

Evolução de Binárias:

novas, novas recorrentes

Supernova tipo Ia

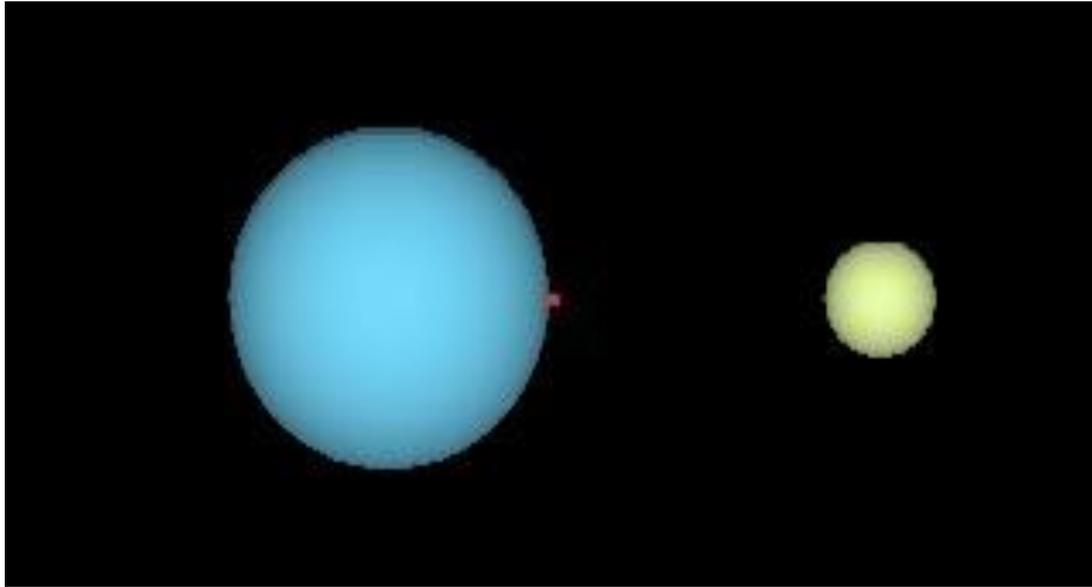
Fusão de estrelas de nêutrons

Nucleossíntese

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.

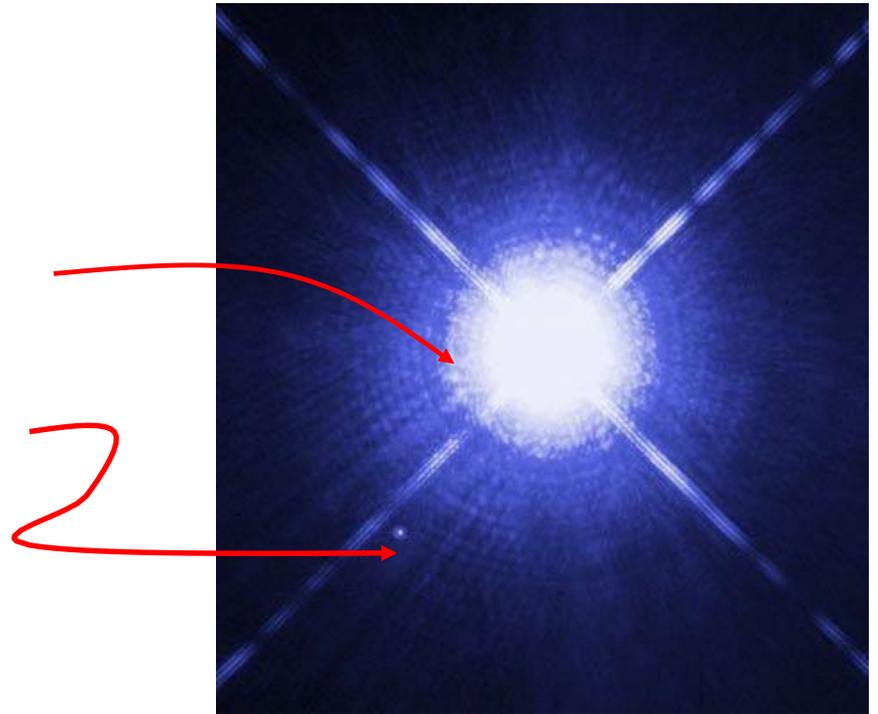
Evolução de Estrelas em Sistemas Binários

Em um par onde as estrelas têm massas diferentes:

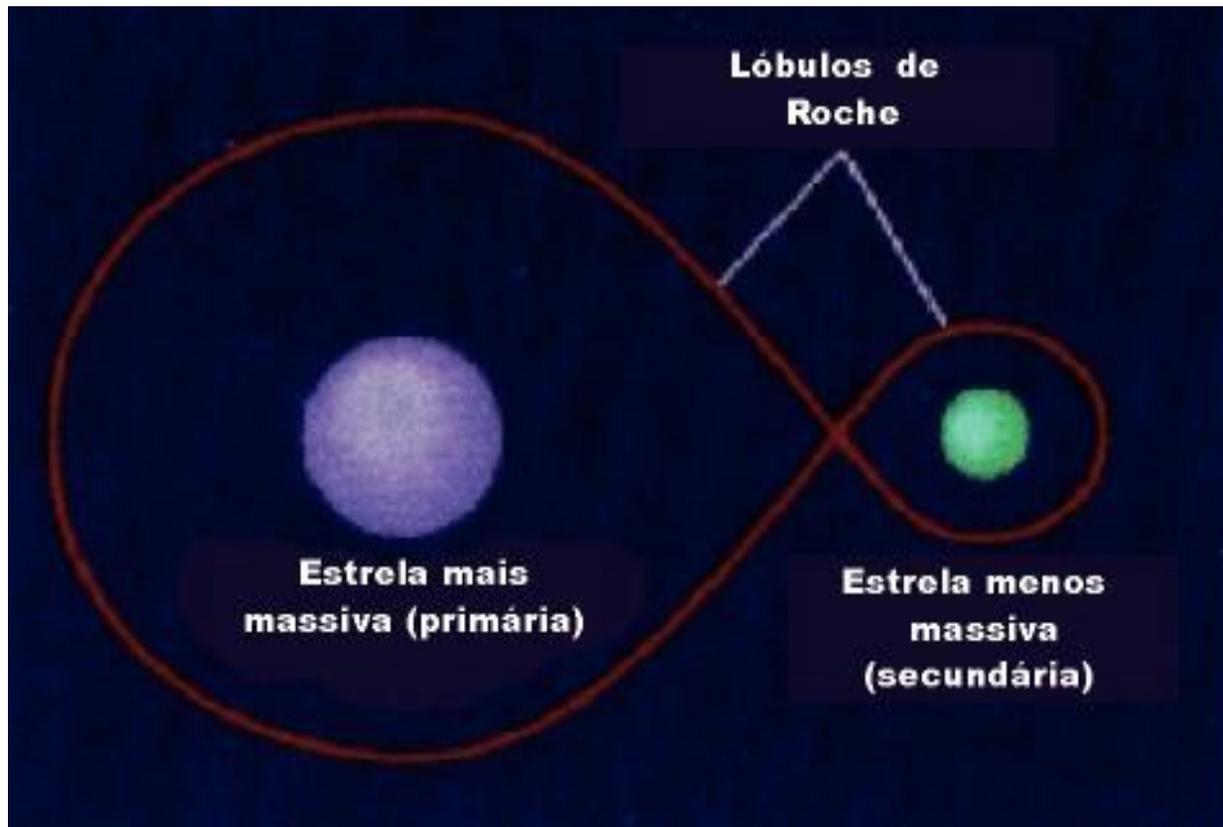
A estrela **mais massiva** do par evolui mais rápido e evoluirá para uma **Anã Branca**.
A outra estrela, **menos massiva**, ainda estará na **Sequência Principal**.

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.



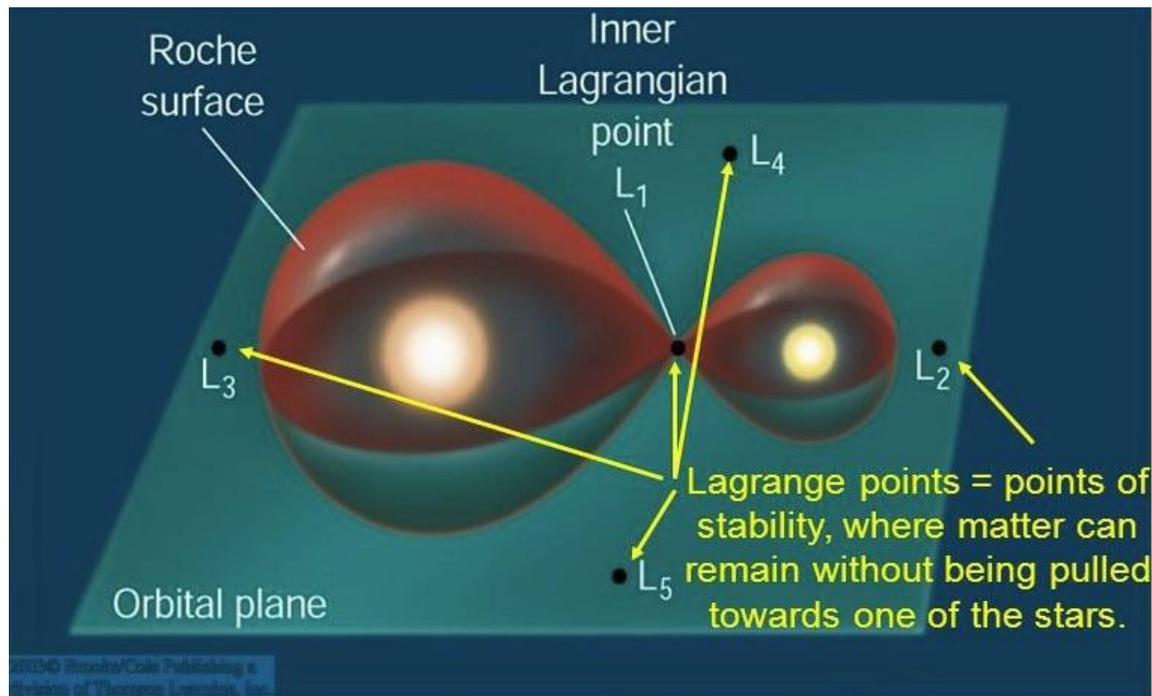
Nestes sistemas binários ocorrem fenômenos importantes relacionados ao **domínio de forças entre as estrelas**, que irão afetar a evolução destas estrelas que estão em fases de evolução diferentes...



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.

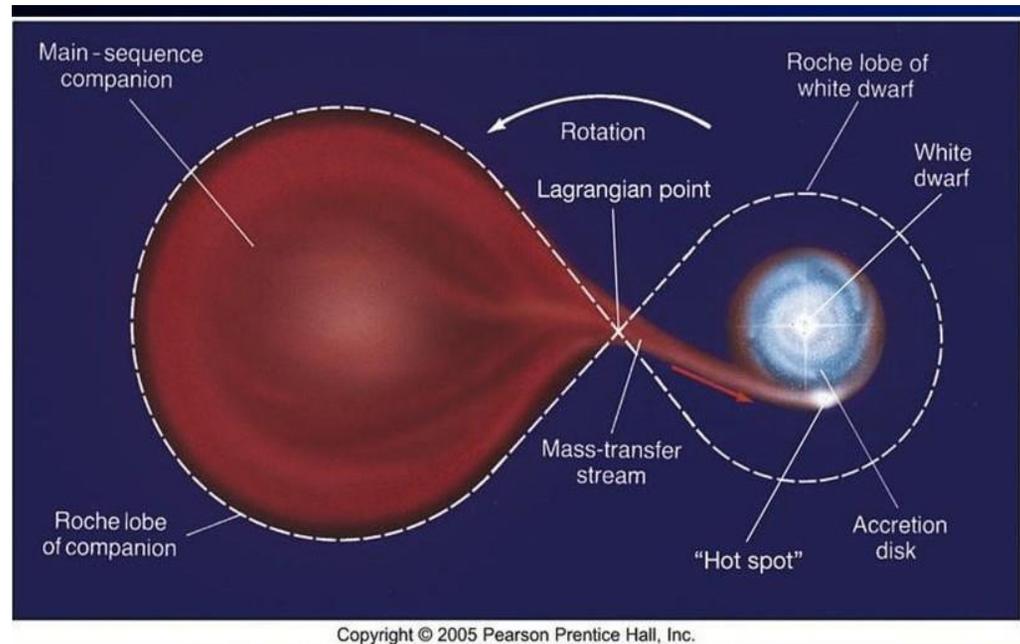
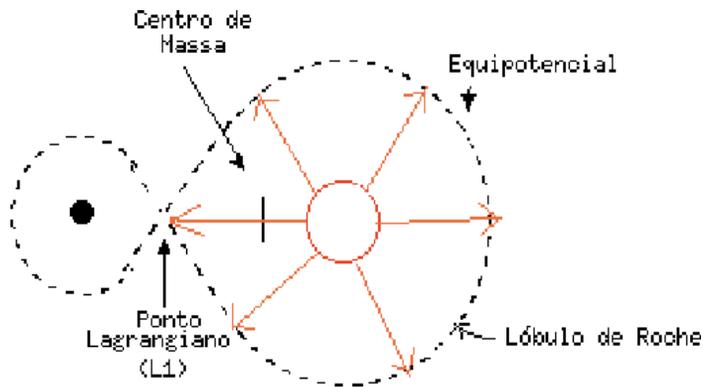
Nesta superfície existem pontos de equilíbrio, os pontos de Lagrange, onde a atração gravitacional de 2 estrelas equilibra exatamente a rotação do Sistema Binário.



