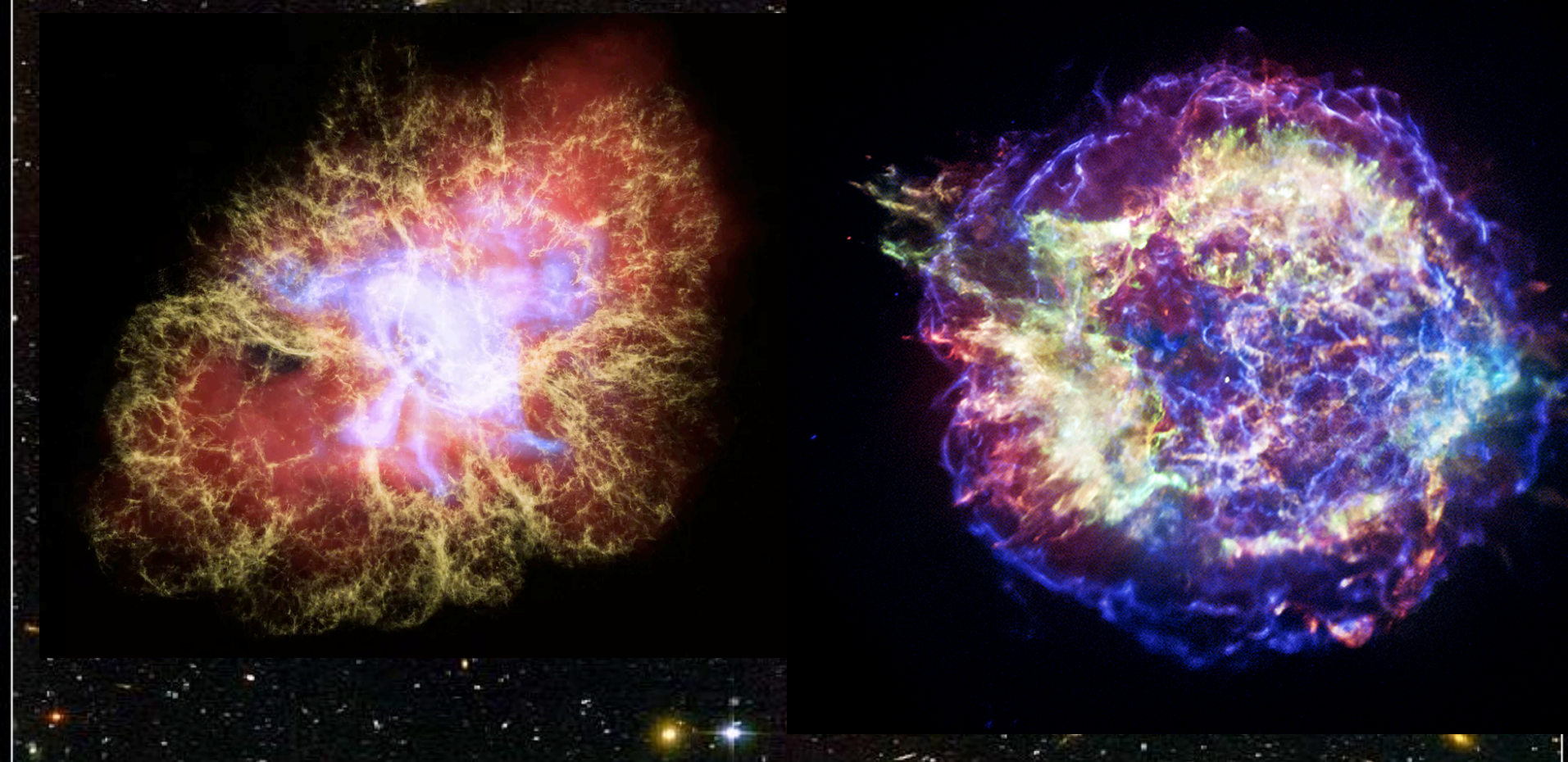


- Crab é uma nebulosa fotoionizada, não um
- Remanescente de SN. A massa estimada é $< 1 M_{\odot}$
 - Em Cas A temos $> 8 M_{\odot}$



As estrelas de neutrons e a origem dos elementos da Tabela Periódica

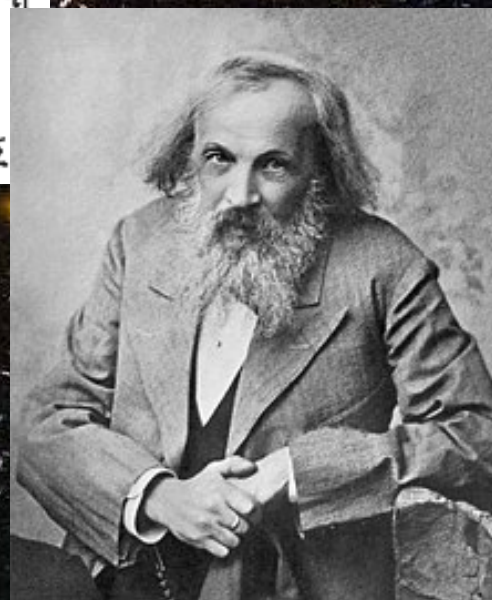


J.E. Horvath
Astronomia IAG - USP

COSMOLOGY MARCHES ON

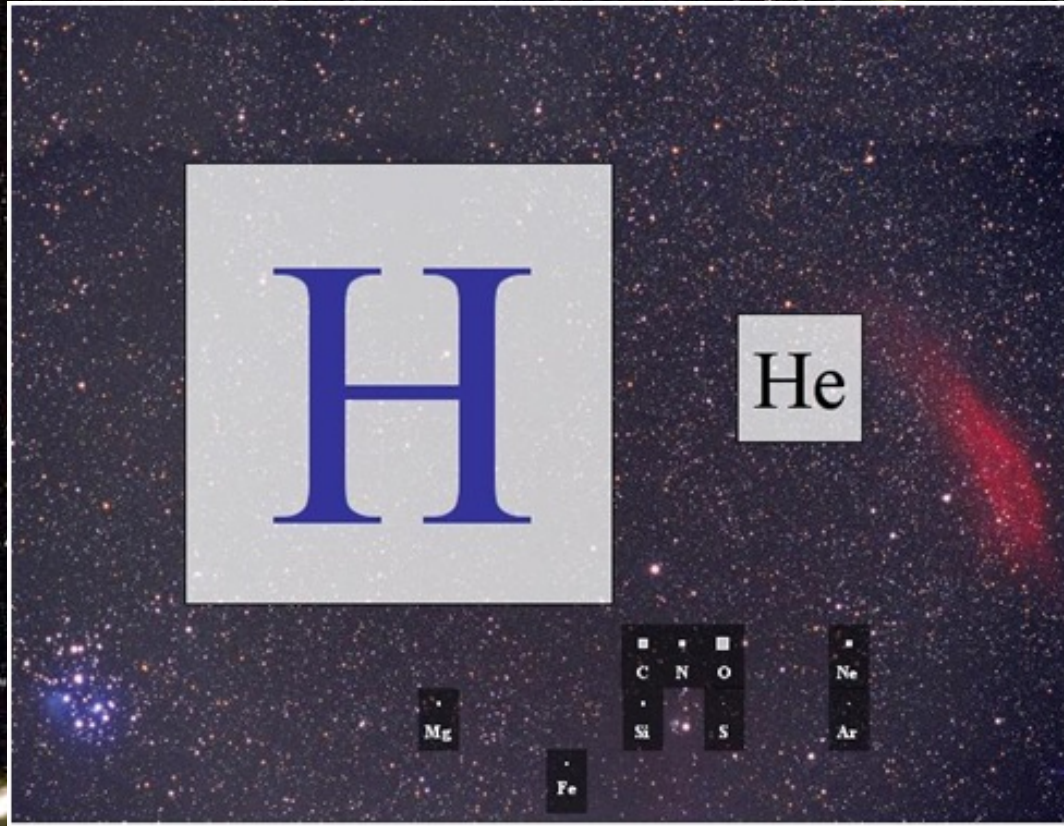


De onde vieram os elementos?



