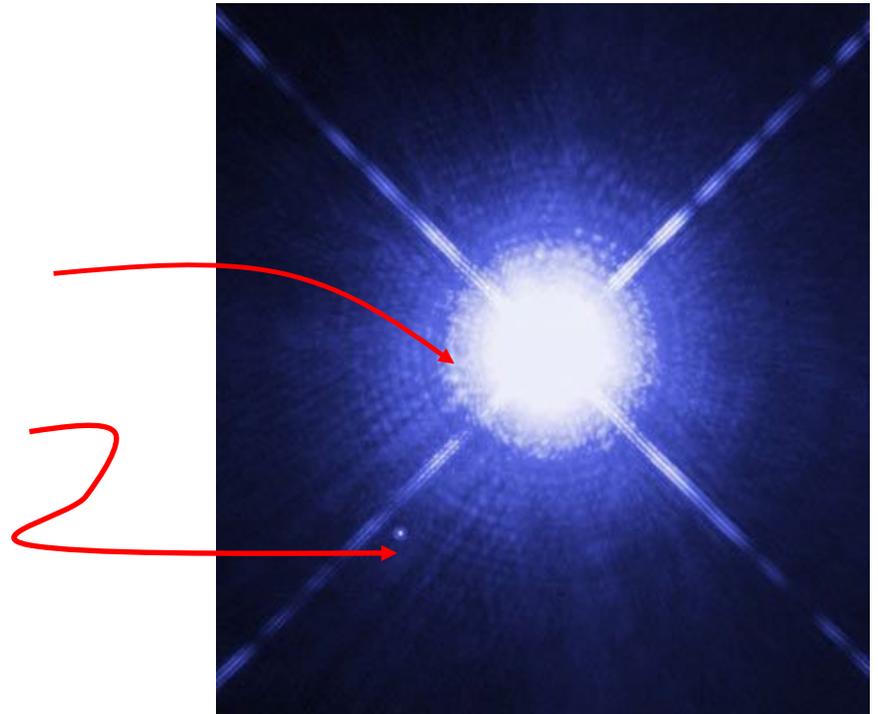
Evolução de Estrelas em Sistemas Binários

Em um par onde as estrelas têm massas diferentes:

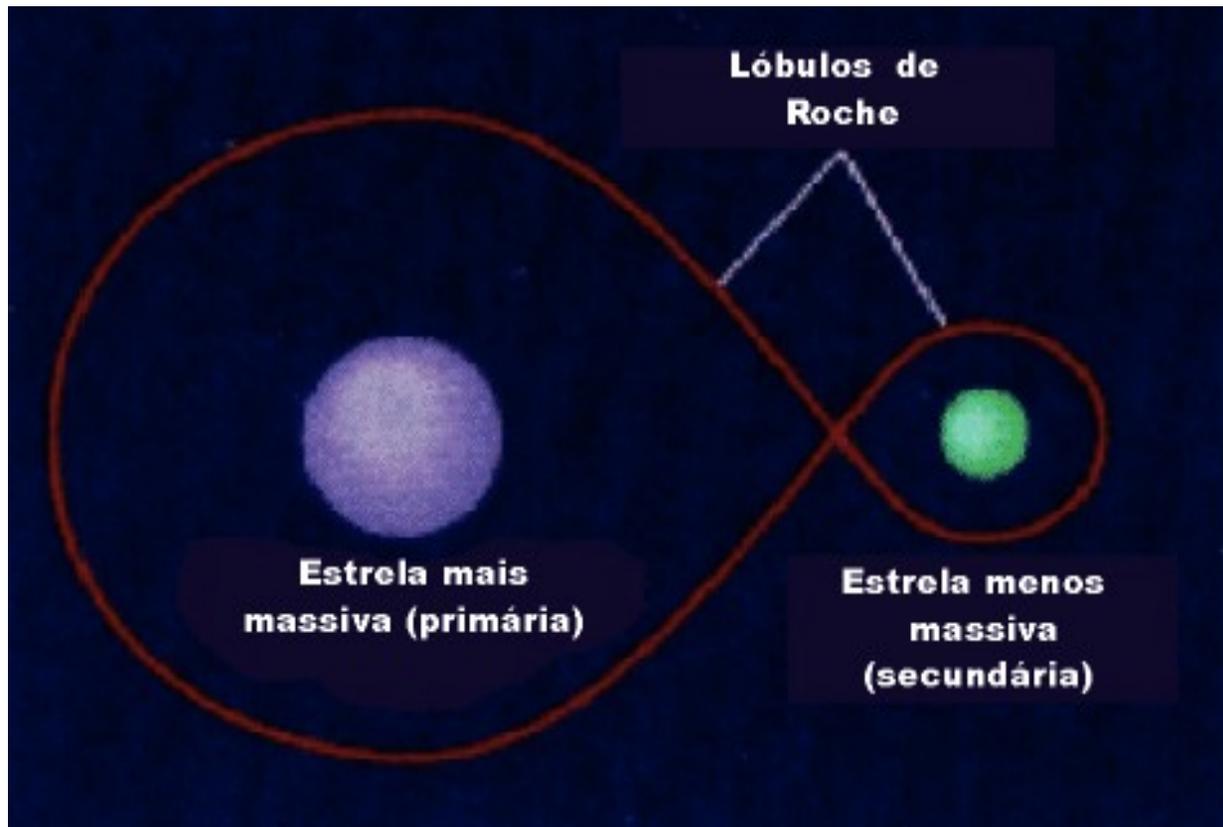
A estrela mais massiva do par evolui mais rápido e evoluirá para uma Anã Branca.
A outra estrela, menos massiva, ainda estará na Sequência Principal.

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.