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

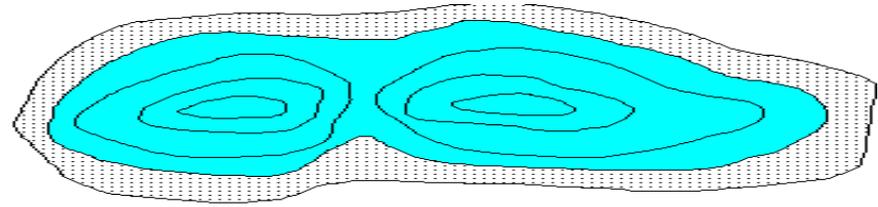
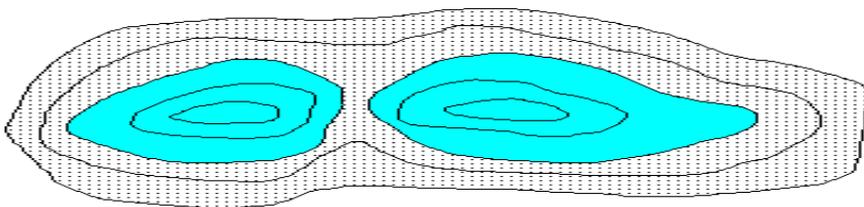


O Centro de Massa representa um ponto de equilíbrio da distribuição de massa.

Exemplo de Superfície Equipotencial

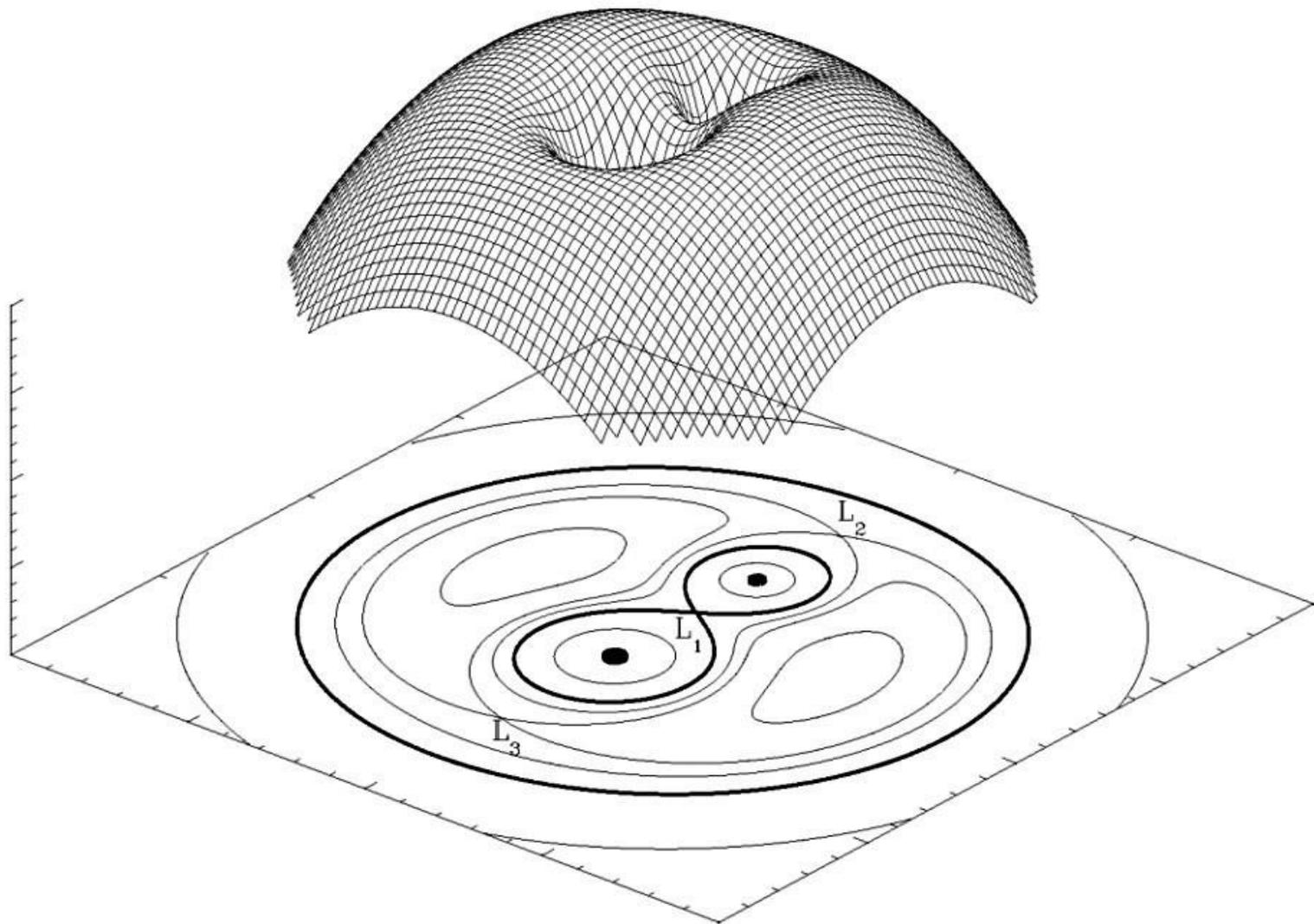
O **nível** de água de dois lagos separados por um morro é equivalente em ambos os lagos. A medida que este nível sobe, a cada instante, ele estará ocupando um determinado nível de água, ou seja, uma linha de **potencial constante, uma equipotencial**.

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



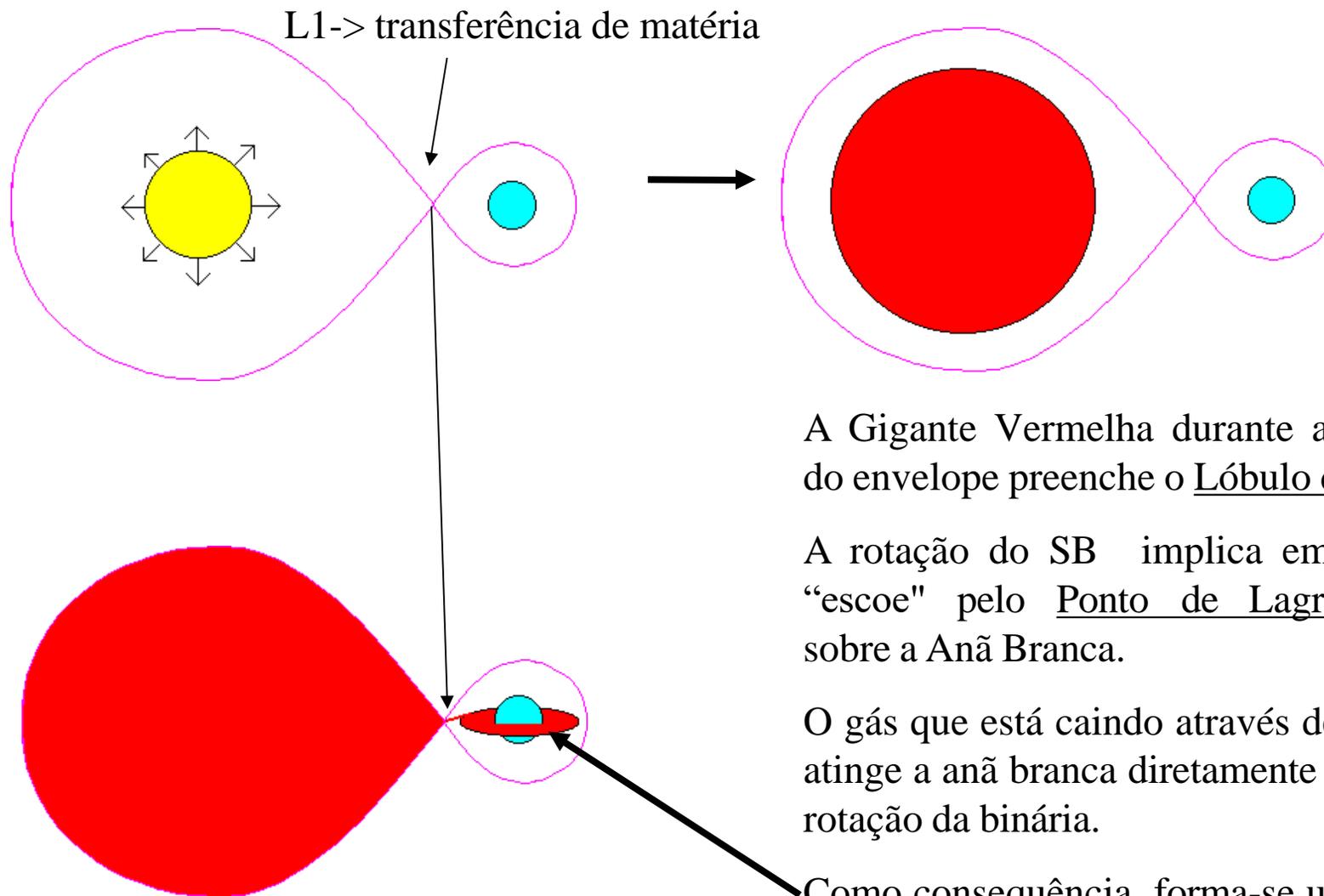
Linhas equipotenciais são semelhantes a linhas de contornos de mapas, onde cada contorno representa um nível. O nível de água no lago aumenta seguindo linhas de equipotencial. Pode acontecer do nível de água aumentar nos 2 lagos a ponto de se unirem e serem então representados por um único nível de água,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

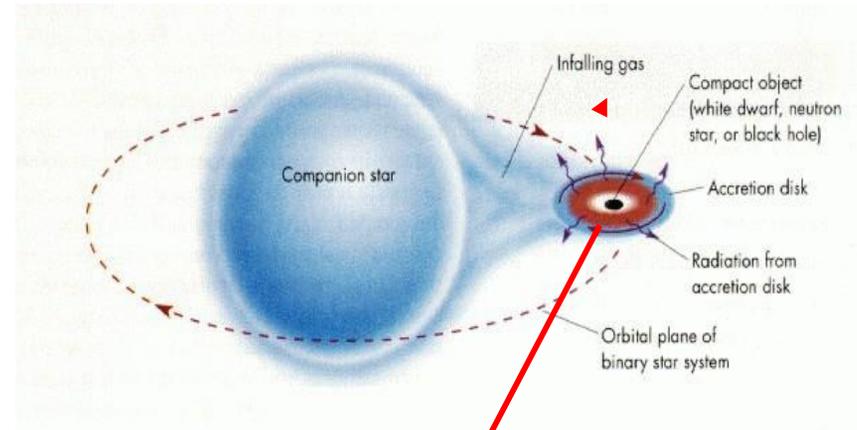
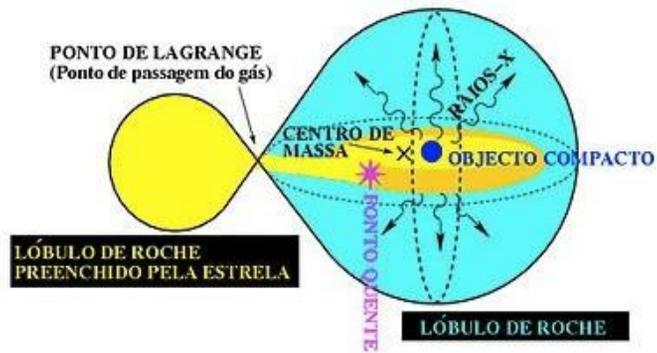


A Gigante Vermelha durante a expansão do envelope preenche o Lóbulo de Roche.

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.

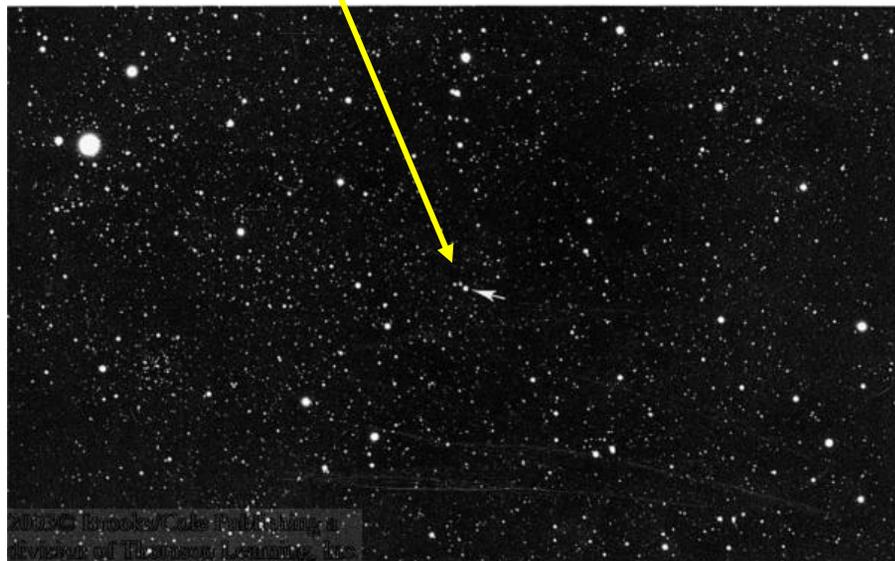
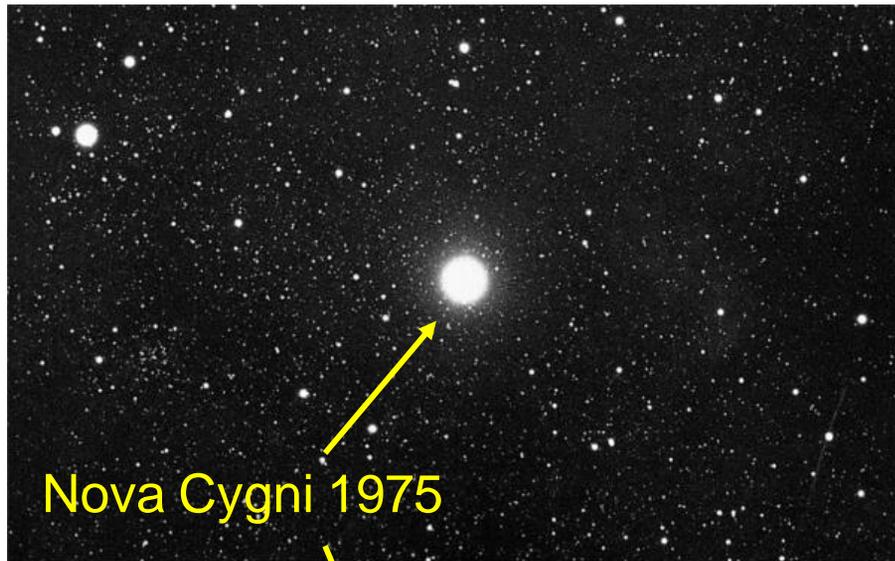
Como consequência, forma-se um disco de acreção em torno da anã branca