D. Mendeleev (~1890)

A Tabela Periódica do astrônomo: 99% do Universo é hidrogênio e hélio



...mas o ~ 1% restante é o que permite a Biologia (entre outras coisas)

A Cosmologia moderna: nucleossíntese no Big Bang

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho + \frac{C}{a^2}$$

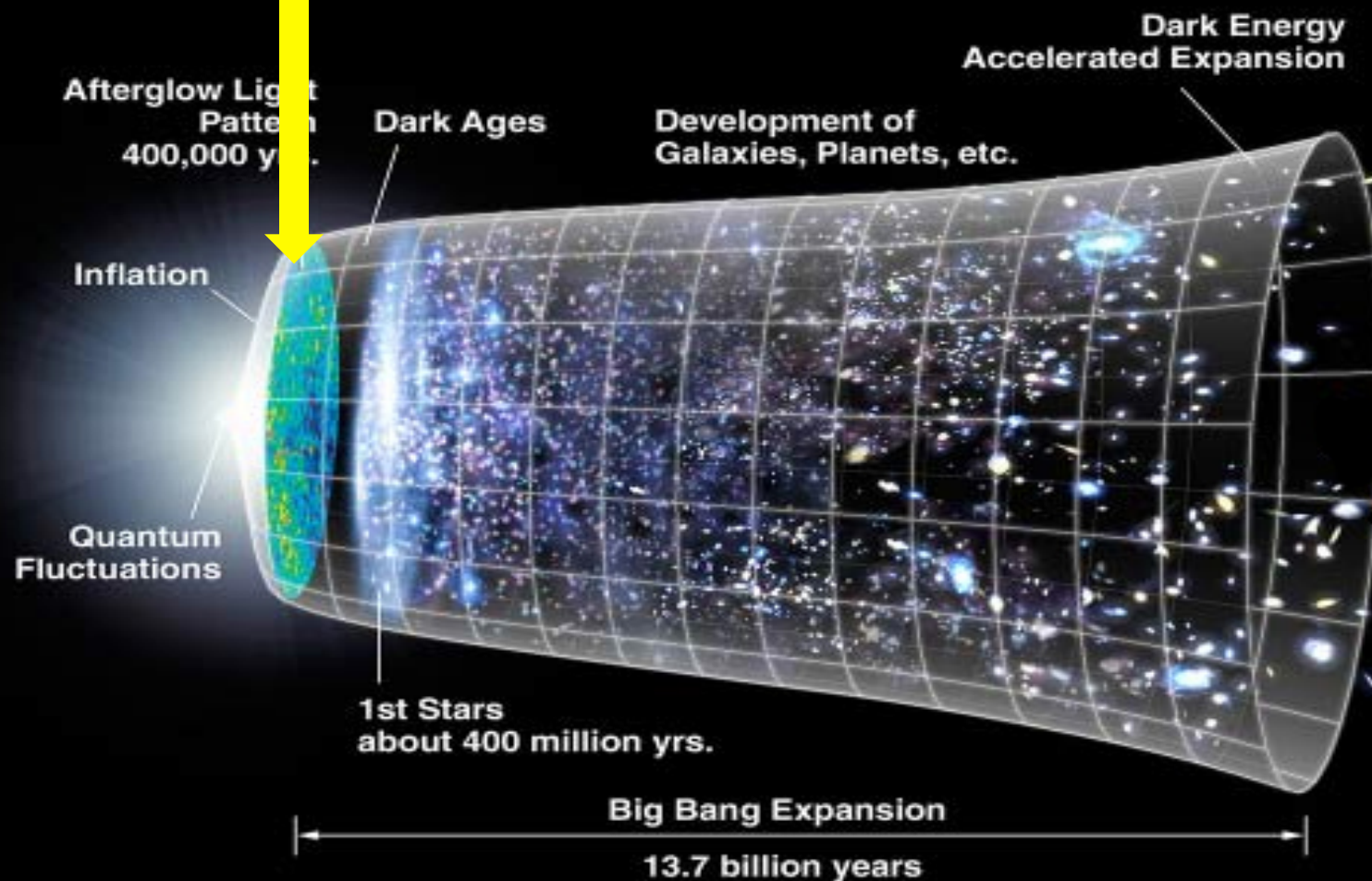
+

$$\dot{\rho} = -3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + P)$$

+

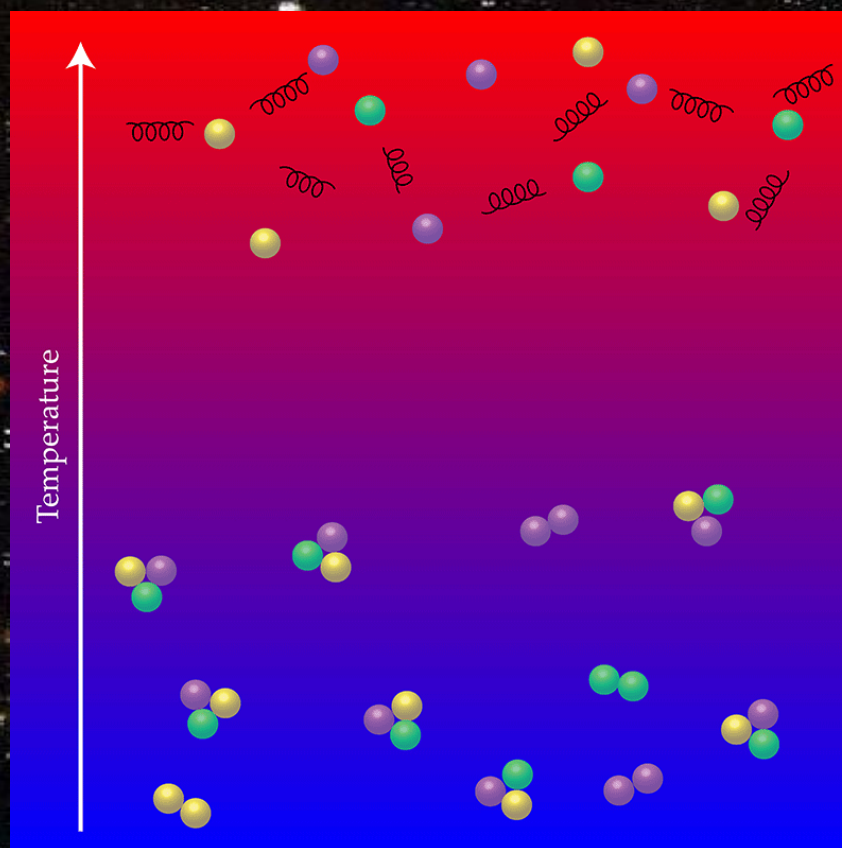
$$P = \omega\rho$$

Antes de ~ 3 min os
núcleos não existiam ...



Hadrossíntese primordial ($T \sim 10^{12}$ K) : os quarks não mais podem ficar livres e os hádrons (prótons, nêutrons...) são formados...

Evento também conhecido como “confinamento da cor”



Um pouco mais tarde... ($T \sim 10^9$ K, $t \sim 3$ min)

(o Universo ficou frio o suficiente quanto para que a ligação dos núcleos não fosse superada pelo bombardeio da radiação...)

Os prótons e nêutrons se interconvertiam...