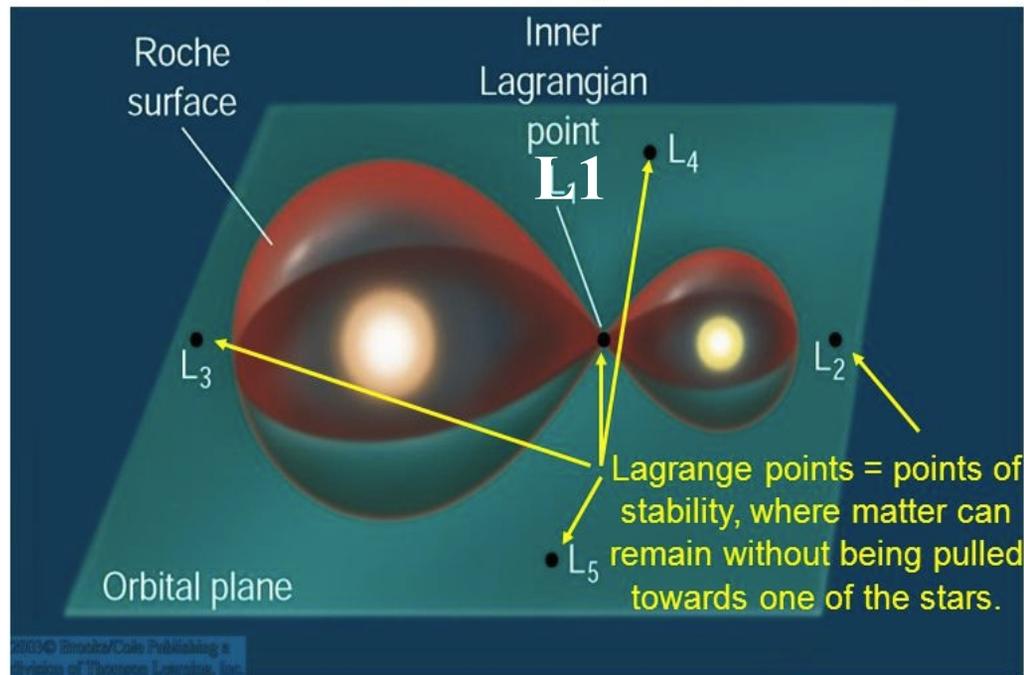
Nestes sistemas binários ocorrem fenômenos importantes relacionados ao **domínio de forças entre as estrelas**, que irão afetar a evolução destas estrelas estão em fases de evolução diferentes...



Cada estrela do sistema binário gera um domínio de força de gravidade próprio, em forma de gota, criando uma superfície em forma de “8”, definida como **Lóbulo de Roche**.

A superfície do “Lóbulo de Roche” funciona como uma superfície equipotencial....

Nesta superfície existem pontos de equilíbrio, os pontos de Lagrange, onde a atração gravitacional de duas estrelas equilibra exatamente a rotação dos sistemas binários.

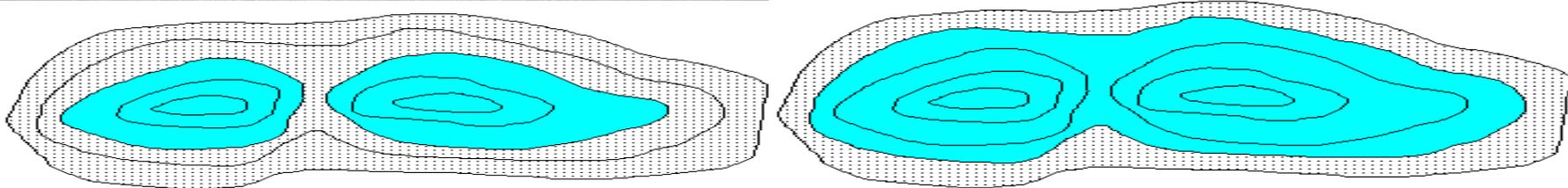


Um ponto em particular que vai nos interessar no caso da evolução de sistemas binários é o ponto **L1**, onde a gravidade efetiva é zero