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

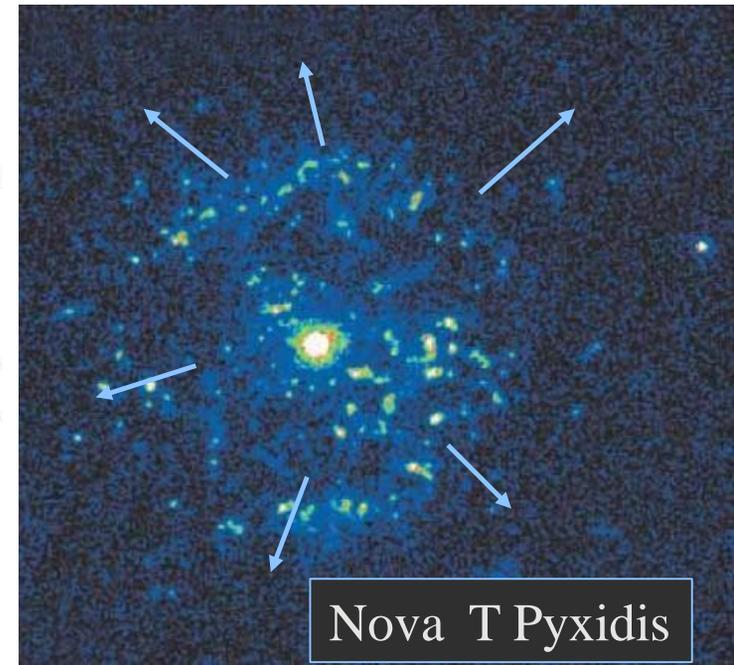
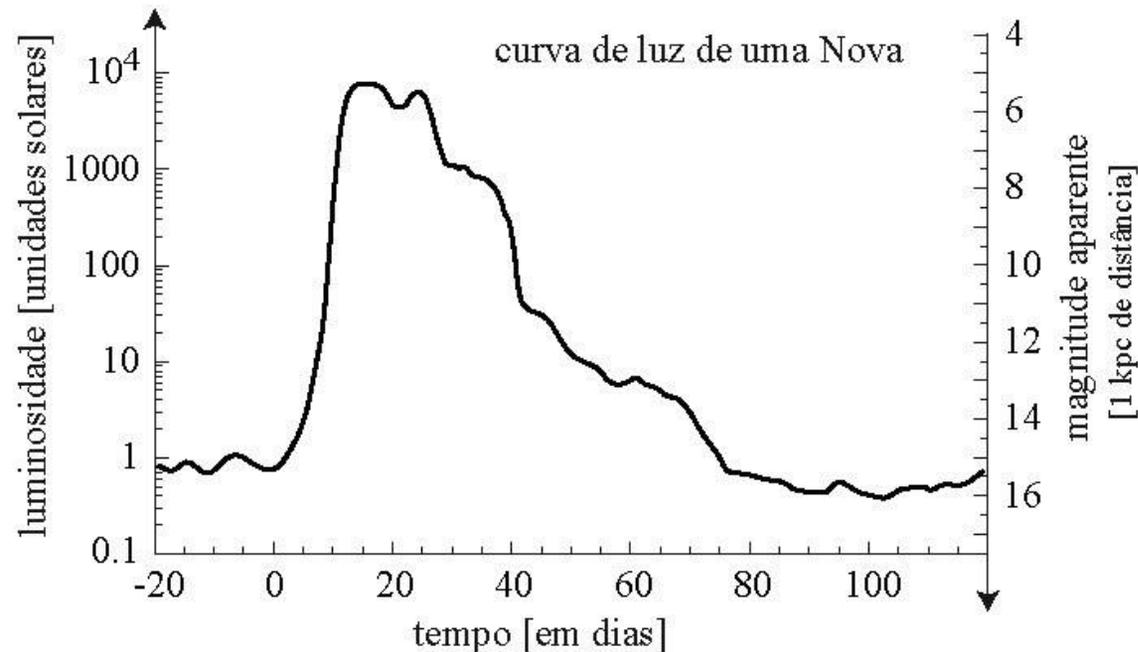
Se o aumento de luminosidade é de um **fator 10** (2,5 magnitudes):

- **Nova anã.**

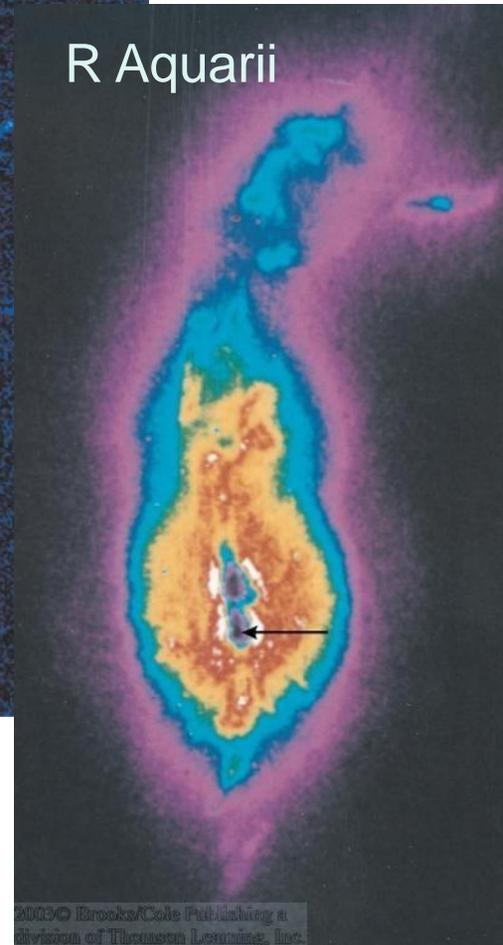
Quando o aumento é de um **fator 10.000** (10 magnitudes):

- **Nova clássica.**

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



Nova Recorrentes



- 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.

Binários de estrelas de baixa massa ($M < 8 M_{\odot}$)

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.
- **A maior parte da estrela é transformada em Ferro e Níquel**
- A estrela inteira explode.
- A explosão NÃO deixa resto

SUPERNOVA tipo Ia

Supernova Tipo Ia – só em sistema binário



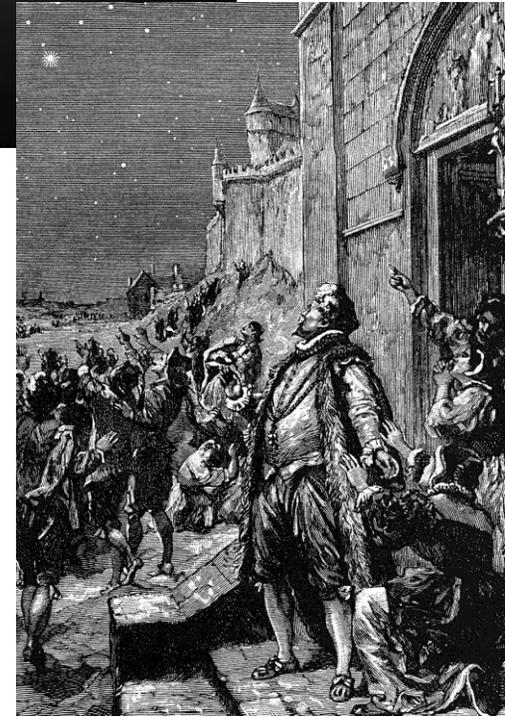
Anã Branca e detonação da Supernova Ia

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

Type II

No H in spectra

H in spectra

Ia

Ib

Ic

Si Absorption line
@ 615nm

No Si

No Si,
No He

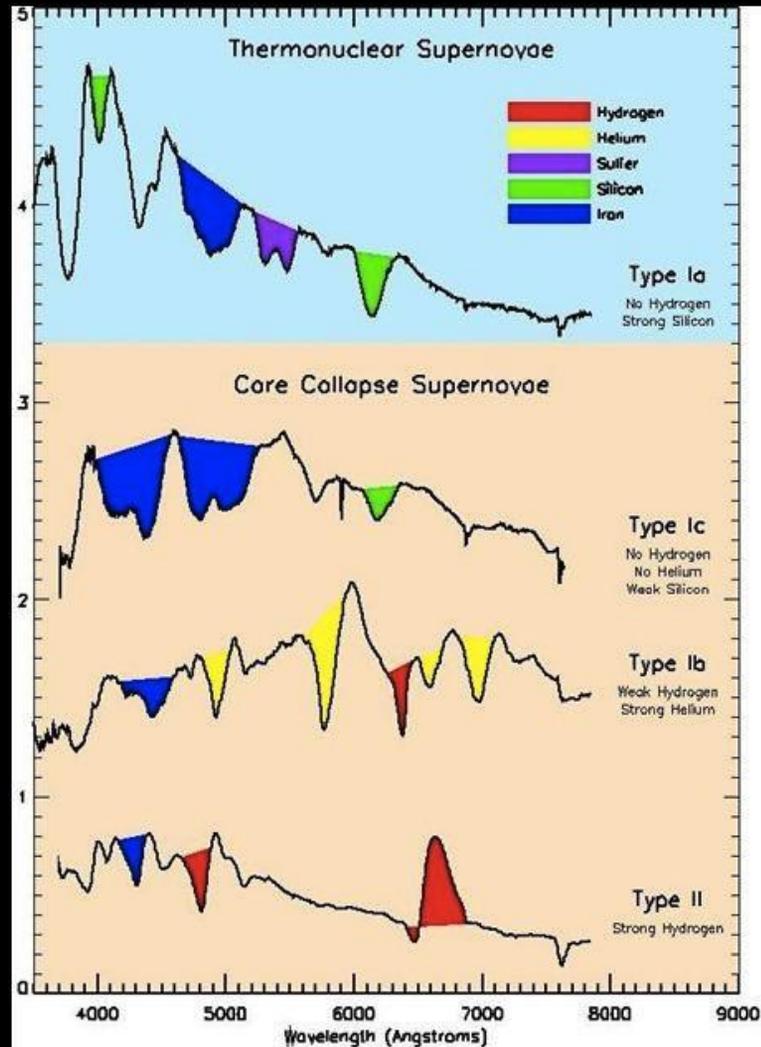
May be further
subdivided based
on light curves

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

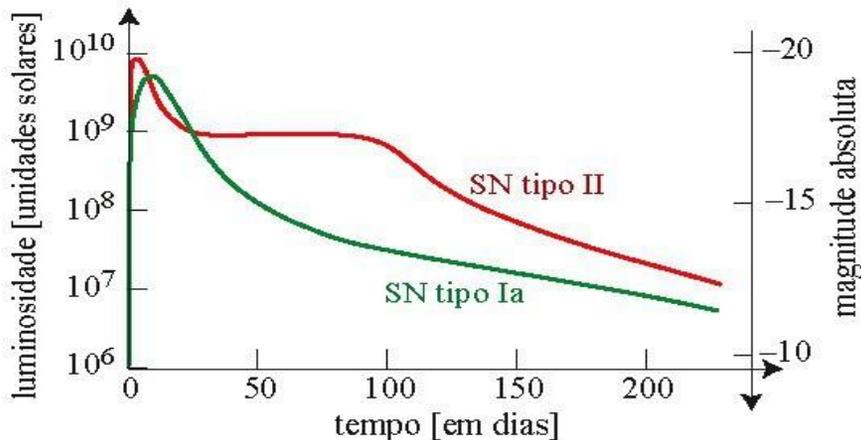
Luminosidade máxima é praticamente a mesma

Luminosidade máxima varia de uma SN p/ outra

Não há linhas de hidrogênio no espectro.

Tem linhas de hidrogênio no espectro

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**.