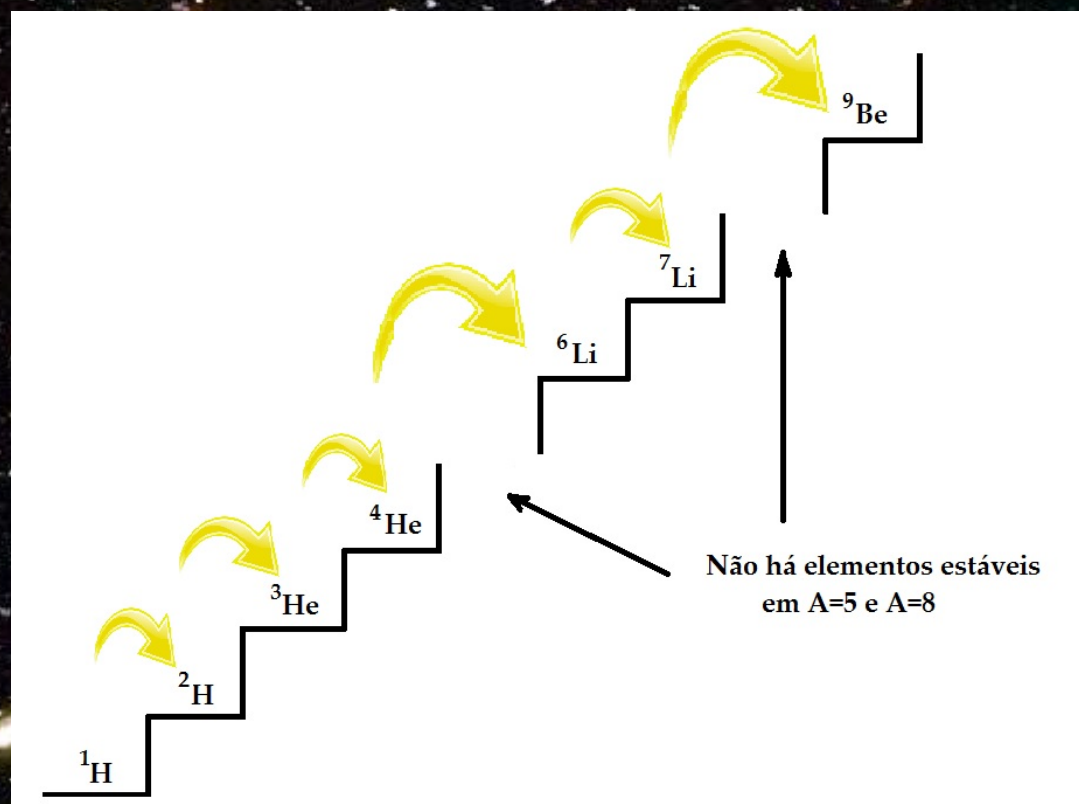
Até que essas reações ficaram mais lentas que a expansão do Universo, e assim pararam. Nesse momento a razão *congelou* $\sim 1/7$

$$\frac{N_n}{N_p} = \exp(-\Delta m / T_F)$$

Diferença
 $p - n = 1.3$ MeV

$= 0.7$ MeV, dos cálculos

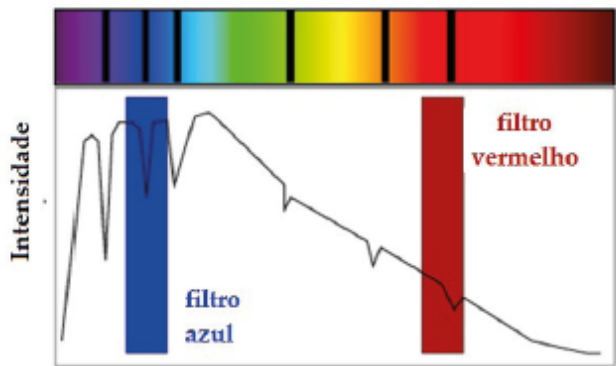
Assim, 6 de cada 8 núcleons ficaram “soltos” e 2 se emparelharam, formando Posteriormente hélio. Resultado: 75% hidrogênio e 25 % hélio. Uma pequena fração continuou a fusão para produzir até lítio 7...e nada além porque



Alguns destes pontinhos miseráveis
são as galáxias mais velhas do Universo
(o recorde está em $z \sim 10$...)

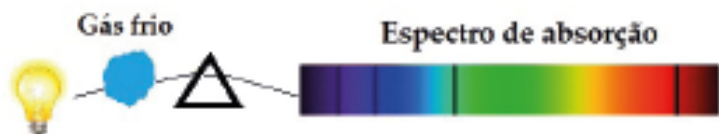
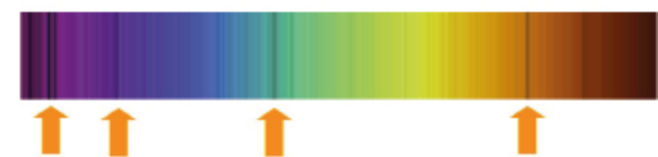


O quê medimos delas?

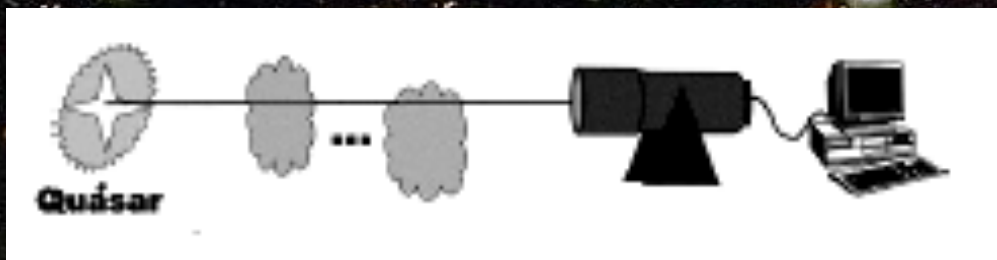


Fraunhofer & Wollaston
(~1830)

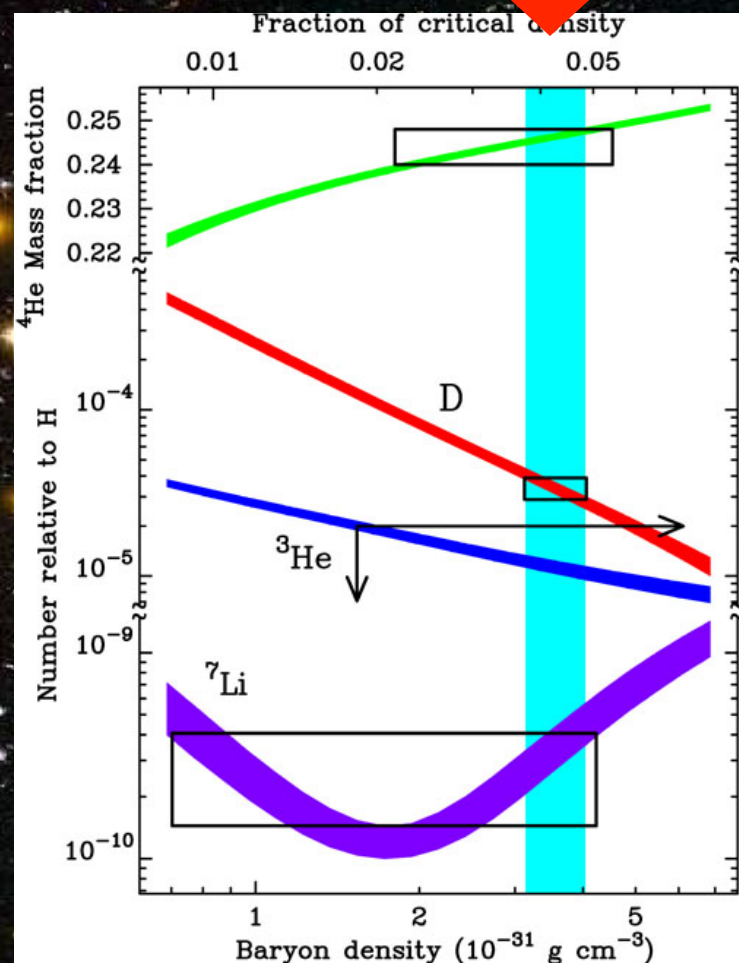
Bunsen & Kirchhoff
(~1850)