Exemplo de Superfície Equipotencial

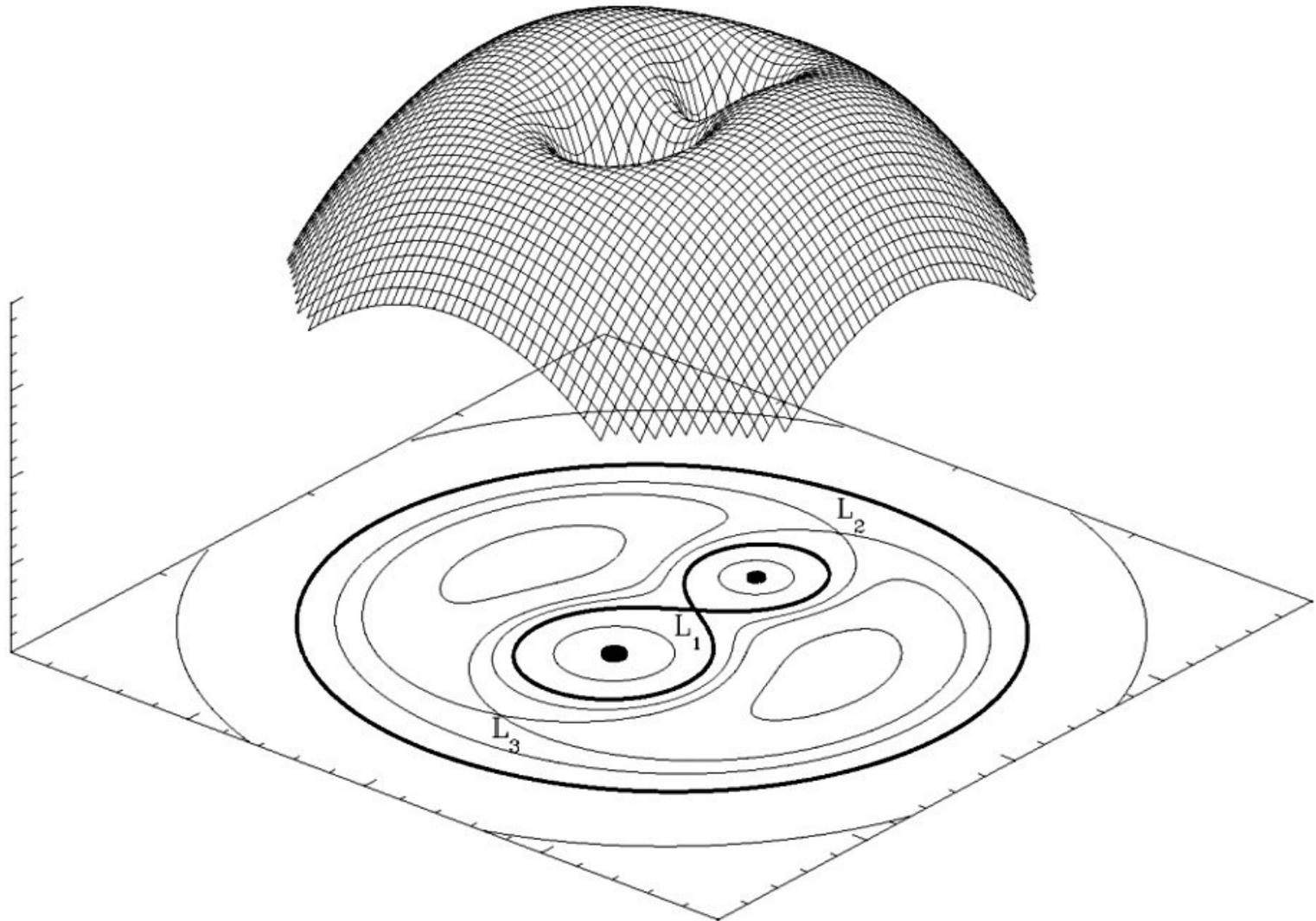
O **nível** de água de dois lagos separados por um morro é equivalente em ambos os lagos. A medida que este nível sobe, a cada instante, ele estará ocupando um determinado nível de água, ou seja, uma linha de **potencial constante, uma equipotencial**.

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



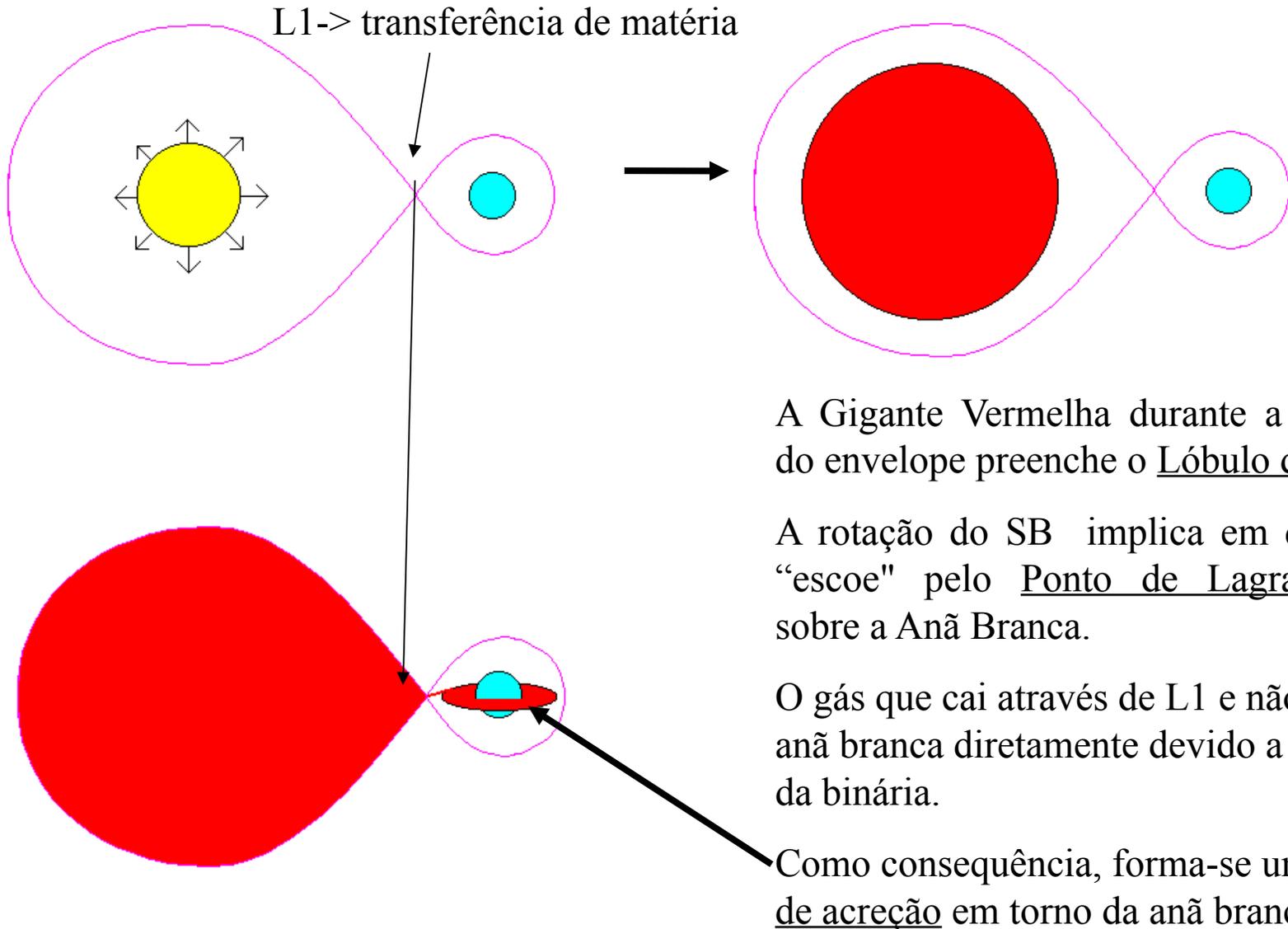
Linhas equipotenciais são semelhantes a linhas de contornos de mapas, onde cada contorno representa um nível. O nível de água no lago aumenta seguindo linhas de equipotencial. Pode acontecer do nível de água aumentar nos 2 lagos a ponto de se unirem e serem então representados por um único nível de água,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