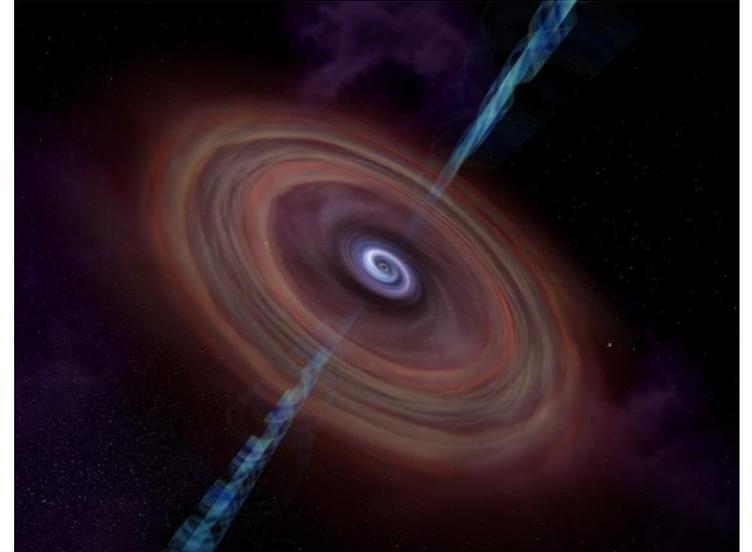
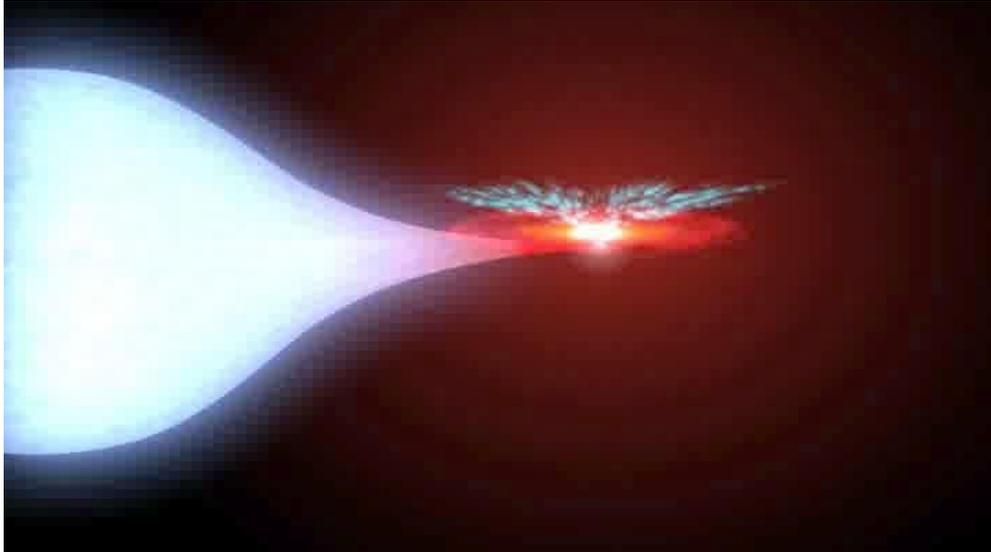
Buracos negros isolados são muito difíceis de serem observados.

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



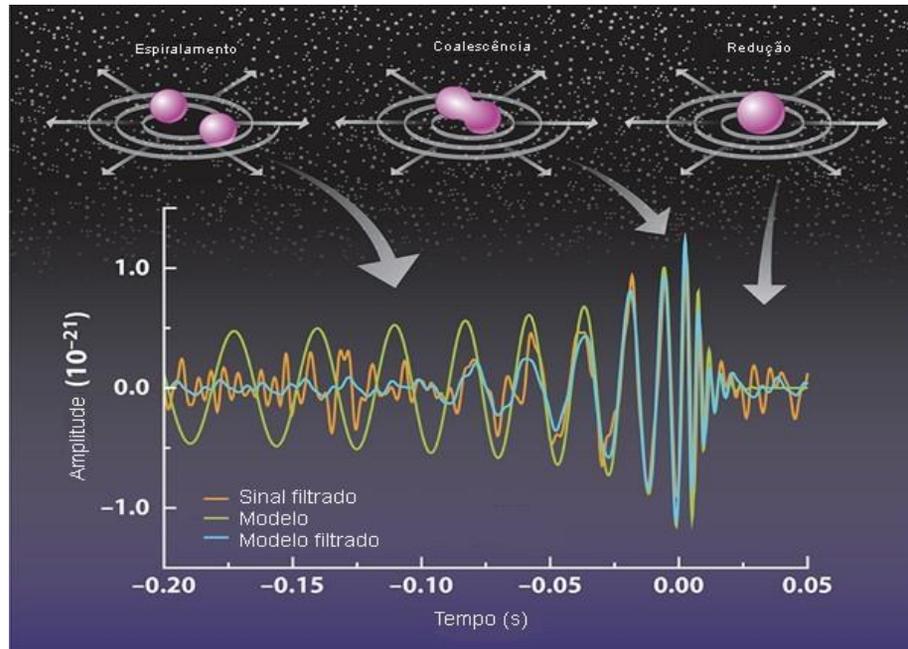
A interação com o campo magnético provoca a ejeção de partículas (jatos)

Detectando Buracos Negros

Binárias com Buracos Negros

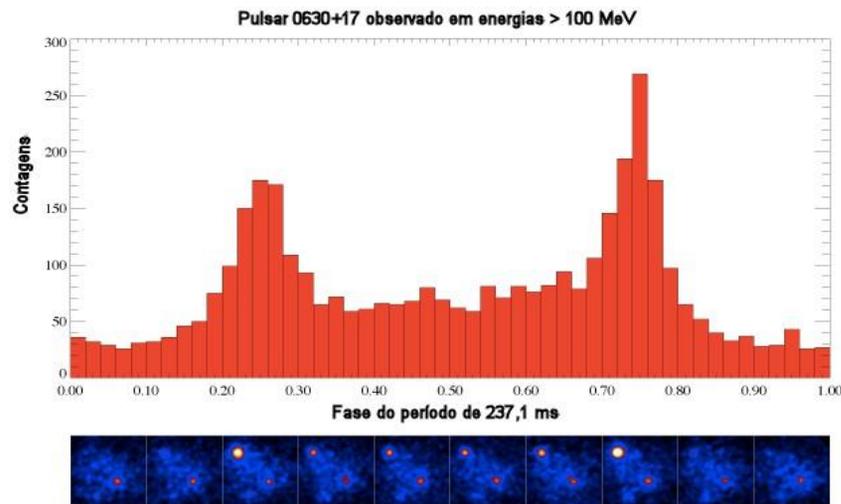
O Observatório Interferométrico de Ondas Gravitacionais (LIGO) - EUA, tem detectado eventos que geraram ondas gravitacionais - ondulações no espaço-tempo - previstas por Einstein em 1916, causados pela coalescência de **dois buracos negros estelares**.

O primeiro, em setembro de 2015, com massa (35 ± 4) e outro com (30 ± 4) M_{\odot} 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)).



Binárias com Estrelas de Neutrons

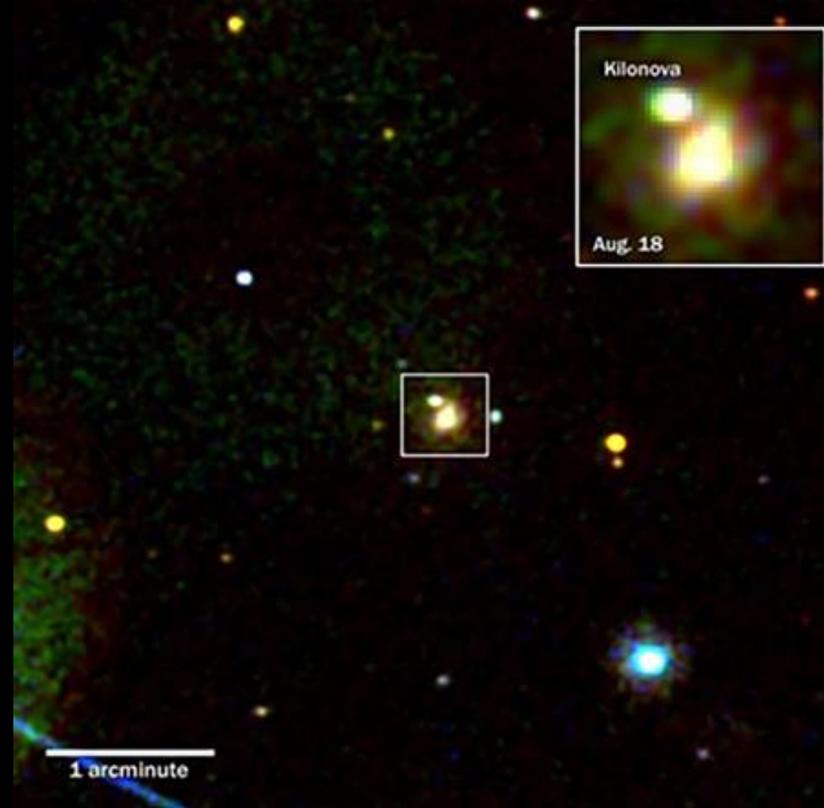
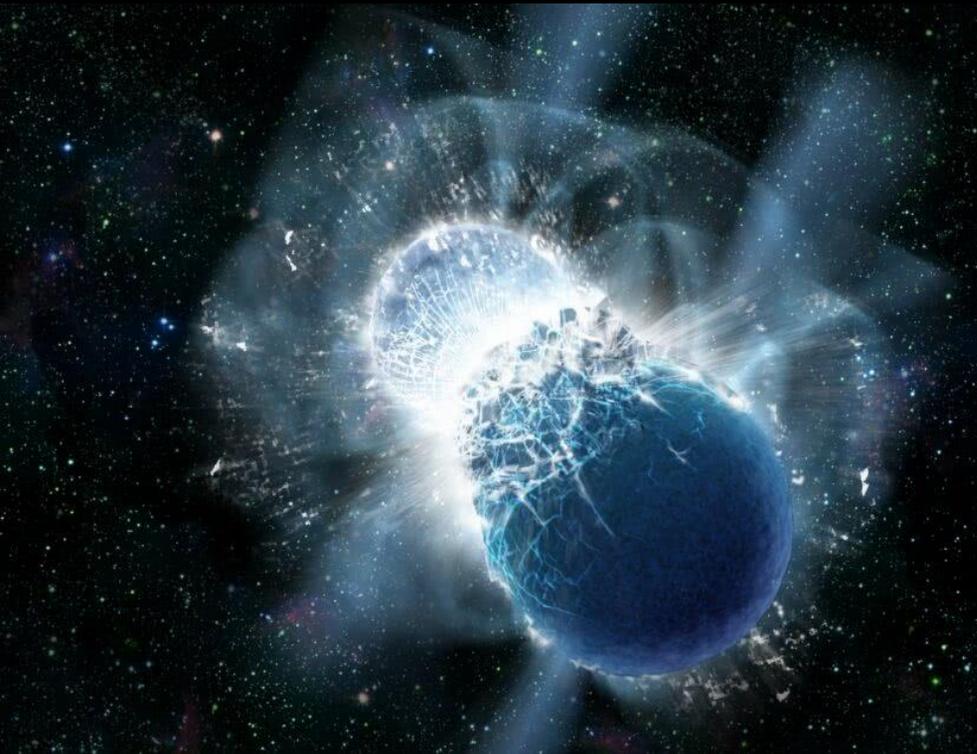
Descobertas em 1967 por Joselin Bell são estrelas de neutrons que possuem forte campo magnético, rápida rotação e emitem pulsos em rádio. Entretanto, em sistemas binários a acreção de matéria sobre o disco de acreção faz com que a emissão seja detectada em raios-x e até mesmo em raios gama.



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

Binários de estrelas de alta massa ($M > 8 M_{\odot}$)

Fusão de Estrelas de Nêutrons

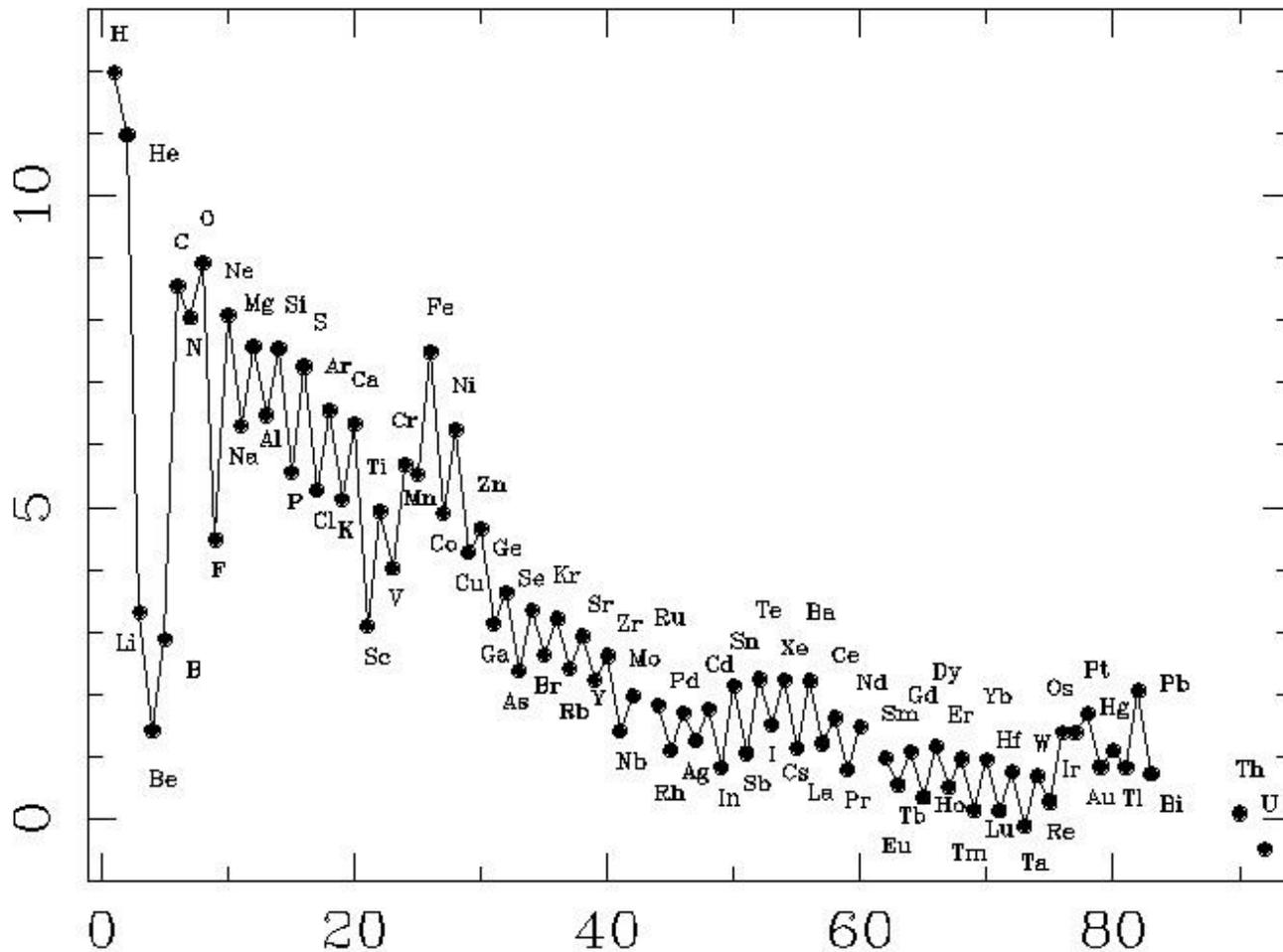


- altos fluxos de nêutrons
⇒ processo-r
- Produção de lantanídeos (ex. Eu); Os-Ir-Pt-Au; actinídeos (Th, U)

Kilova detectada em 2017 pelo Swift após o evento de ondas gravitacionais GW170817 .
Produziu-se $1-5 M_{\oplus}$ de Eu e $3-13 M_{\oplus}$ de Au, e $> 100 M_{\oplus}$ de Pt.