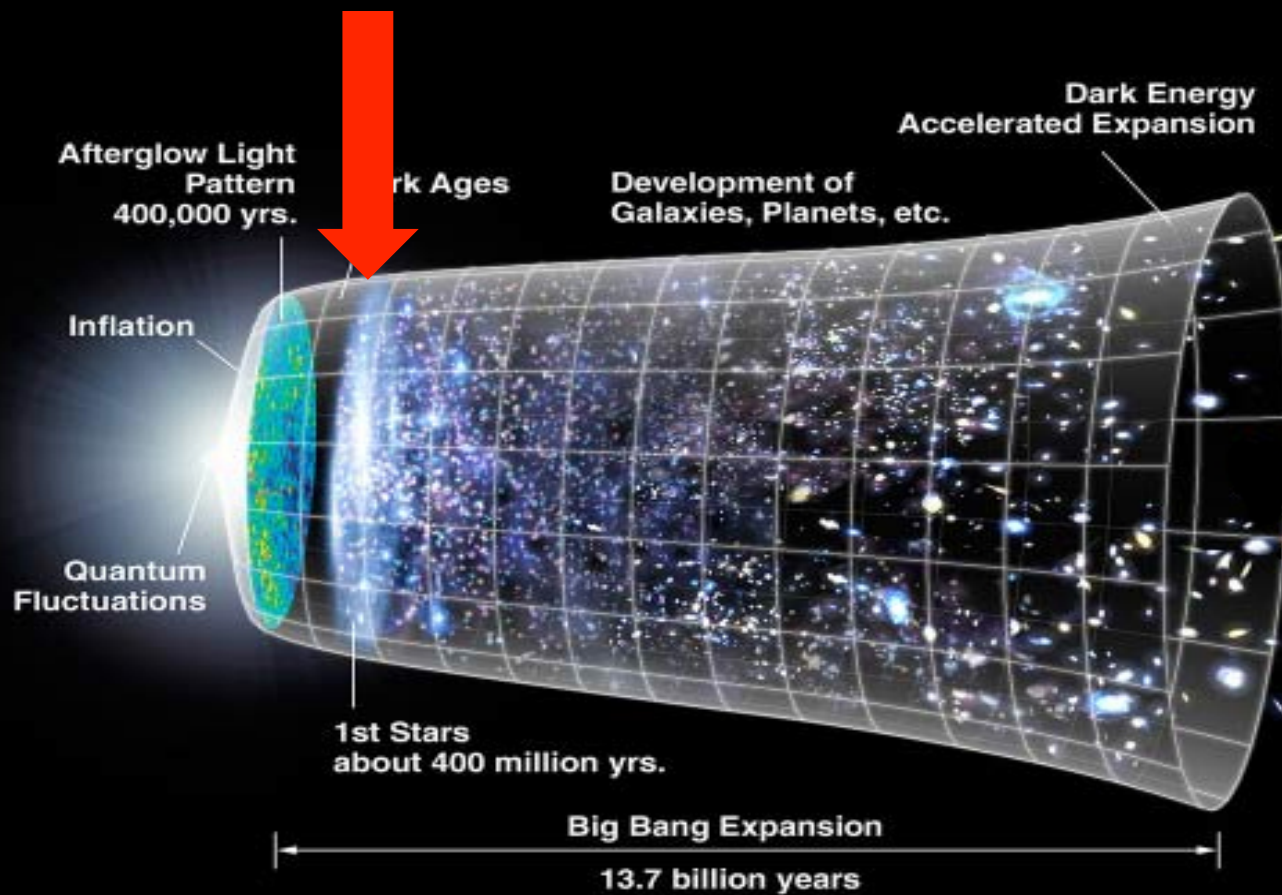
Medidas de objetos que “iluminam” as nuvens no caminho da linha de visada



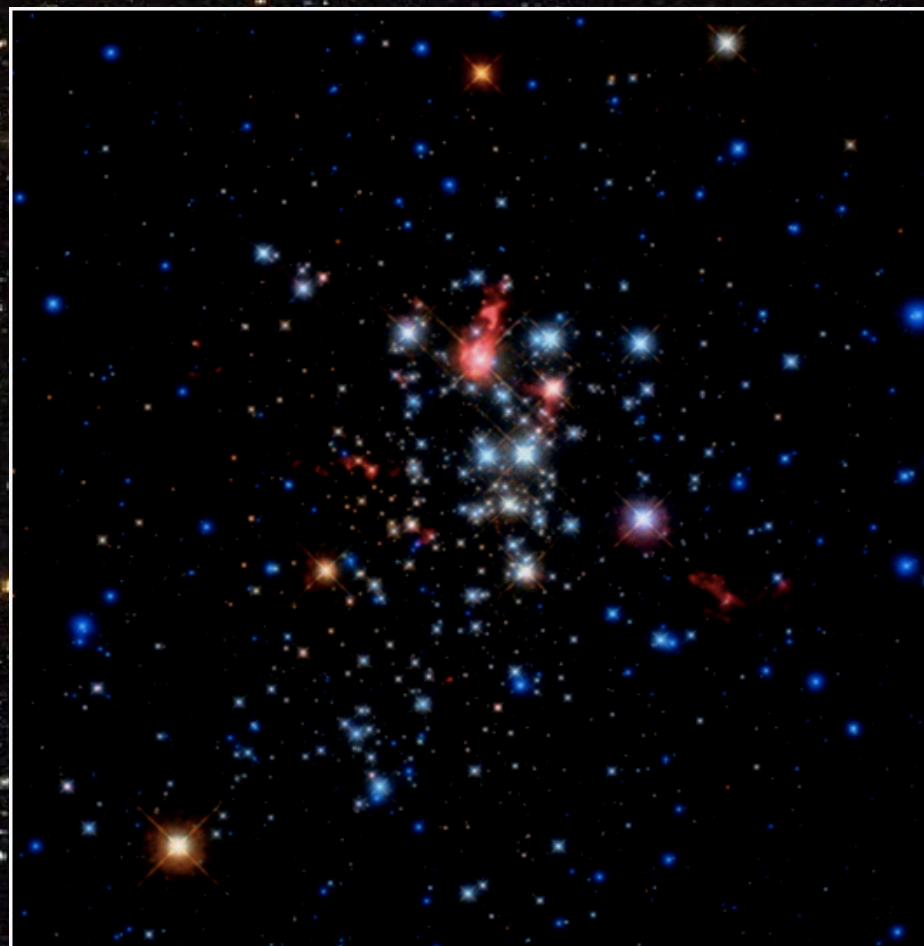
Faixa observada



Por muito tempo o Universo foi composto de elementos muito leves...



...mas finalmente a matéria começou a formar estruturas...
As primeiras estrelas se formaram e o Universo reionizou



O importante: compreendemos a estrutura e evolução das estrelas suficientemente quanto para avaliar a nucleossíntese decorrente

M. Burbidge, G. Burbidge, W. Fowler & F. Hoyle (1957)

103 páginas brilhantes, esclarecendo quase todos os processos de nucleossíntese estelar

REVIEWS OF
MODERN PHYSICS

VOLUME 29, NUMBER 4

OCTOBER, 1957

Synthesis of the Elements in Stars*

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

*Knott 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 5)

but perhaps

"The lord is here! Heaven, it not in our stars, But in ourselves,"
(Antony and Cleopatra, Act I, Scene 2)



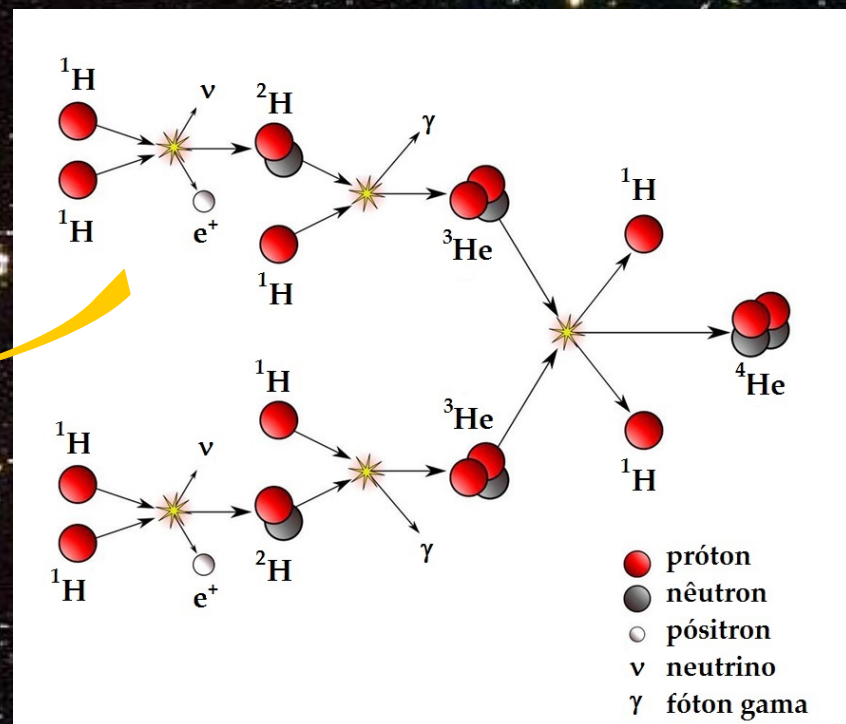
As estrelas: os “fornos” nucleares onde a fusão produz elementos químicos importantes a partir do hidrogênio...