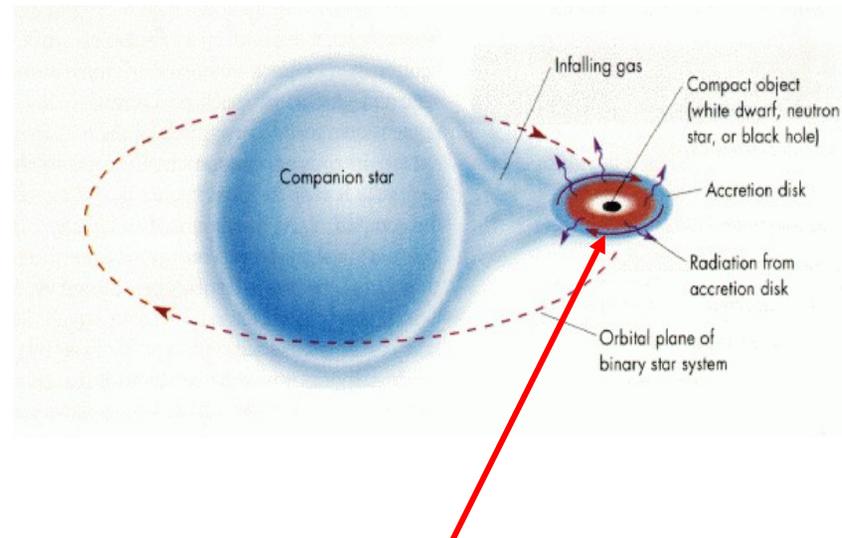
Com Sistemas Binários ocorre um fenômeno semelhante...



Fases de Evolução em Sistemas Binários (SB)

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

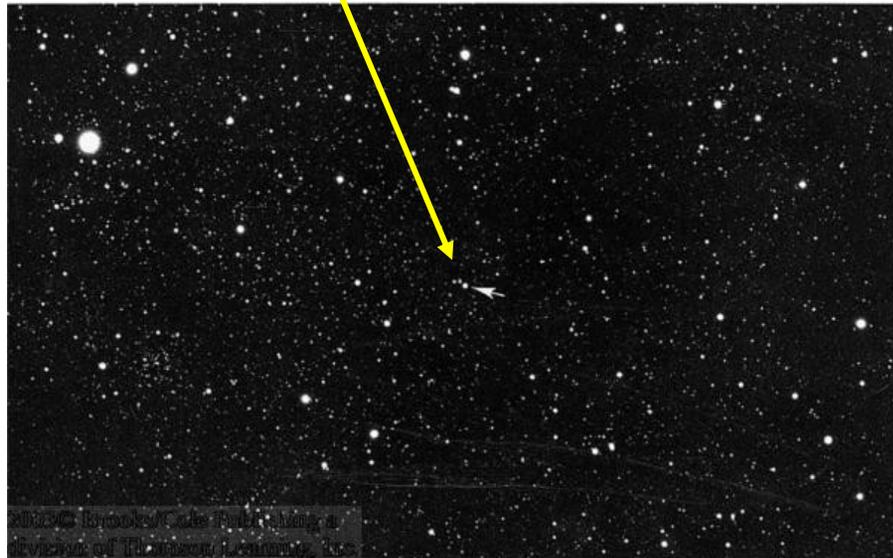
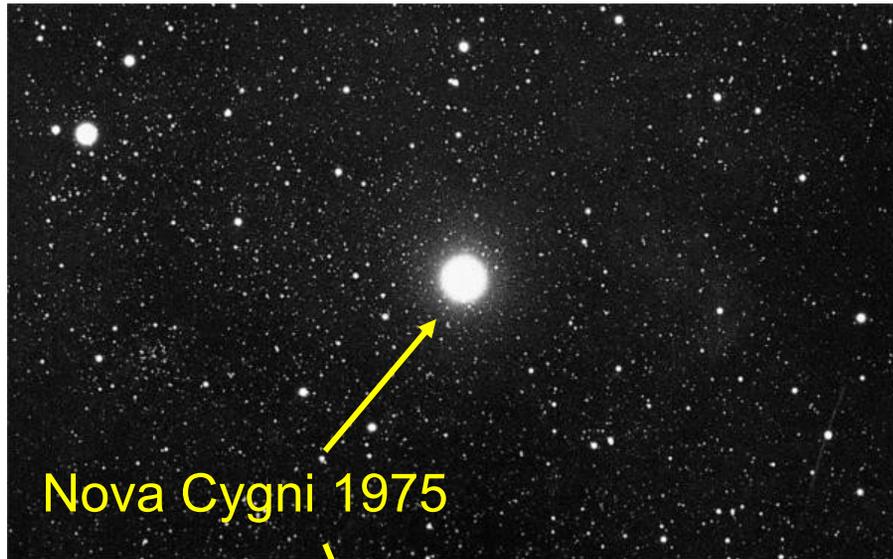




A estrela receptora do envelope da estrela que ocupa o lóbulos de Roche pode ser uma Anã Branca, Estrela de Neutrons ou Buraco Negro.

Nova

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



Hidrogênio acrescentado pelo disco se acumula no disco de acreção da anã branca.

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

Explosão: ... uma Nova.