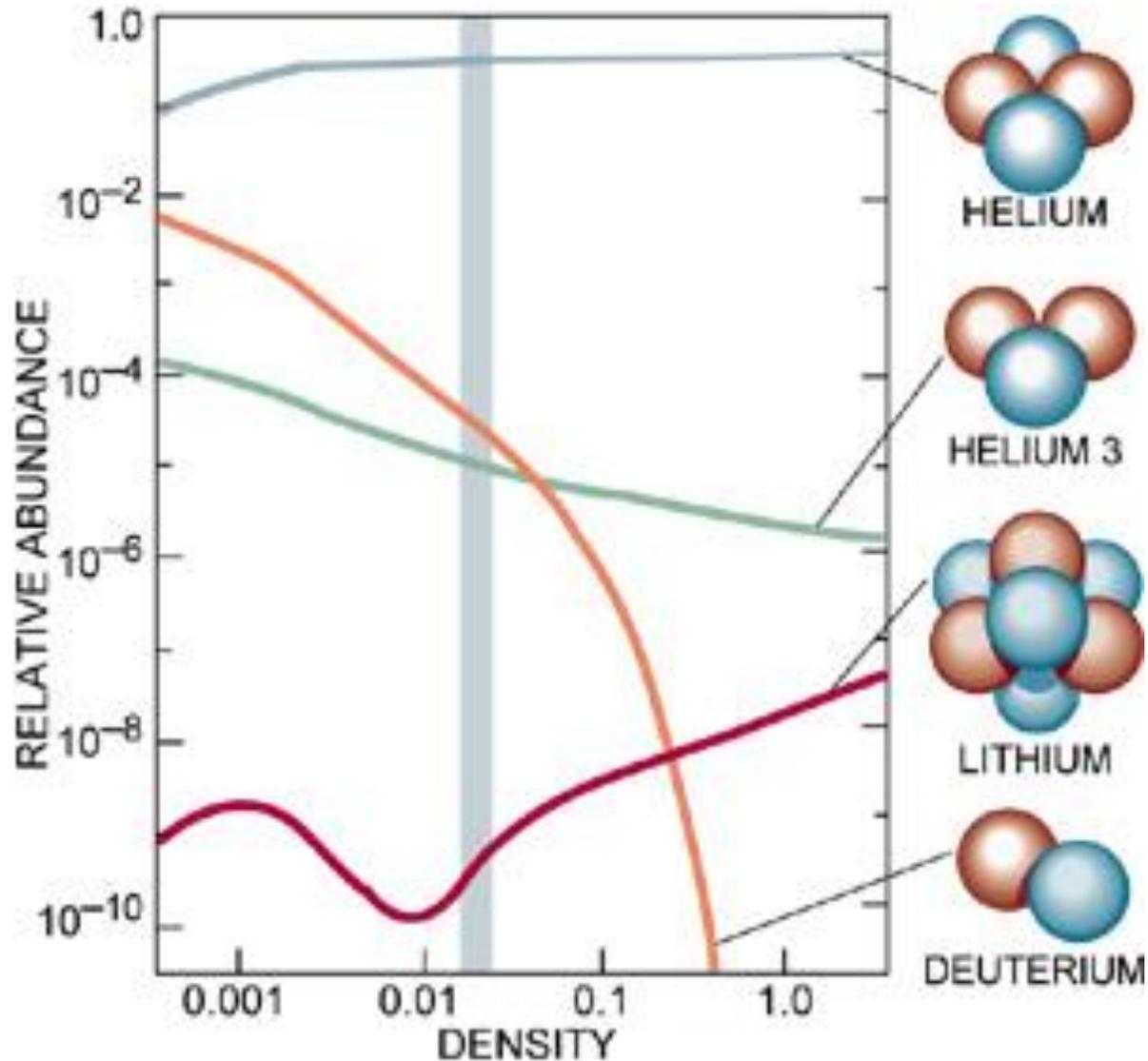
Sintetizando





Abundâncias dos elementos químicos no Sistema Solar. Na abcissa está o número atômico e na ordenada, a abundância do número de átomos em relação ao hidrogênio, medida numa escala logarítmica $\log(N/N_H)+12$ (assim o H vale 12). Observe as lacunas devidas aos elementos radioativos artificiais tecnécio (Z=43) e promécio (Z=61)

NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL (Big Bang Nucleosynthesis)



$\alpha\beta\gamma$ paper

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHEE*

Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland

AND

H. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.

February 18, 1948

Letters to the Editor

PUBLICATION of brief reports of important discoveries in physics may be secured by addressing them to this department. The closing date for this department is five weeks prior to the date of issue. No proof will be sent to the authors. The Board of Editors does not hold itself responsible for the opinions expressed by the correspondents. Communications should not exceed 600 words in length.

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHEE*

Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland

AND

H. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.

February 18, 1948

AS pointed out by one of us,¹ various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must imagine the early stage of matter as a highly compressed neutron gas (overheated neutral nuclear fluid) which started decaying into protons and electrons when the gas pressure fell down as the result of universal expansion. The radiative capture of the still remaining neutrons by the newly formed protons must have led first to the formation of deuterium nuclei, and the subsequent neutron captures resulted in the building up of heavier and heavier nuclei. It must be remembered that, due to the comparatively short time allowed for this process,¹ the building up of heavier nuclei must have proceeded just above the upper fringe of the stable elements (short-lived Fermi elements), and the present frequency distribution of various atomic species was attained only somewhat later as the result of adjustment of their electric charges by β -decay.

Thus the observed slope of the abundance curve must not be related to the temperature of the original neutron gas, but rather to the time period permitted by the expansion process. Also, the individual abundances of various nuclear species must depend not so much on their intrinsic stabilities (mass defects) as on the values of their neutron capture cross sections. The equations governing such a building-up process apparently can be written in the form:

$$\frac{dn_i}{dt} = f(t)(\sigma_{i-1}n_{i-1} - \sigma_i n_i) \quad i = 1, 2, \dots, 238, \quad (1)$$

where n_i and σ_i are the relative numbers and capture cross sections for the nuclei of atomic weight i , and where $f(t)$ is a factor characterizing the decrease of the density with time.

We may remark at first that the building-up process was apparently completed when the temperature of the neutron gas was still rather high, since otherwise the observed abundances would have been strongly affected by the resonances in the region of the slow neutrons. According to Hughes,² the neutron capture cross sections of various elements (for neutron energies of about 1 Mev) increase exponentially with atomic number halfway up the periodic system, remaining approximately constant for heavier elements.

Using these cross sections, one finds by integrating Eqs. (1) as shown in Fig. 1 that the relative abundances of various nuclear species decrease rapidly for the lighter elements and remain approximately constant for the elements heavier than silver. In order to fit the calculated curve with the observed abundances³ it is necessary to assume the integral of $\rho_0 dt$ during the building-up period is equal to 5×10^4 g sec./cm³.

On the other hand, according to the relativistic theory of the expanding universe⁴ the density dependence on time is given by $\rho \approx 10^6/P$. Since the integral of this expression diverges at $t = 0$, it is necessary to assume that the building-up process began at a certain time t_0 , satisfying the relation:

$$\int_{t_0}^{\infty} (10^6/P) dt \approx 5 \times 10^4, \quad (2)$$

which gives us $t_0 \approx 20$ sec. and $\rho_0 \approx 2.5 \times 10^4$ g sec./cm³. This result may have two meanings: (a) for the higher densities existing prior to that time the temperature of the neutron gas was so high that no aggregation was taking place, (b) the density of the universe never exceeded the value 2.5×10^4 g sec./cm³ which can possibly be understood if we

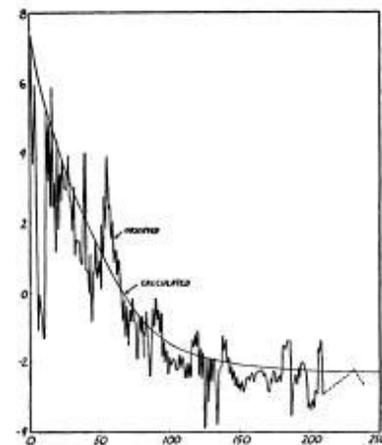
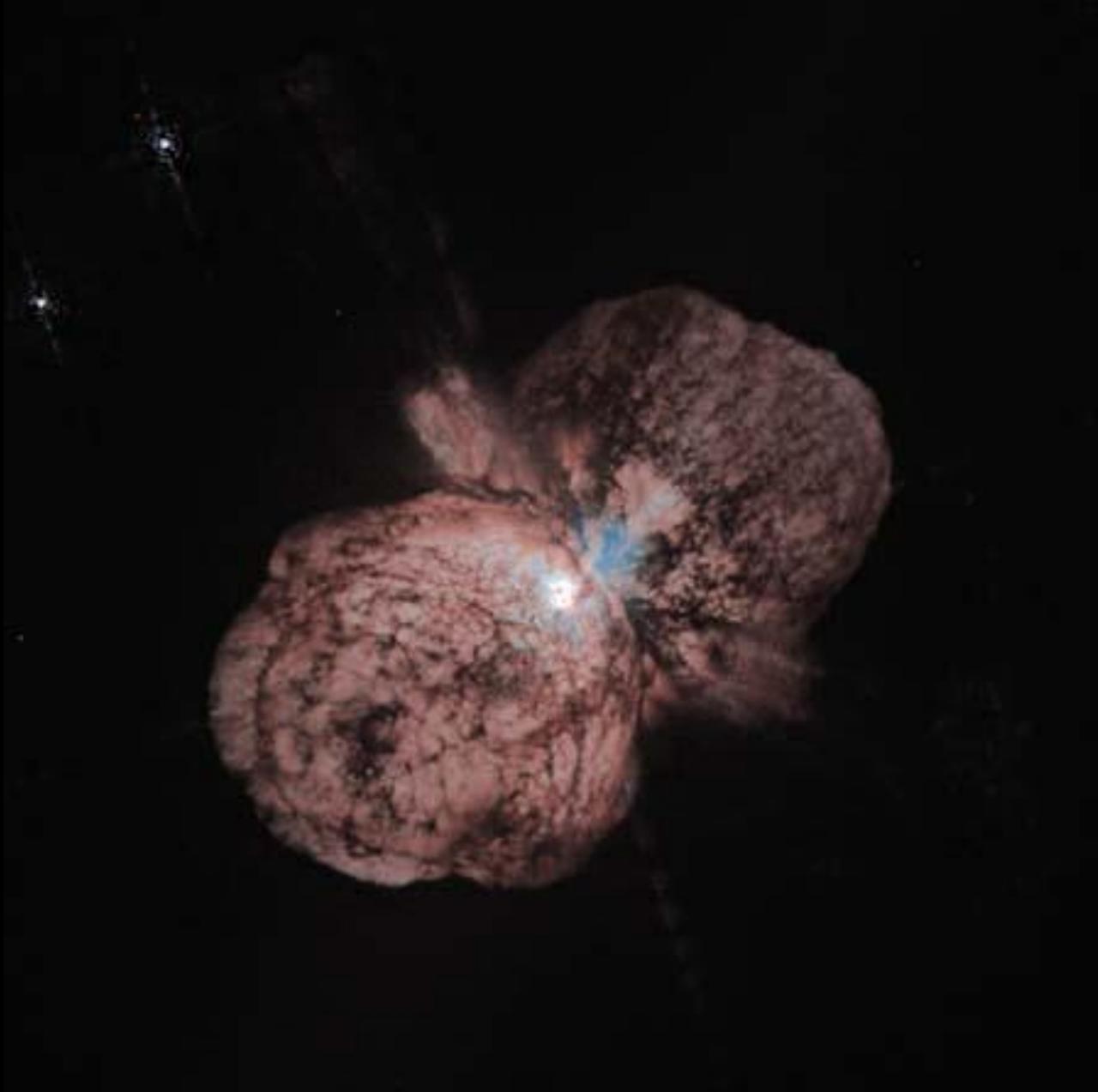


FIG. 1.
Log of relative abundance
Atomic weight

Além da Nucleossíntese Primordial

- Nucleossíntese primordial é insuficiente
- Produz apenas Hélio, Deutério e Lítio
- Não ultrapassa o número de massa 8
(${}^8\text{Be}$ é uma ressonância com $\tau_{1/2} = 6.7 \times 10^{-17} \text{ s}$)
- Do Carbono em diante, é necessária a nucleossíntese estelar!
- O nascimento das estrelas é essencial para o surgimento do C e da química necessária à vida!!!