Sol e cia.: temperaturas moderadas, nucleossíntese parcial

Esta é a “conversão de H em He” mas está cheia de armadilhas !

Por exemplo, 2 prótons **não têm estado ligado** (ainda bem...as “estrelas” explodiriam em frações de segundo)

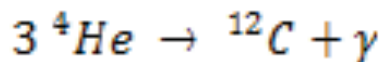
Um próton precisa decair em **nêutron justamente** quando está ao lado: isso quase nunca acontece



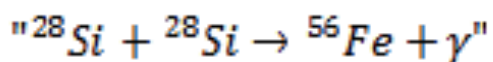
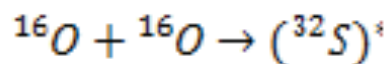
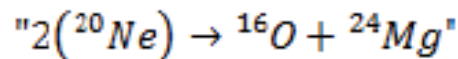
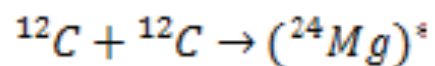
Os tempos de vida das estrelas são ~Gyr por serem controlados pelas interações fracas !!!

Enquanto isso, as estrelas de grande massa ($> 8-10 M_{\odot}$)

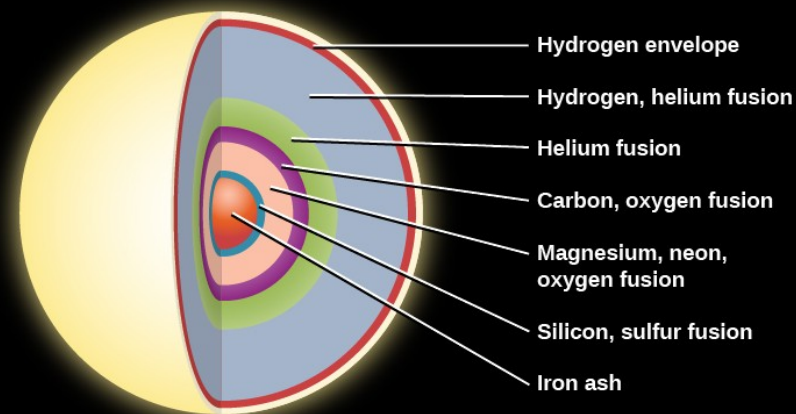
Conseguem não só a ignição do carbono...



Mas posteriormente também



Lógico, se não a vida seria impossível...



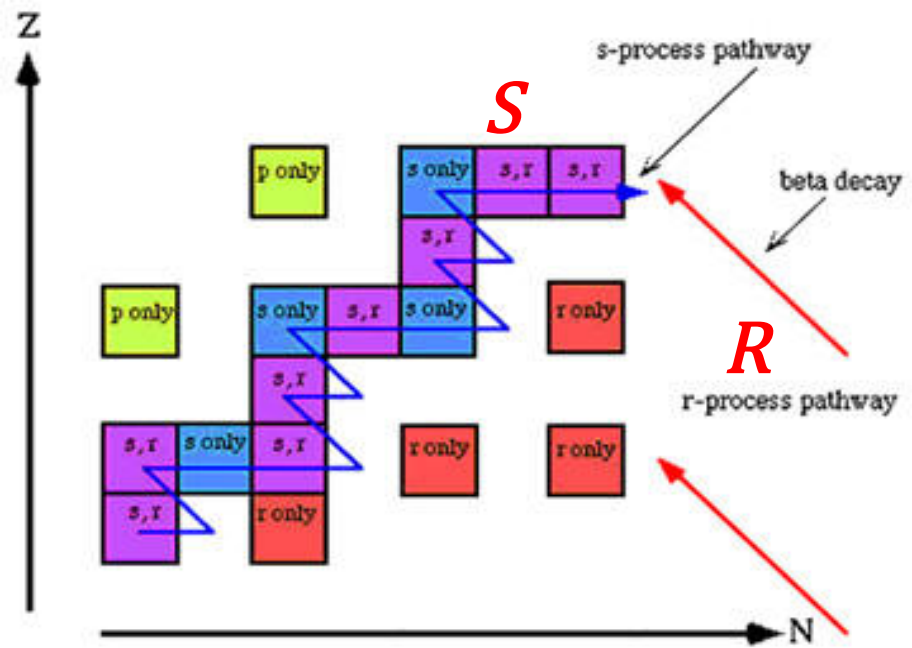
A cada ciclo, a energia liberada é maior, mas dura menos...

Combustível	Produto Principal	Produtos Secundários	Temperatura ($10^9 K$)	Duração do Estágio (anos)
<i>H</i>	<i>He</i>	^{14}N	0.02	10^7
<i>He</i>	<i>C, O</i>	$^{18}O, ^{22}Ne$ Processo - s	0.2	10^6
<i>C</i>	<i>Ne, Mg</i>	<i>Na</i>	0.8	10^3
<i>Ne</i>	<i>O, Mg</i>	<i>Al, P</i>	1.5	3
<i>O</i>	<i>Si, S</i>	<i>Cl, Ar, K, Ca</i>	2.0	0.8
<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Ti, V, Cr, Ni, Mn, Co</i>	3.5	1 semana

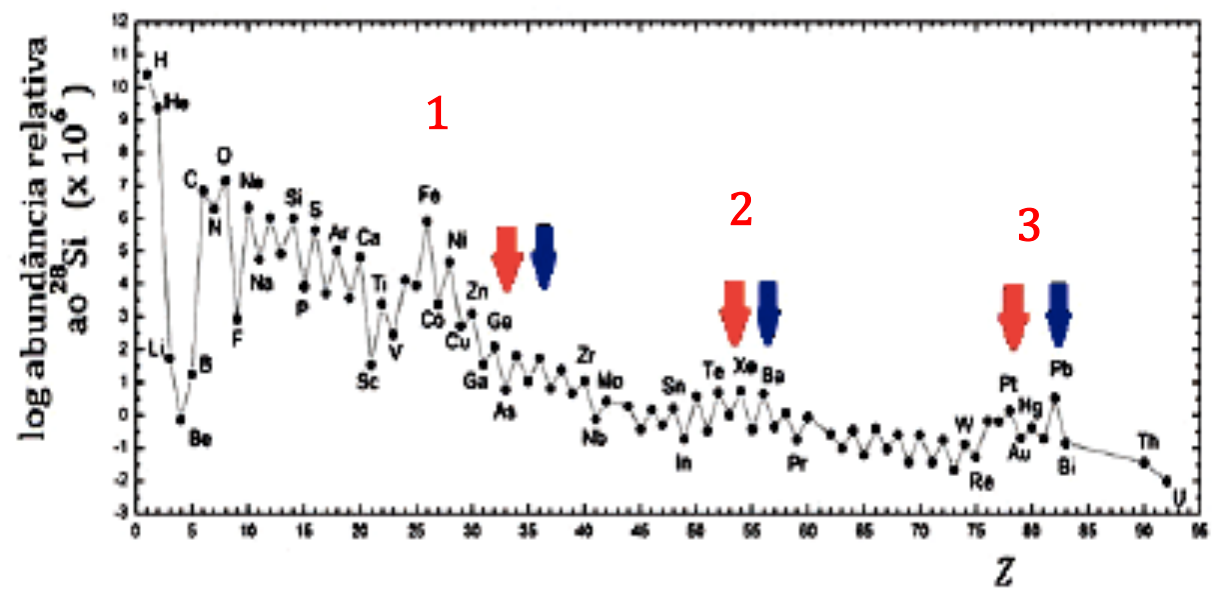
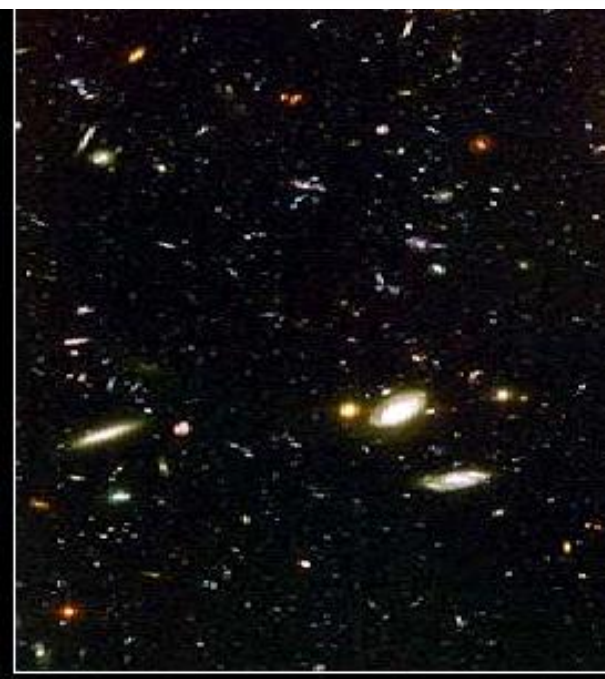
Chegamos assim até o “Fe”, mas e depois?