Nova

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

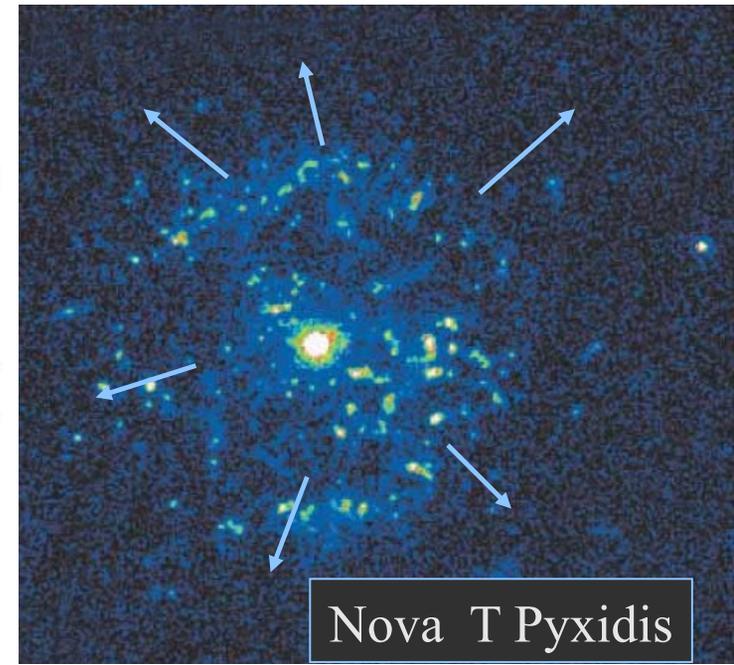
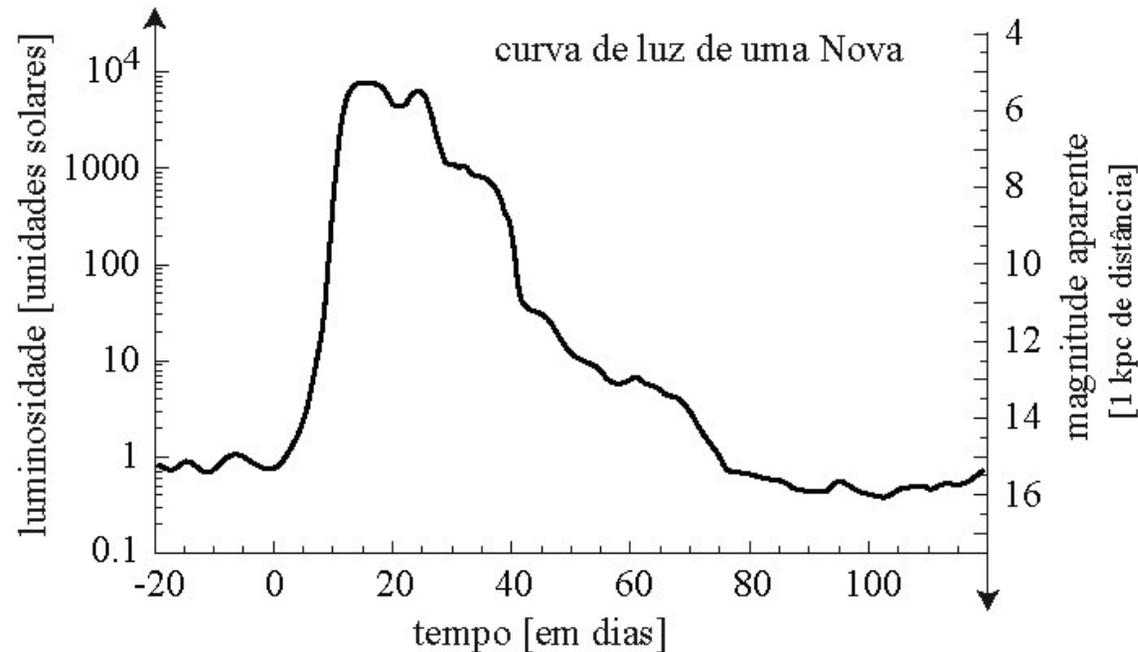
Se o aumento de luminosidade é de um **fator 10** (2,5 magnitudes):

- Nova anã.

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

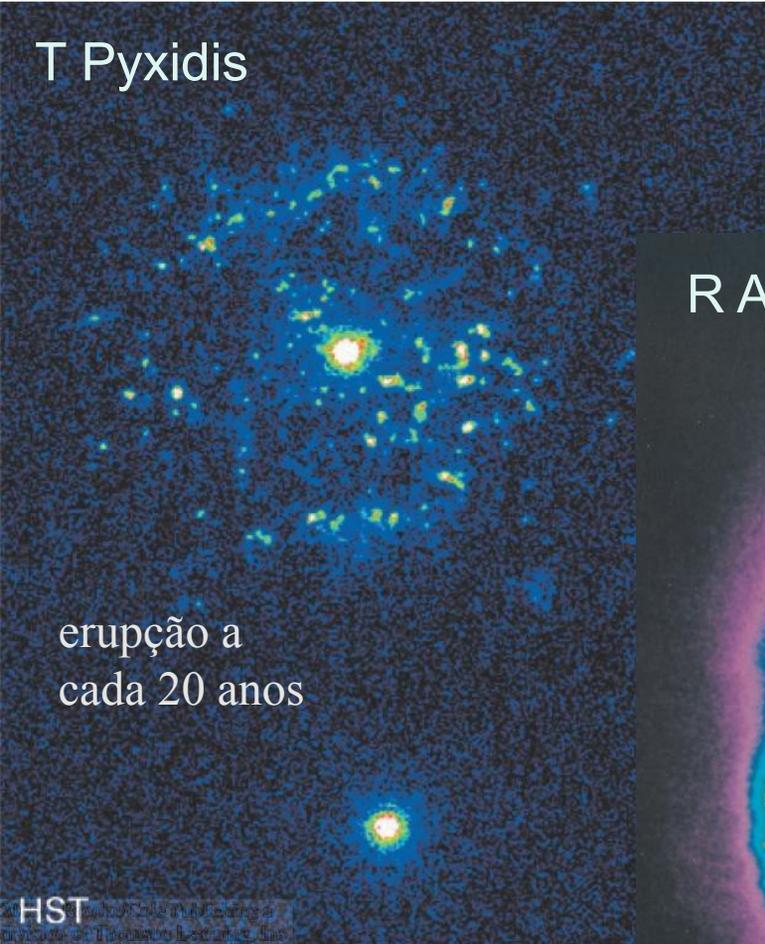
- Nova clássica.