NUCLEOSSÍNTESE ESTELAR



B²FH paper

REVIEWS OF MODERN PHYSICS

VOLUME 29, NUMBER 4

OCTOBER, 1957

Synthesis of the Elements in Stars*

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE

*Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, and
Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington,
California Institute of Technology, Pasadena, California*

“It is the stars, The stars above us, govern our conditions”;
(*King Lear*, Act IV, Scene 3)

but perhaps

“The fault, dear Brutus, is not in our stars, But in ourselves,”
(*Julius Caesar*, Act I, Scene 2)

Nucleossíntese Estelar x Nucleossíntese Primordial

Embate de duas Cosmologias

Estado Estacionário x Big Bang



Fred Hoyle (1915-2001)



George Gamow (1904-1968)

X

Nucleossíntese estelar

- O Sol como ilustração

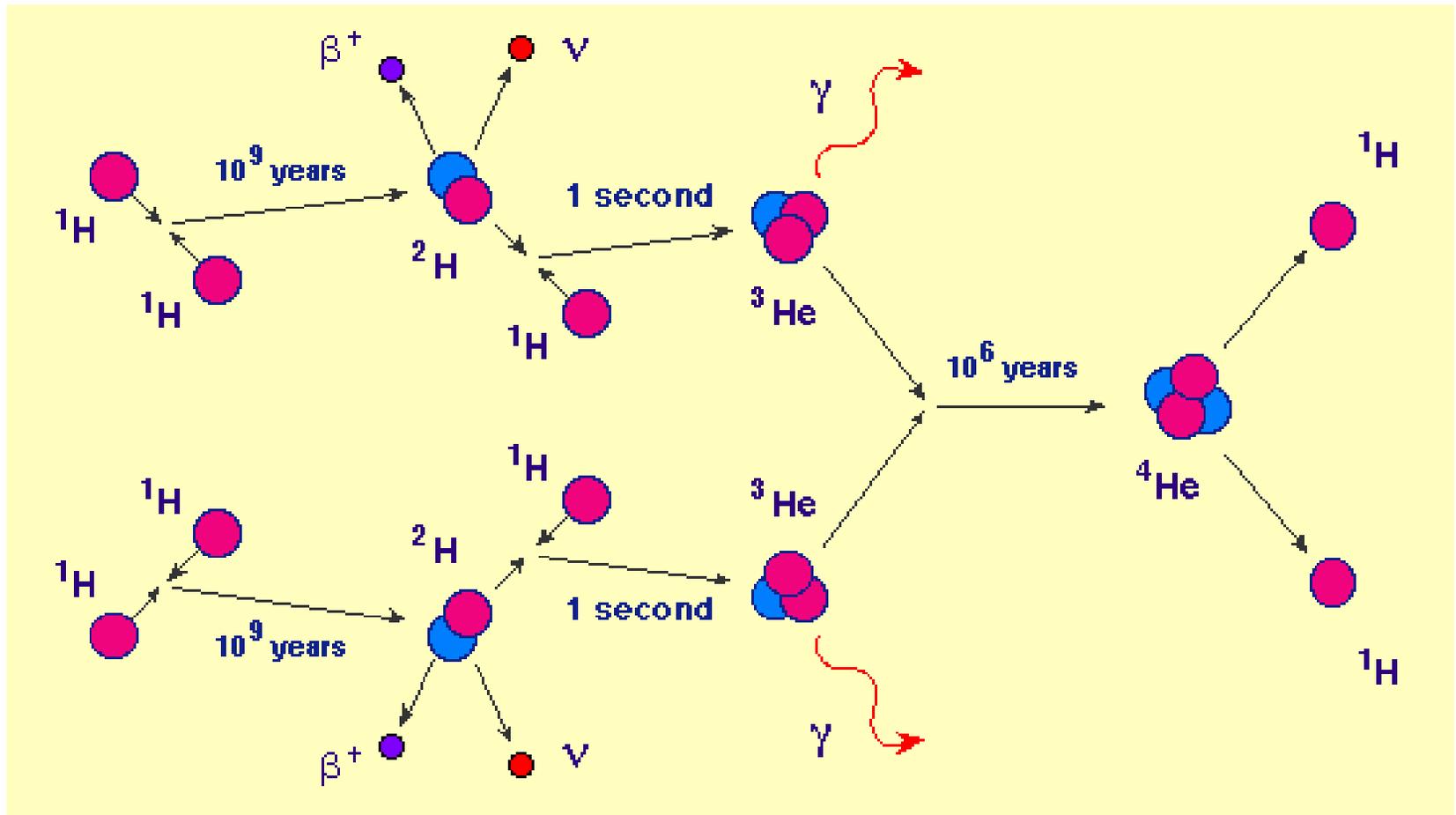


O Sol como laboratório de interações fundamentais



- Cadeia próton-próton (na etapa atual da evolução solar)
 - 4 átomos de hidrogênio se fundem para formar um núcleo de hélio
- A fusão nuclear ocorre somente às temperaturas muito altas do centro do Sol
- Continuará a aquecer o Sol por mais 5,5 bilhões de anos
- Enquanto produz energia, a fusão nuclear também faz nucleossíntese (He)

Cadeia Próton-Próton



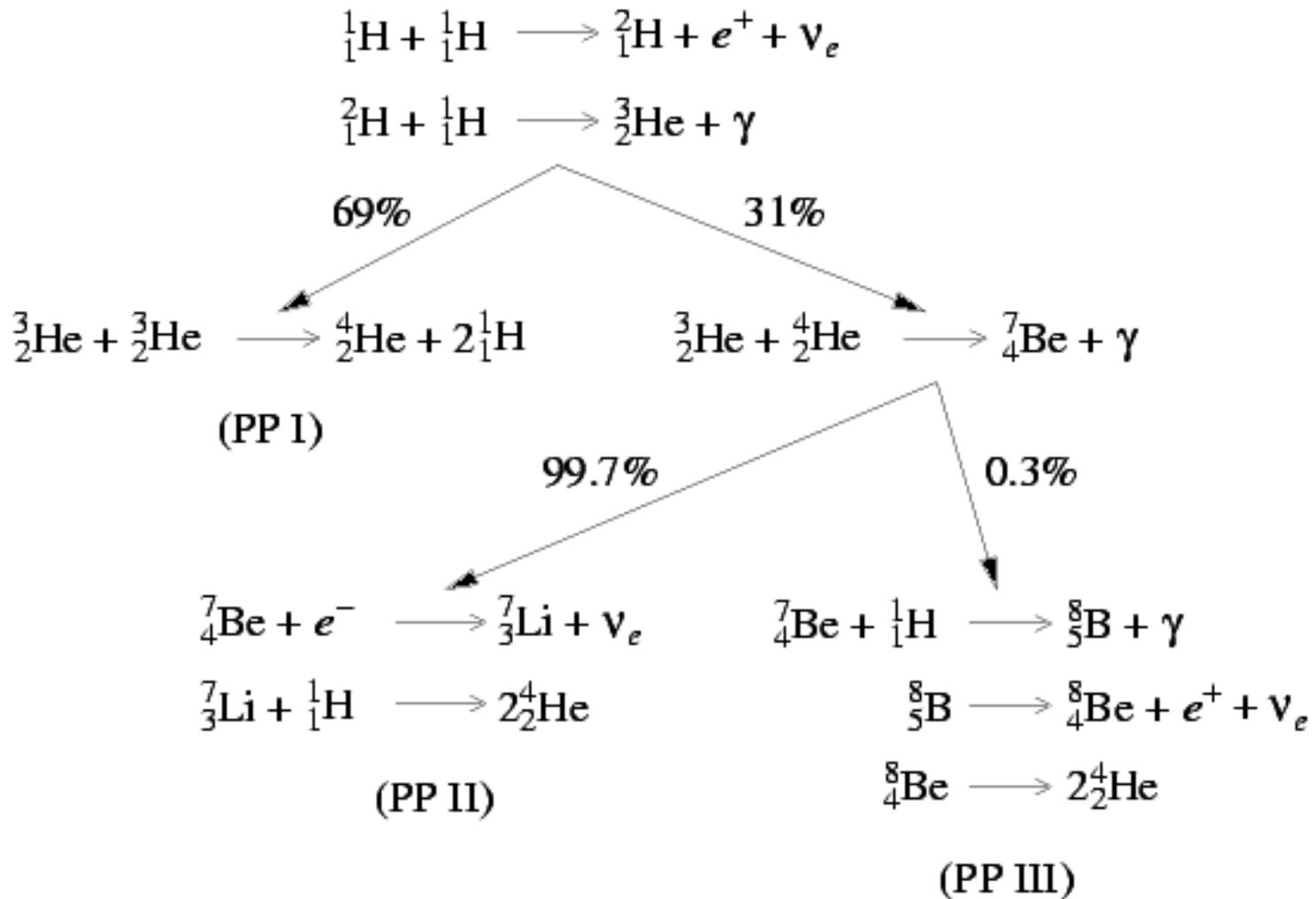
The Proton-Proton Chain

Weak Nuclear Interaction $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ $t_{\text{Mean}} \sim 5\,000\,000\,000$ years

Electromagnetic $p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ $t_{\text{Mean}} \sim 1\text{sec}$

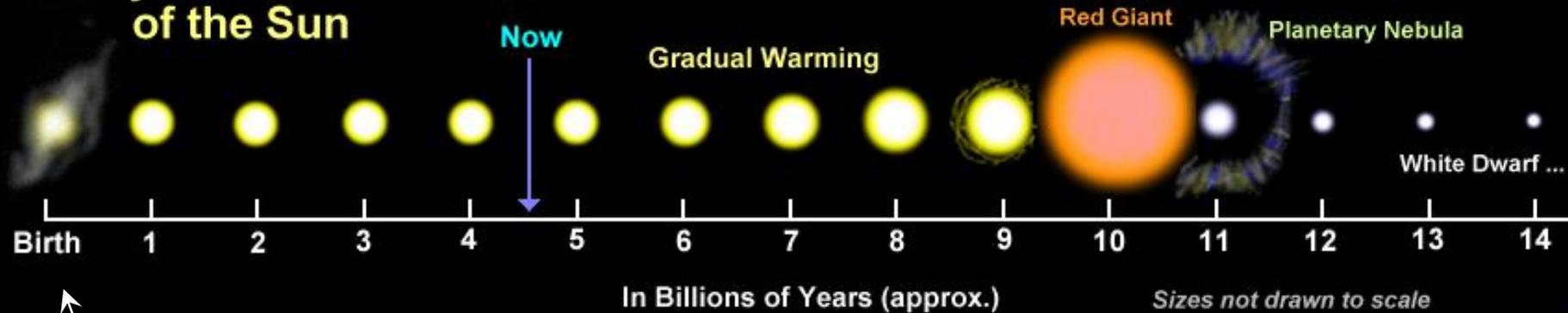
Strong Nuclear Interaction ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + p$ $t_{\text{Mean}} \sim 3\,000\,000$ years

Cadeia p-p (em detalhe)



Evolução do Sol

Life Cycle of the Sun



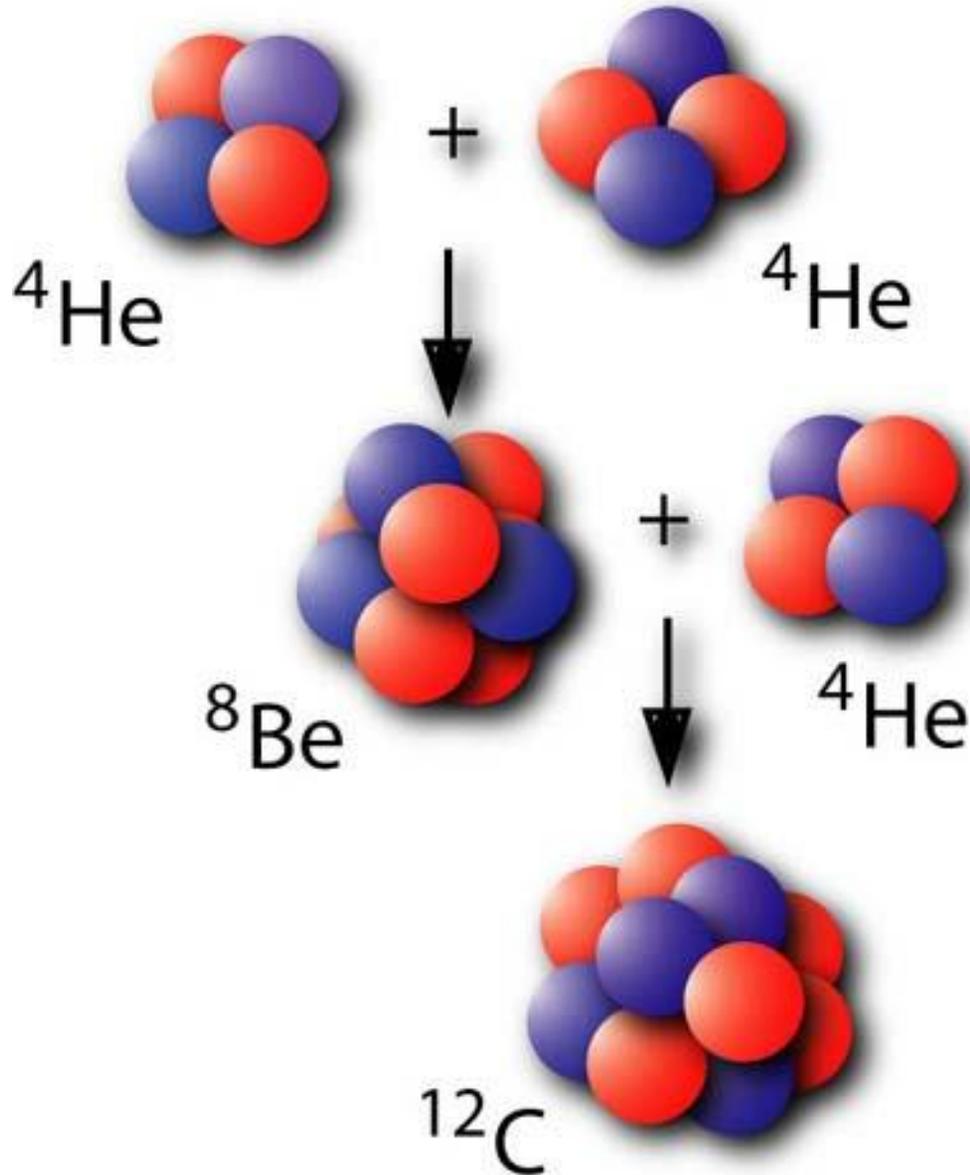
Colapso da nuvem molecular

A Terra provavelmente será destruída

Quando o Sol exaurir o hidrogênio no centro ⇒ Produção do Carbono

- Ocorre um colapso da região central, incapaz de suportar o peso das camadas superiores
- O centro se contrai e se aquece até temperaturas superiores a 10^8 K
- As densidades e temperaturas são tão altas que o próprio He se funde em ^{12}C
- Esta queima do He é chamada *processo triplo α* , pois envolve 3 núcleos de He, ou seja, 3 partículas α
- Produz-se o primeiro carbono!
⇒ finalmente se foi além da nucleossíntese primordial
- Nesta fase as camadas externas da estrela se expandem e resfriam, e a estrela torna-se uma gigante vermelha