Processo “s” (de “slow”) : nos estágios mais avançados, o tempo de captura de nêutrons é muito longo, mas muito mais curto que a duração do mesmo (ventos em AGB)

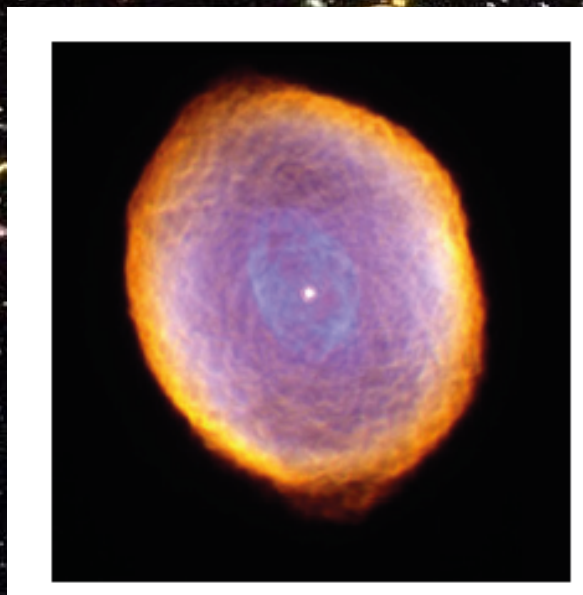
Processo “r” (de “rapid”): se a densidade de nêutrons é enorme, os núcleos capturam n sem tempo para decair (“engasgam”), só decaim depois (explosões)



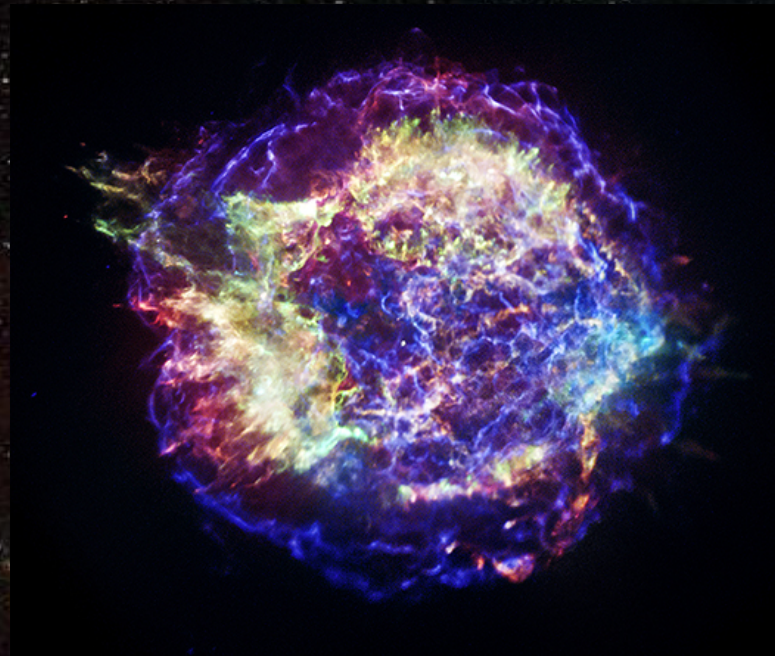
Alguns núcleos são produzidos somente pelo processo s , outros somente pelo processo r e alguns pelos dois. Sempre foi problemático chegar até o “terceiro pico” que contém chumbo, ouro, etc.



No fim de suas vidas, umas e outras (“solares” e “massivas”) devolvem os elementos sintetizados para o Meio Interestelar



+

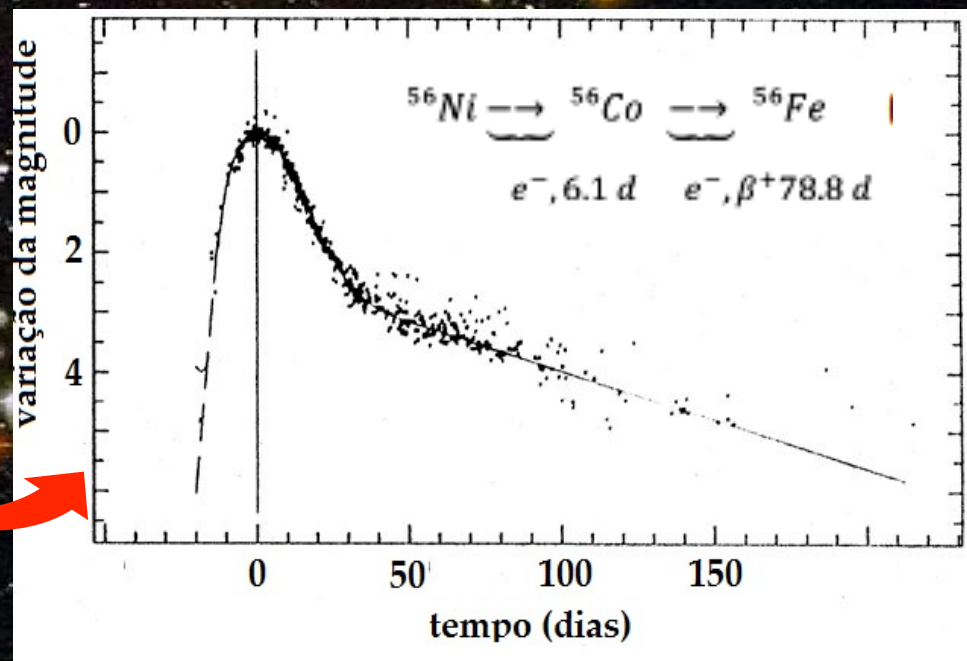
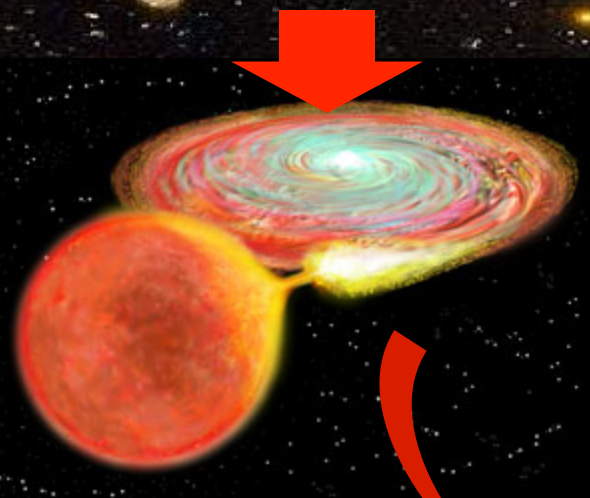