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

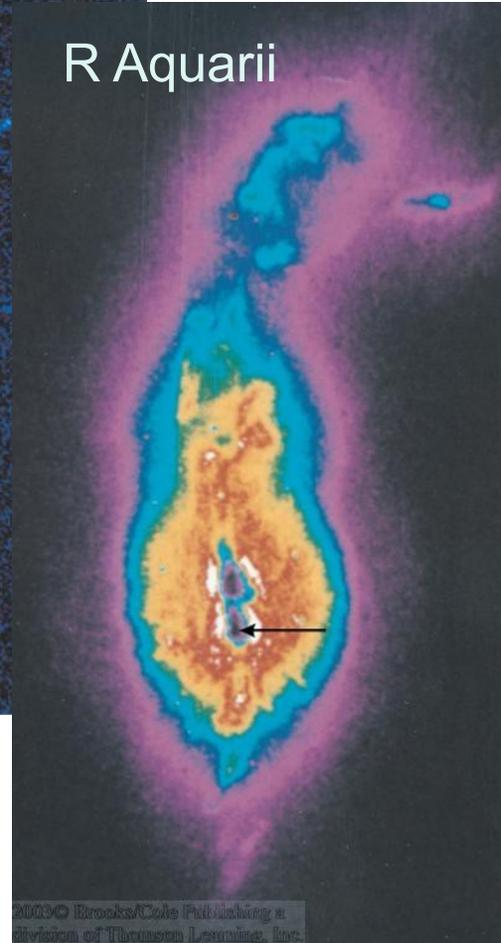


Nova Recorrentes

T Pyxidis



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 pelo 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 $1,4 M_{\odot}$, o 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



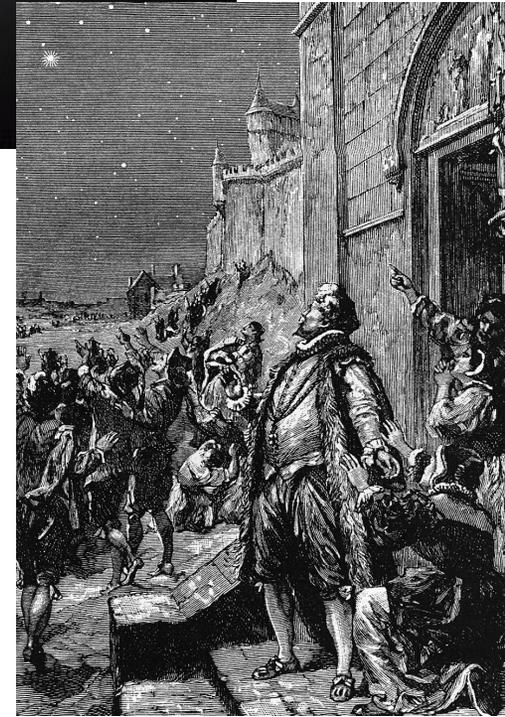
Anã Branca e detonação da Supernova Ia

Supernova Tipo Ia

- 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

Type II

No H in spectra

H in spectra

Ia

Ib

Ic

Si Absorption line
@ 615nm

No Si

No Si,
No He

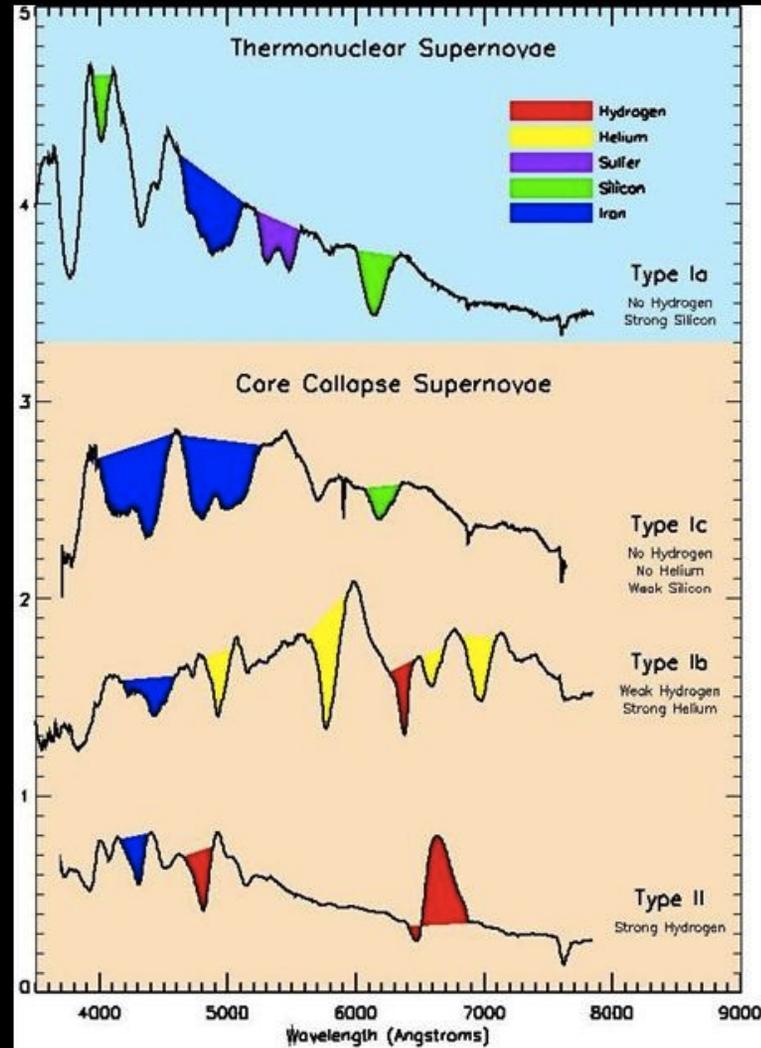
May be further
subdivided based
on light curves

Found everywhere in the
universe

Always same luminosity?