Processo Triplo Alfa



Além da fusão do hélio em carbono

- Dependendo de sua massa, as estrelas podem desenvolver regiões com múltiplas camadas em que há reações nucleares, como por exemplo a queima de ^4He em ^{12}C no núcleo e a queima simultânea de H em ^4He em uma camada adjacente ao núcleo e um pouco mais fria do que este.
- Parte do carbono formado pode também se converter em ^{16}O , se a temperatura central for suficientemente alta.
- Estrelas com massas semelhantes à do Sol ou maiores, até um limite da ordem de 8 massas solares geralmente não conseguem ir além deste estágio, isto é, não podem formar elementos químicos mais pesados
- Estas estrelas terminam sua vida como uma *nebulosa planetária*
⇒ será o caso do Sol



NGC 6543

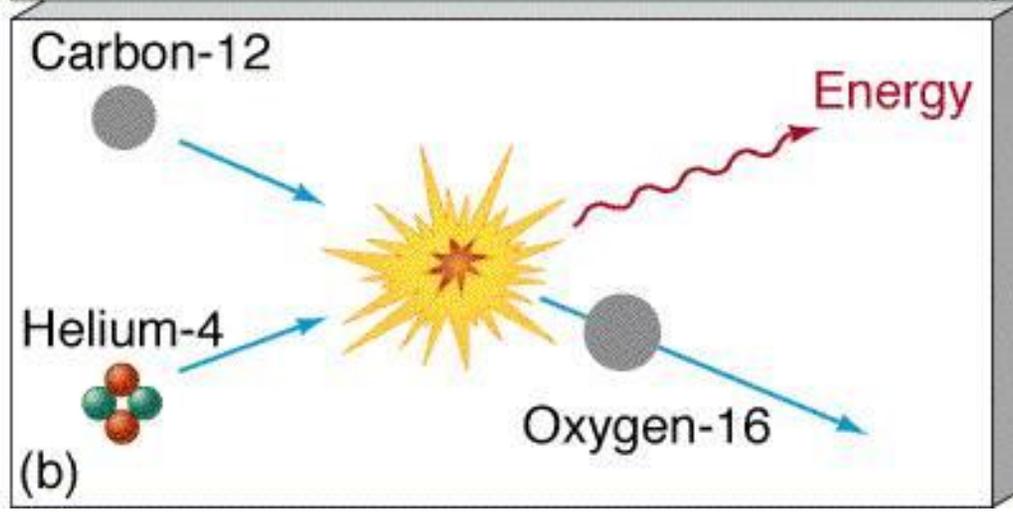
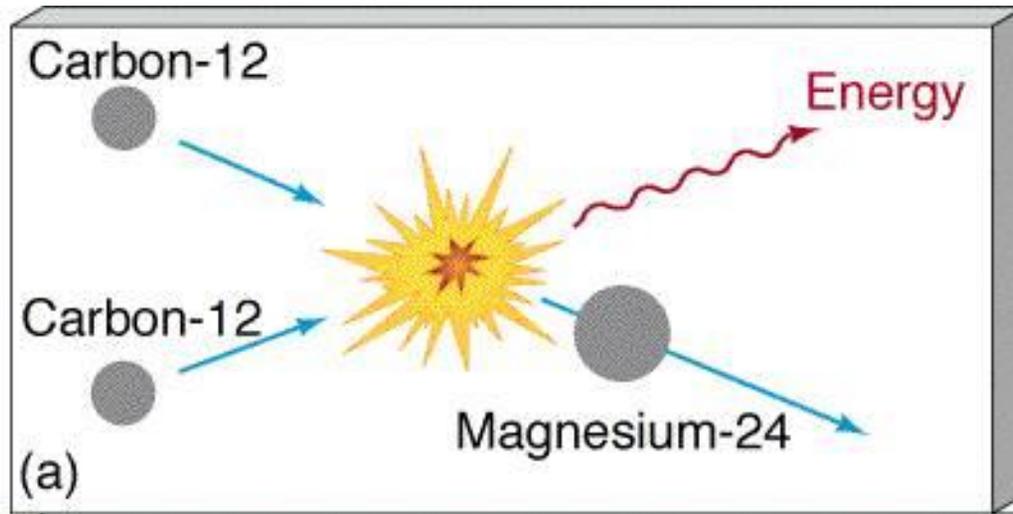
PR95-01a • ST ScI OPO • January 1995 • P. Harrington (U.MD), NASA

HST • WFPC2

12/13/94 zgl

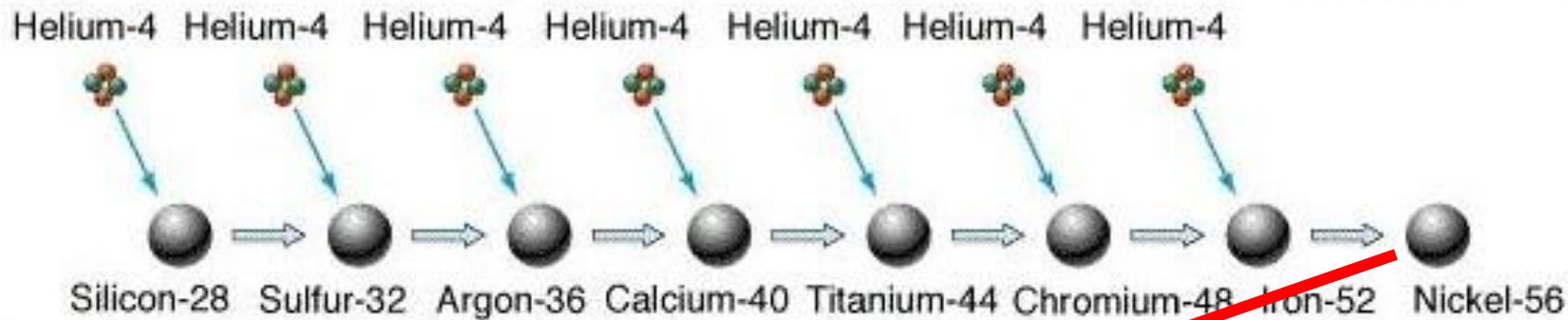
Elementos alfa

- Acima do limite de aproximadamente 8 massas solares, as temperaturas centrais atingem valores acima de 10^9 K e, em seus estágios finais de evolução, essas estrelas possibilitam a formação dos elementos mais pesados ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si , ^{32}S , ^{36}Ar , ^{40}Ca e alguns de seus isótopos.
- Esses são chamados elementos alfa, pois sua formação dá-se pela captura de um núcleo de ^4He (uma partícula alfa) por um núcleo mais leves
- Alguns destes elementos podem também ser formados na queima de carbono ($^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$) e oxigênio ($^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$)
- Essa sequência de reações é eficiente até o ^{56}Fe
- Além do ^{56}Fe , as reações nucleares passam a sequestrar energia em vez de fornecer, e a região central colapsa
- Estas estrelas terminam sua vida como uma *supernova de tipo II*



NUCLEOSSÍNTESE ESTELAR

Processos Alfa



^{56}Fe

^{56}Co
instável

instável

O ^{56}Fe é o elemento mais estável

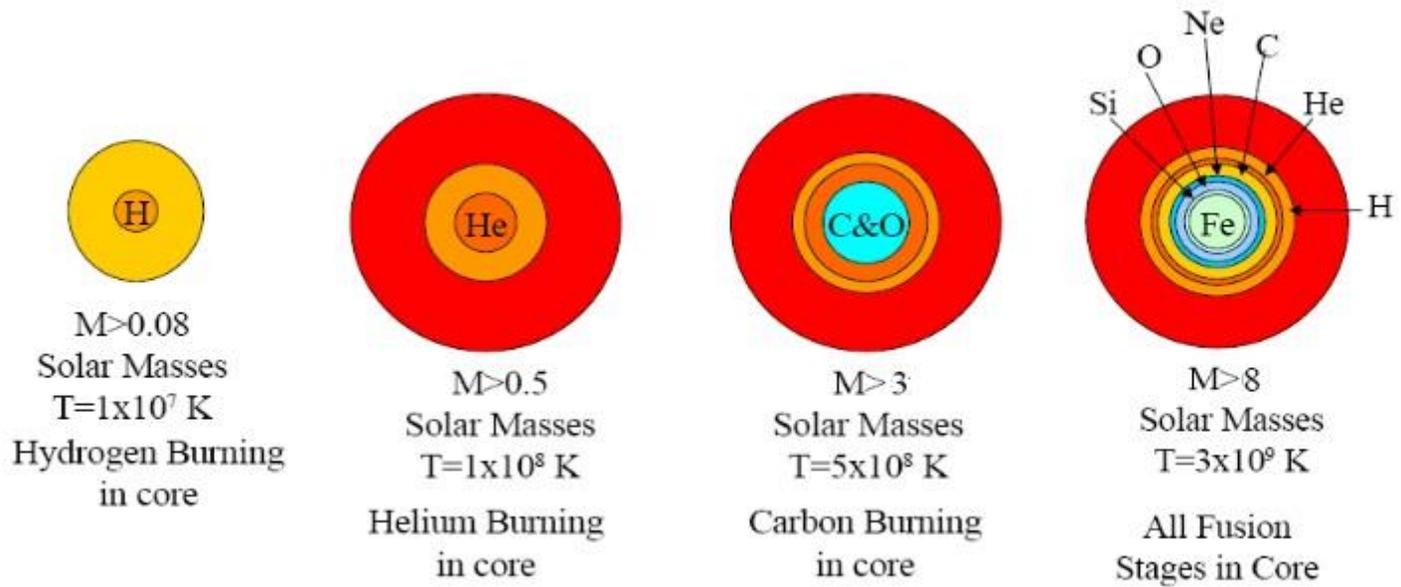
Após ele as reações são endotérmicas (“roubam” energia)

O *Pico do Fe* – Cr, Mn, Fe, Co, Ni – é um “pico” de abundância

Process	Fuel	Products	Temperature
Hydrogen Burning	H	He	1×10^7 K
Helium Burning	He	C,O	1×10^8 K
Carbon Burning	C	O,Ne,Na, Mg	5×10^8 K
Neon Burning	Ne	O,Mg	1×10^9 K
Oxygen Burning	O	Mg-S	2×10^9 K
Silicon Burning	Si	Fe + nearby elements	3×10^9 K