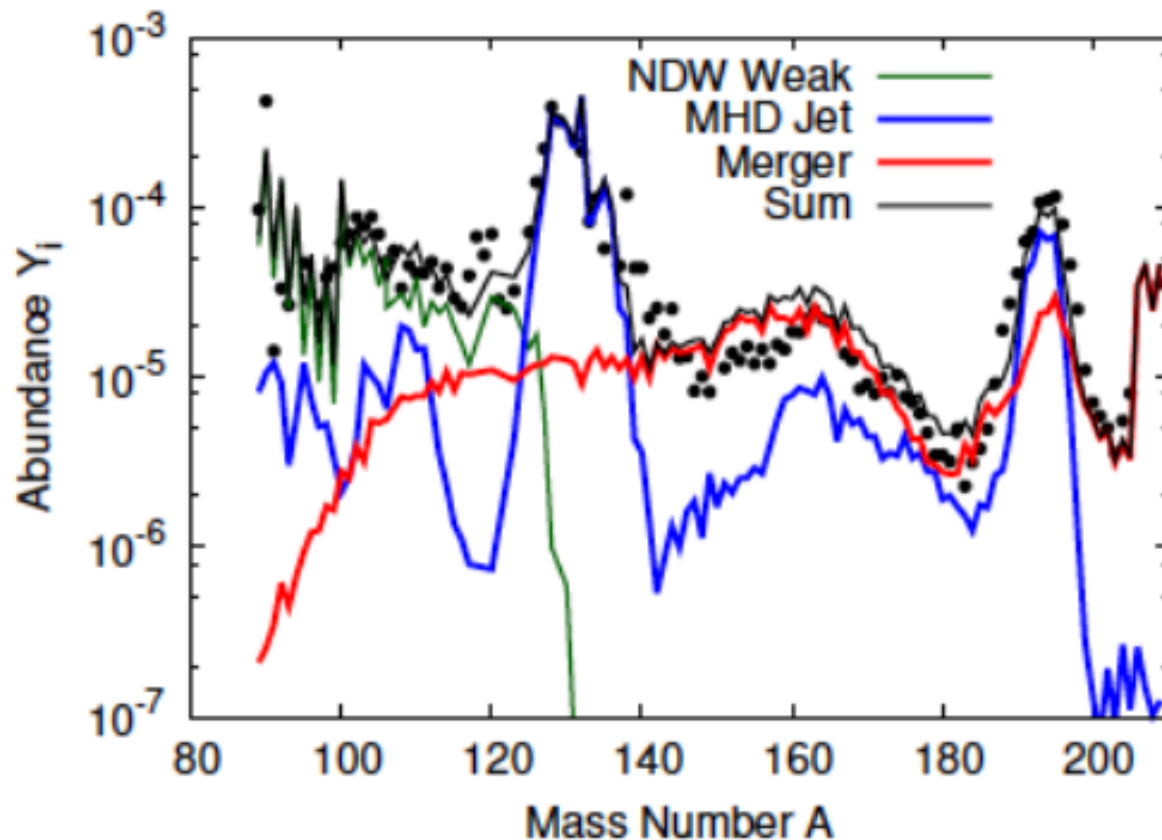
Nebulosas planetárias (ejeções)
(C, O, N...)

Remanescentes de supernovas (explosões)
(O, Ne, K, Si, Fe...)

As explosões termonucleares (supernovas Ia) também contribuem com elementos intermediários (Na, Ca, Fe...) e produzem a maior parte do Fe na galáxia

Uma anã branca suga matéria e acende o carbono no centro ...ou duas em fusão





Mas os cálculos das explosões
SNII nunca foram satisfatórios

T. Kajino (2017)

Sensitive to:

Nuclear rates, neutron capture rates,
nuclear masses, beta decay rates,
fission barriers

Por muitos anos estudaram-se as supernovas II como sítio de produção de ouro etc. (actinídeos), mas sem resultados conclusivos Até a sugestão de Eichler, Livio, Piran & Schramm (1989)

nature > letters > article

nature
International journal of science

Letter | Published: 13 July 1989

Nucleosynthesis, neutrino bursts and γ -rays from coalescing neutron stars

David Eichler, Mario Livio, Tsvi Piran & David N. Schramm

Nature **340**, 126–128 (1989) | [Download Citation](#) 

833 Accesses | 1165 Citations | 52 Altmetric | [Metrics](#) >>

Abstract

NEUTRON-STAR collisions occur inevitably when binary neutron stars spiral into each other as a result of damping of gravitational radiation. Such collisions will produce a characteristic burst of gravitational radiation, which may be the most promising source of a detectable signal for proposed gravity-wave detectors¹. Such signals are sufficiently unique and robust for them to have been proposed as a means of determining the Hubble constant². However, the rate of these neutron-star collisions is highly uncertain³. Here we note that such events should also synthesize neutron-rich heavy elements, thought to be formed by rapid neutron capture (the r-process)⁴. Furthermore, these collisions should produce neutrino bursts⁵ and resultant bursts of γ -rays; the latter should comprise a