Found only in new star regions

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.

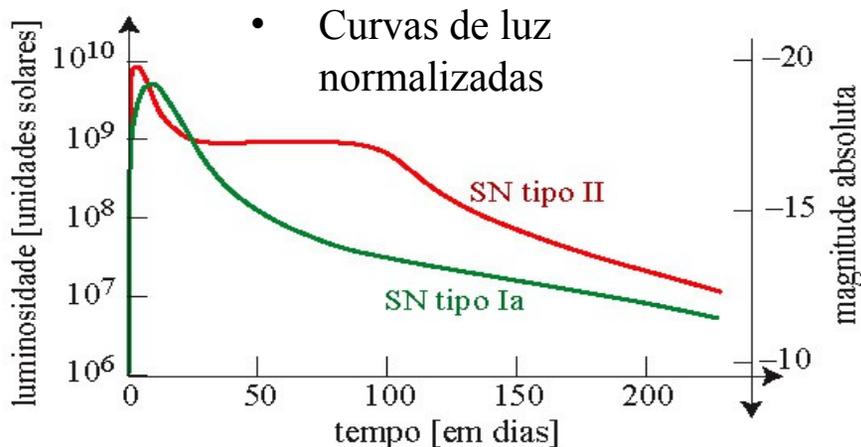
Ocorre em galáxias que ainda formam estrelas.

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



Taxa de Supernovas

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

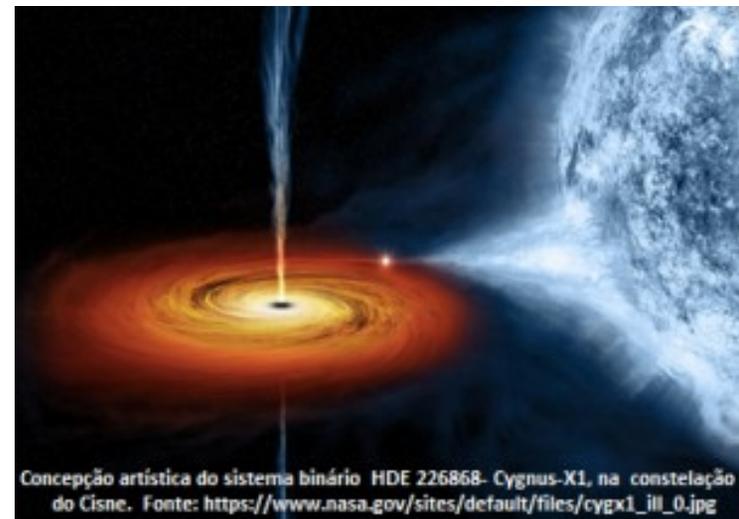
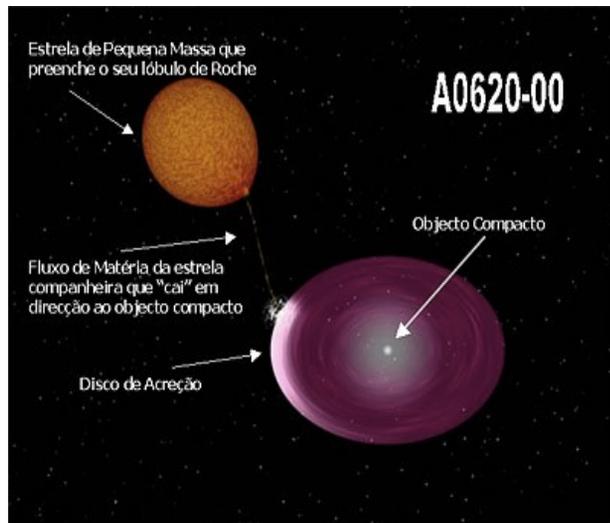
por século, para uma galáxia com luminosidade da Via Láctea

Objetos Compactos em Sistemas Binários

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

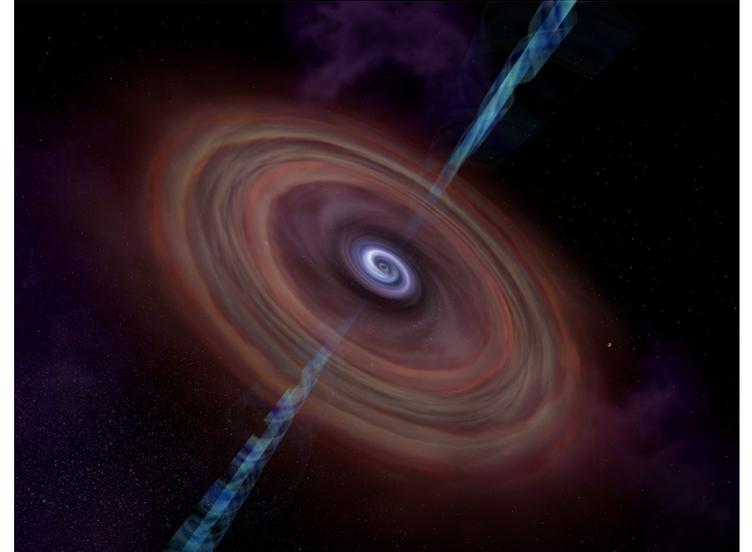
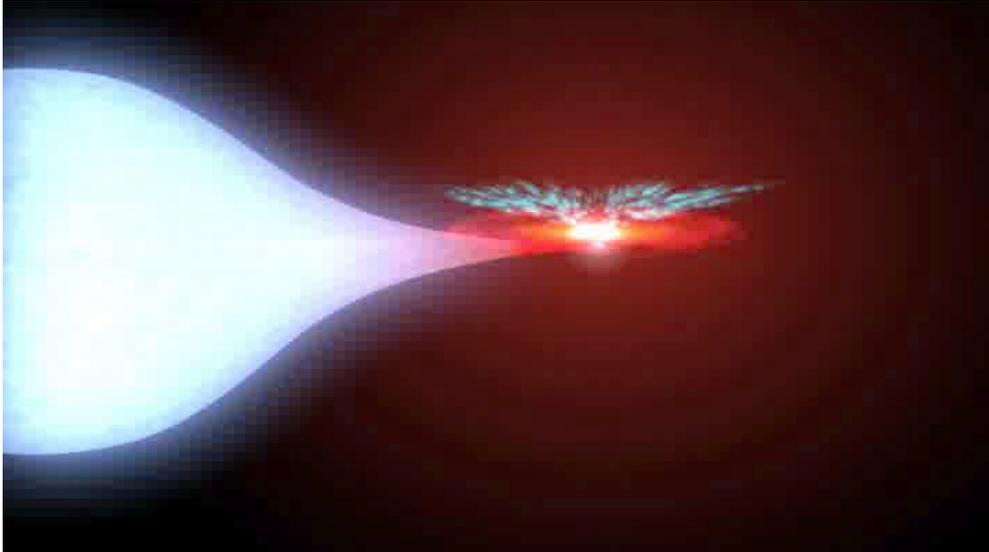
Buracos negros isolados são praticamente impossíveis de serem observados.