NUCLEOSSÍNTESE ESTELAR

Dependência com a massa estelar



Nucleossíntese além do Fe

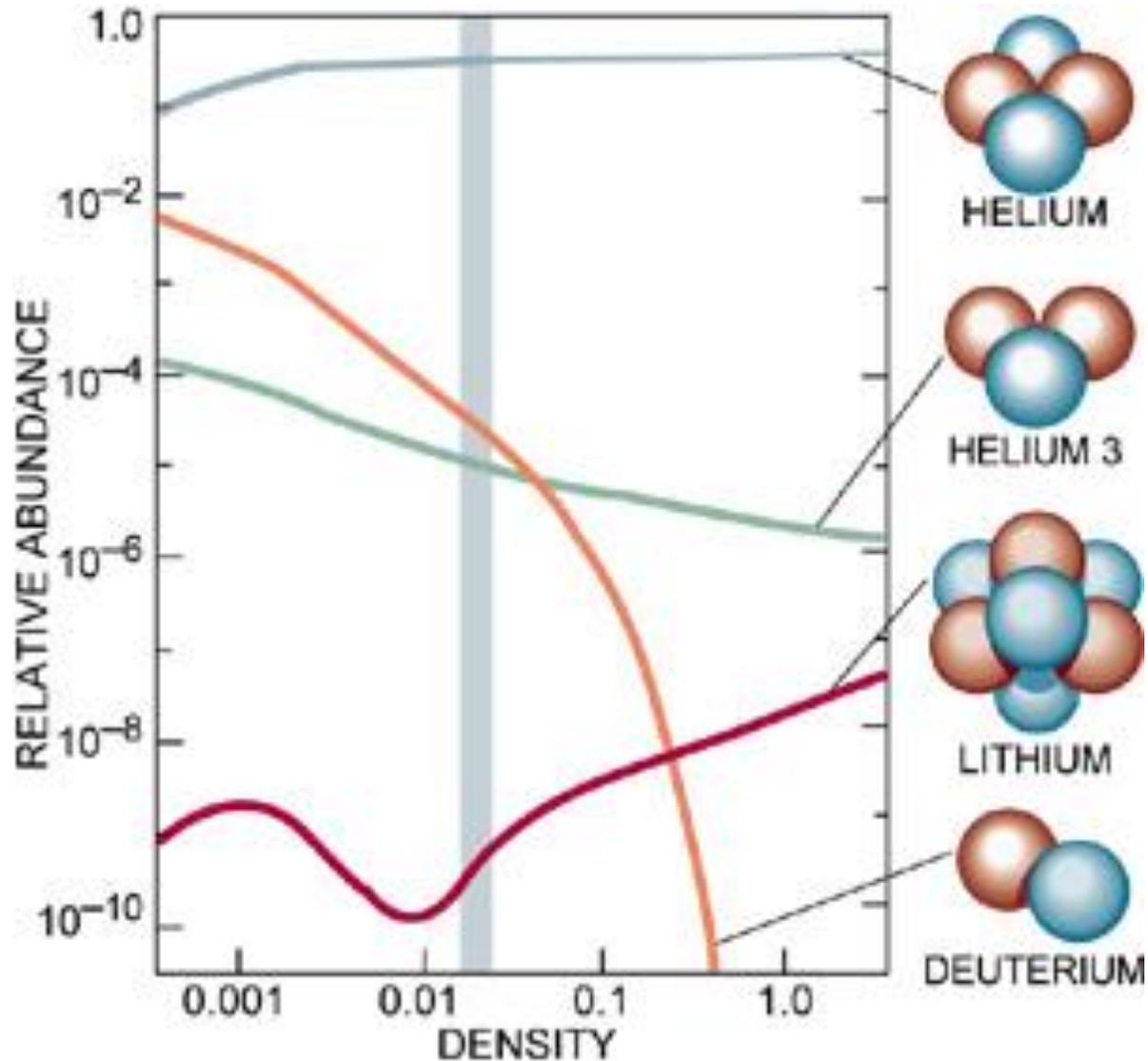
- Além do Fe, a energia de ligação por núcleon diminuiu com a massa atômica e a nucleossíntese passa a exigir energia em vez de produzir.
- Além do Fe, pode ocorrer a captura de prótons, *processo-p*, que é pouco importante, só acontece em altíssimas temperaturas porque o próton tem que vencer a força repulsiva do núcleo positivo
- A síntese de núcleos mais pesados que o ferro se dá principalmente por *captura de nêutrons*, que é de dois tipos: *processo-s* e *processo-r*
- O processo-s (“s” de *slow*) ocorre em fluxos moderados de nêutrons, e envolve isótopos intermediários radioativos de vida longa (milhares de anos), que depois decaem no núcleo final estável. Seus sítios são estágios avançados de evolução estelar de estrelas tanto de baixa massa como de alta massa. Produzem até o Bi.
- O processo-r (“r” de *rapid*) se dá em fluxos de nêutrons altíssimos, e envolve isótopos radioativos de vida curta (menos de 1 segundo). Ocorre em supernovas tipo II e em *fusões de estrelas de nêutrons*.

Sítios de Nucleossíntese

- Big Bang
- Estrelas de baixa massa/Nebulosas Planetárias
- Estrelas de alta massa/Supernovas de tipo II
- Supernovas de tipo Ia
- Fusões de estrelas de nêutrons
- Meio interestelar (espalação por raios cósmicos)
- Outros:
 - Novas
 - Ventos estelares de estrelas de alta massa

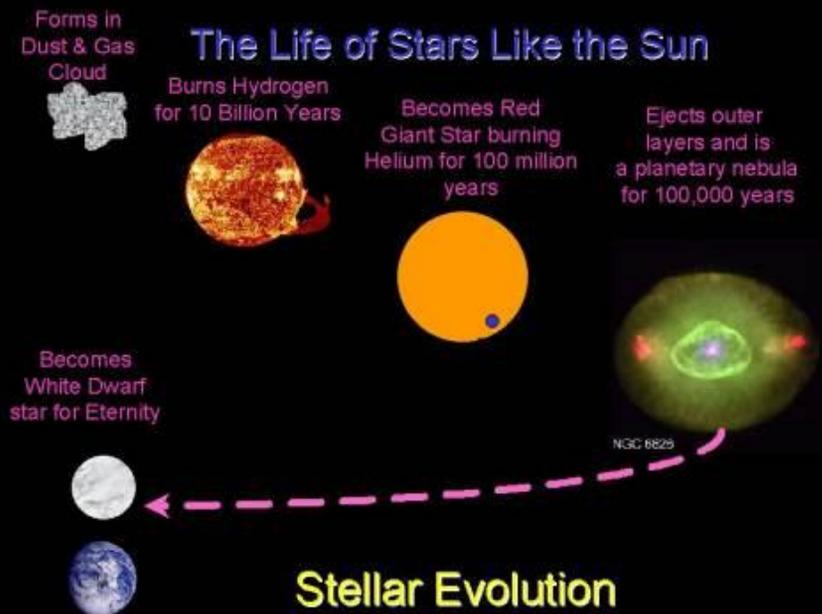
NUCLEOSSÍNTESE PRIMORDIAL

(até o ${}^7\text{Li}$)



Nebulosas Planetárias

- O Sol vai morrer assim!
- Estrelas com massas menores que 8 vezes a massa do Sol
- Núcleo \Rightarrow anã branca
- Camadas exteriores \Rightarrow nebulosa planetária
- Quase todo N, maior parte do C
- Tempos: até vários Ganos
- Promovem as condições pré-bióticas.



Supernovas

- Morte Violenta!
- Mais de um tipo:
 - Ia: sistemas binários
 - II: estrelas de alta massa

Supernova!
Supernova!



SN1987A (David Malin and the Anglo Australian Observa

Supernovas II

SNII: queima nuclear até Fe

- Colapso gravitacional
- Núcleo \Rightarrow estrela de nêutrons ou buraco negro
- Camadas exteriores \Rightarrow supernova
- Produção de O, elementos α , C, (Fe)
- Tempos: Manos (ou anos para as hipernovas primevas)

Supernova!



SN1987A (David Malin and the Anglo Australian Observa

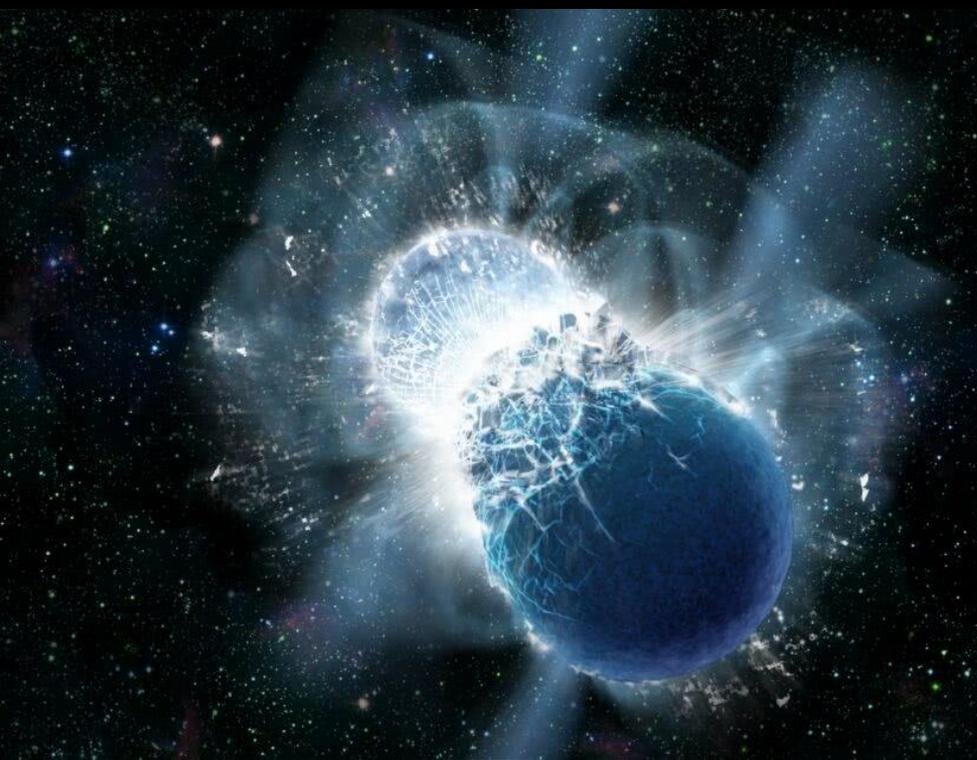
Supernovas Ia

- SN Ia: anãs brancas em sistemas binários
- Incertezas quanto a companheira:
 - anã branca,
 - gigante vermelha,
 - degenerada,
 - não degenerada
- $L \sim 10 - 100 \times L_{\text{SNII}}$
- Produção de Fe
- Tempos: 0.1-1 Ganos

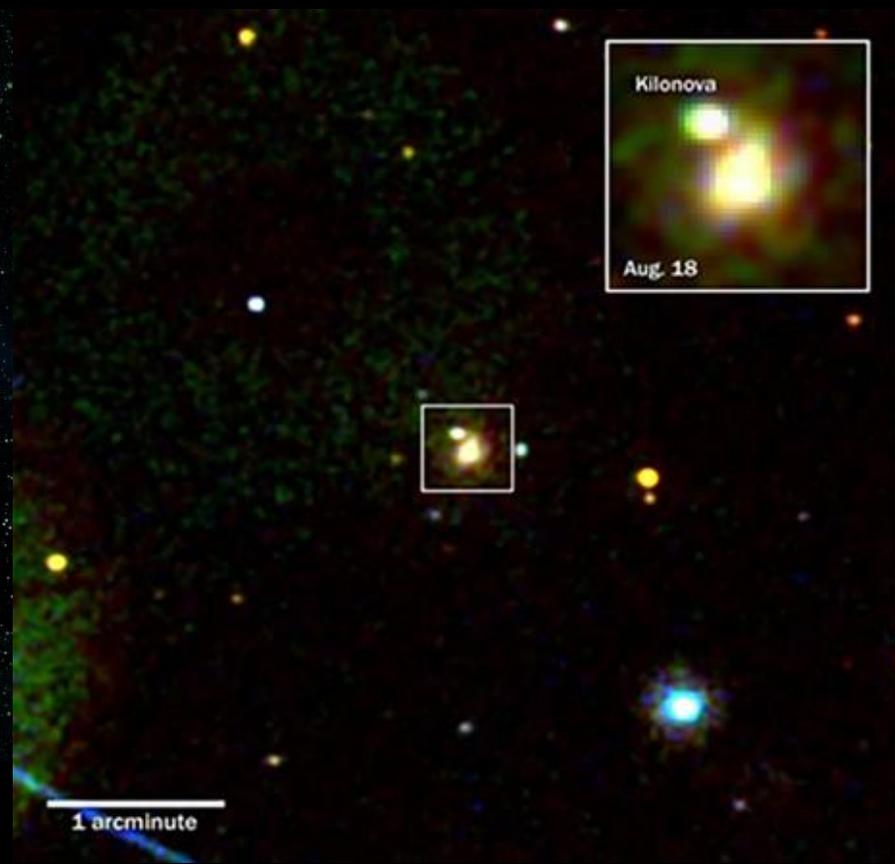


SN1994D - Hubble Space Telescope

Fusões de Estrelas de Nêutrons

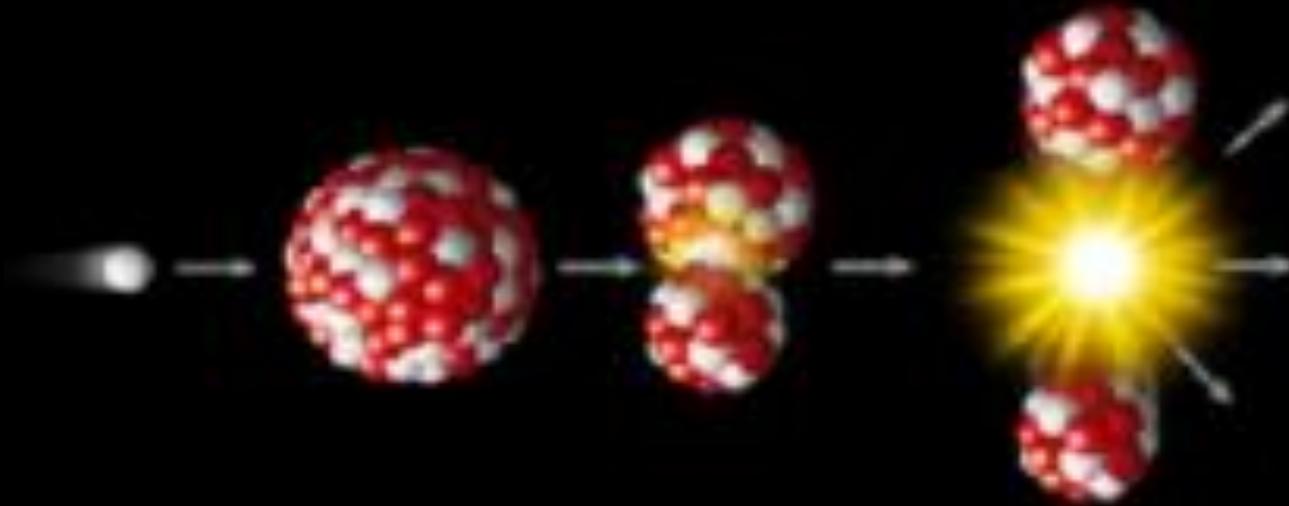


- Nucleossíntese também ocorre em Buraco Negro-Estrela de Nêutrons
- altos fluxos de nêutrons
⇒ processo-r
- Produção de lantanídeos (ex. Eu); Os-Ir-Pt-Au; actinídeos (Th, U)



Kilova detectada em 2017 pelo Swift após o evento de ondas gravitacionais GW170817 . Produziu-se 1-5 M_{\oplus} de Eu e 3-13 M_{\oplus} de Au, e $> 100 M_{\oplus}$ de Pt.

Li, Be, B (bem pouco abundantes)
⇐ NUCLEOSSÍNTESE NO MEIO INTERESTELAR
Espalação por raios cósmicos



${}^6\text{Li}$ (o isótopo mais leve do lítio)*, Be (berílio) e B (boro)

* ${}^7\text{Li}$ é produzido no Big Bang, por espalação e em estrelas