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

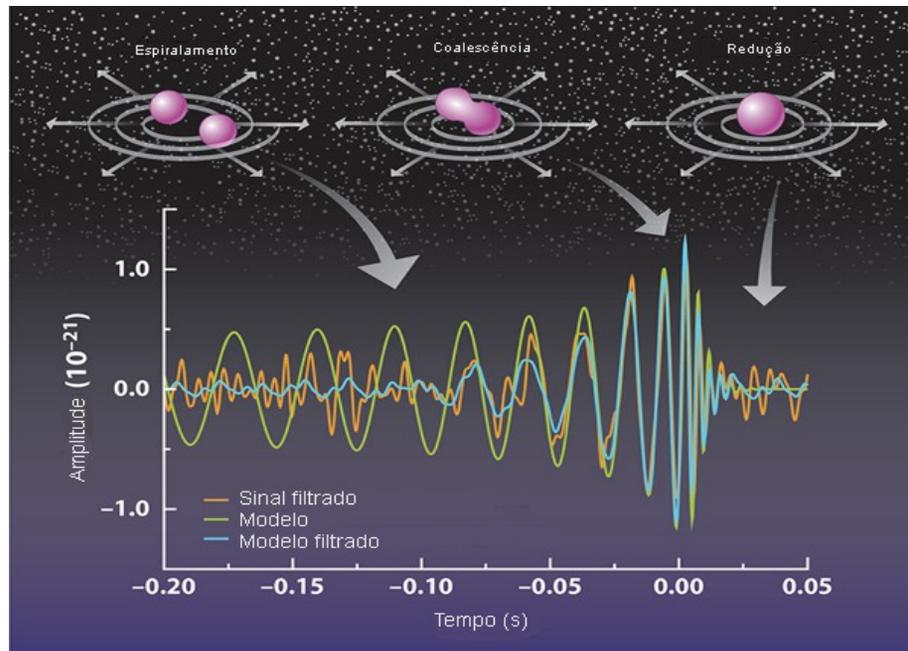


A interação com o campo magnético provoca a ejeção de partículas (jatos)

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)).

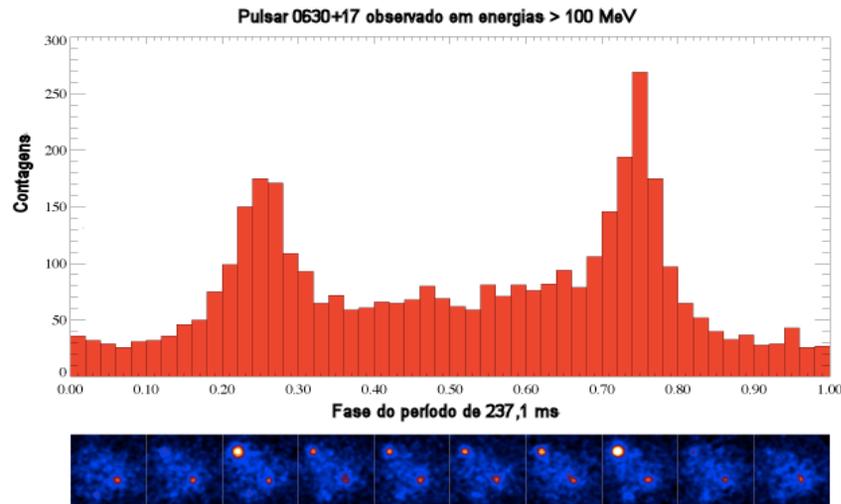


Ver experimento
no Roteiro-1 de
24/08

Binárias com estrelas de Neutrons

Descobertas em 1967 por Joselin Bell são estrelas de neutrons 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 de $M_n = 1,37 \pm 0,02$



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

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 até o Bismuto (elemento não radioativo mais pesado).
- A captura rápida de nêutrons (chamado **processo-r**) sintetiza elementos até o Urânio.

1A																	2
H 1.007																	He 4.002
2A											3B	4B	5B	6B	7B		
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	3A	4A	5A	6A	7A	8A	8A	8A	1B	2B	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		Large 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

No próximo Roteiro vamos ver o que ocorre com estrelas que são instáveis e o interesse científico que elas proporcionam nas estimativas de distância.

Além disto, veremos que o estudo de aglomerados de estrelas abre um caminho para estudar os **efeitos da evolução das estrelas em diferentes estágios de suas vidas.**