E depois de muito trabalho, desenvolvimento instrumental etc.
em 2017

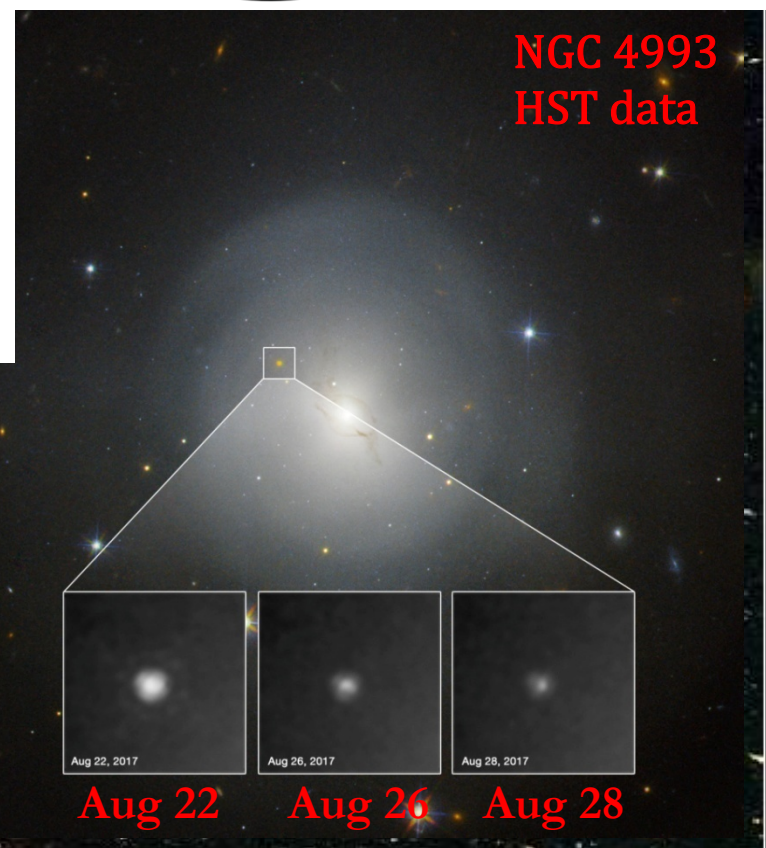
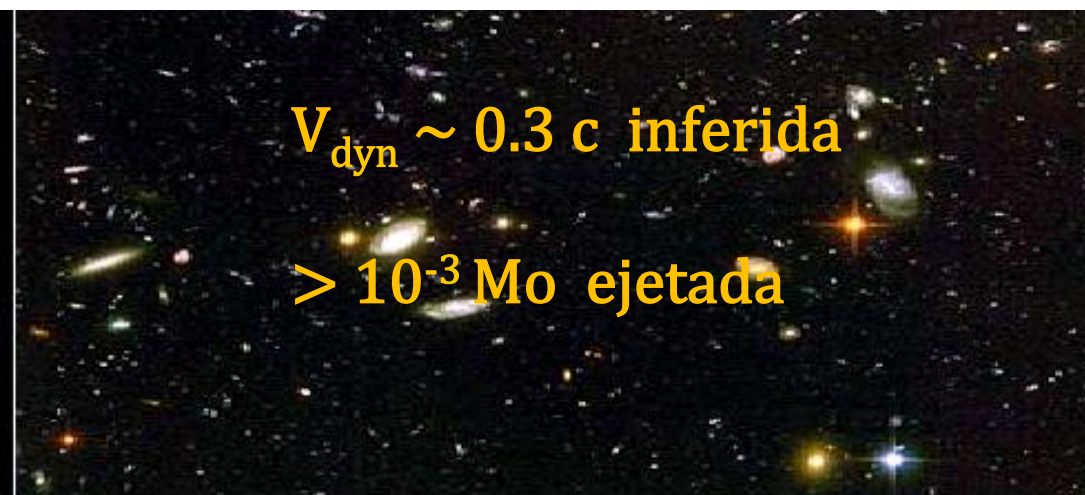
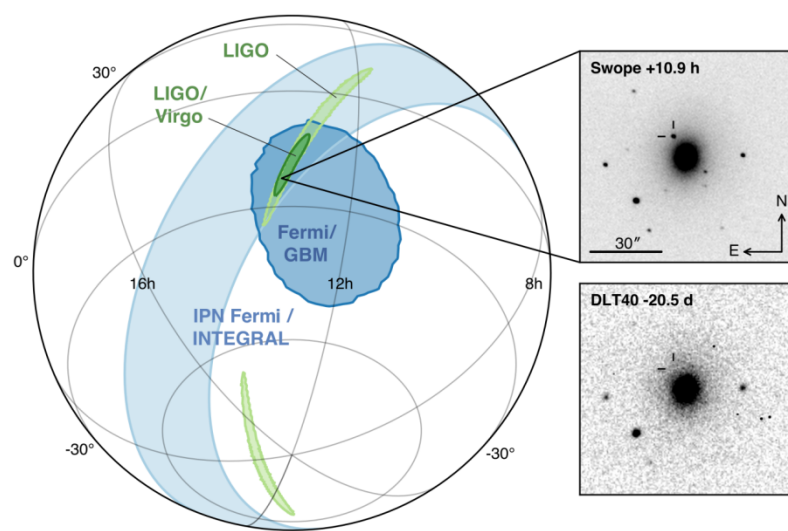
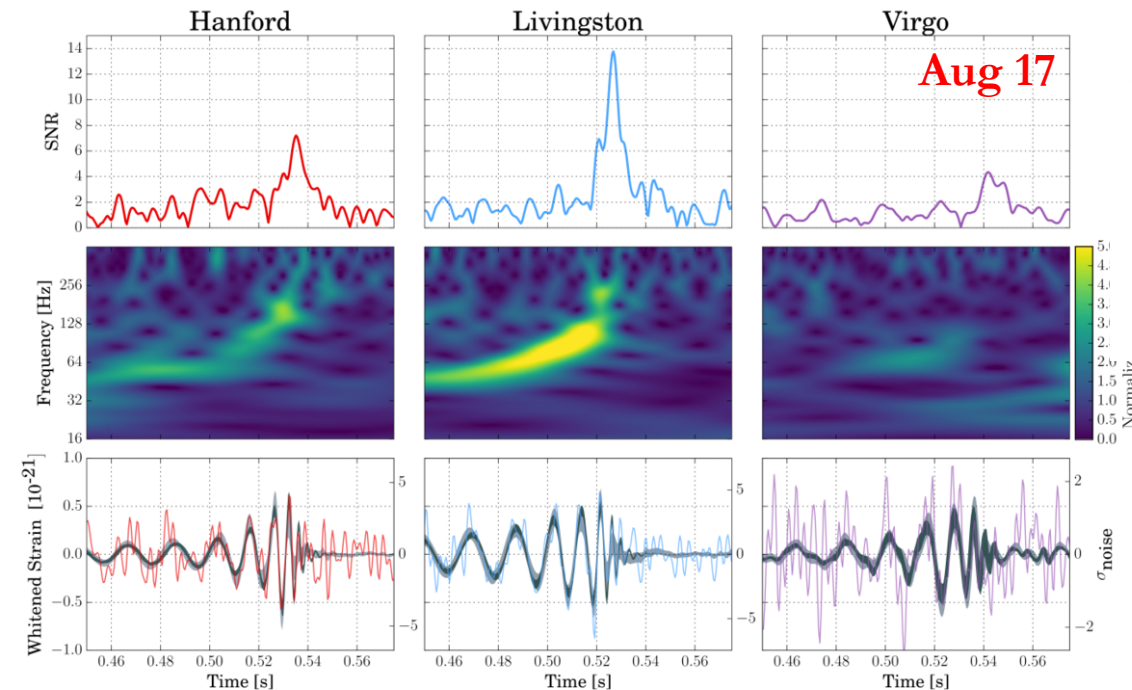
Interferômetros LIGO & VIRGO



Satélite FERMI (raios gama)



GW 170817 @ 12:41:04.4 UTC

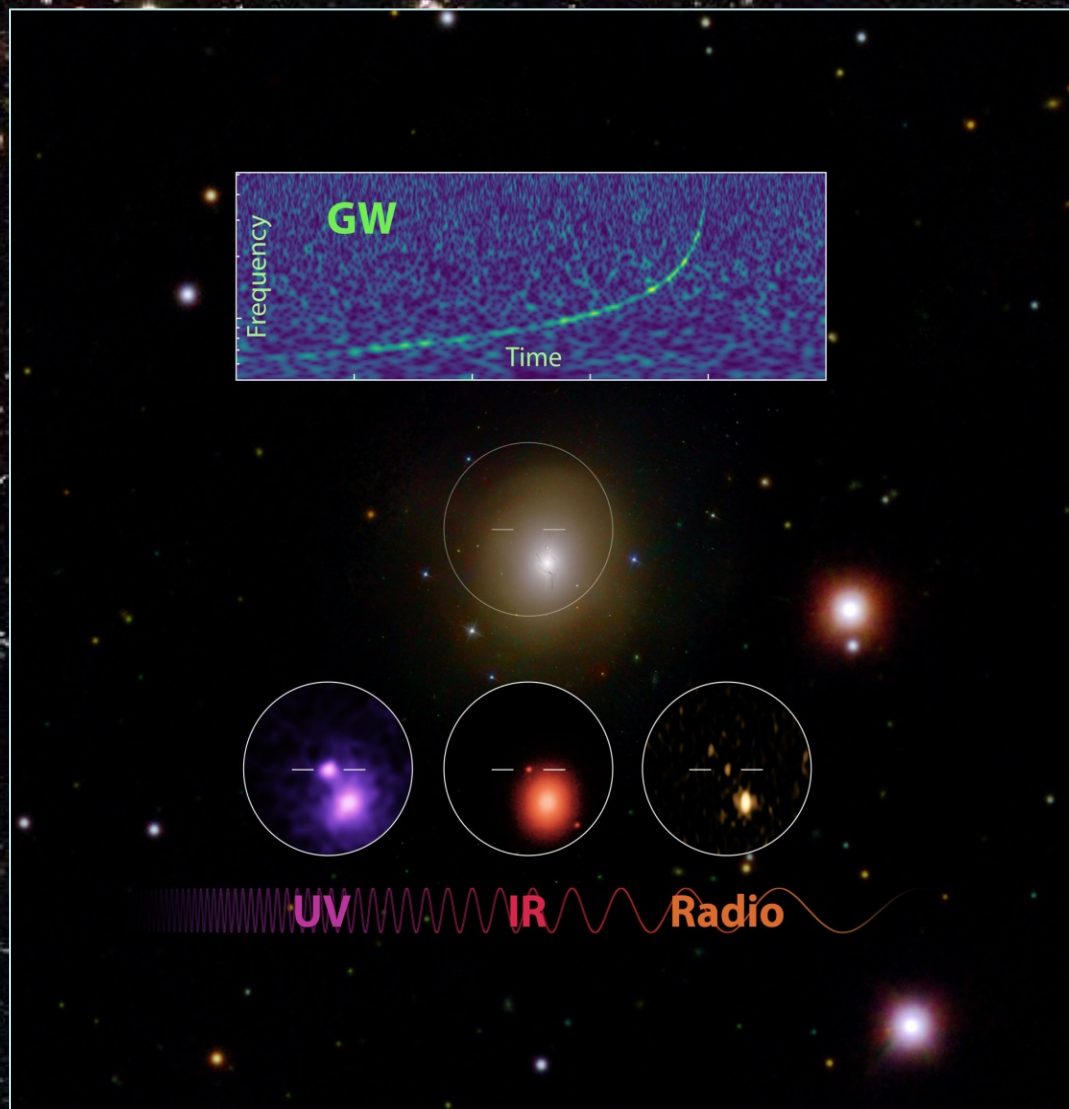


1 evento a cada 100 000 anos por galáxia, cada um ejeta $10^{-3} M_{\odot}$

Matéria ejetada no
plano da órbita
("tidal")

Matéria ejetada dentro
de 20° (jato) chamada
de "prompt"

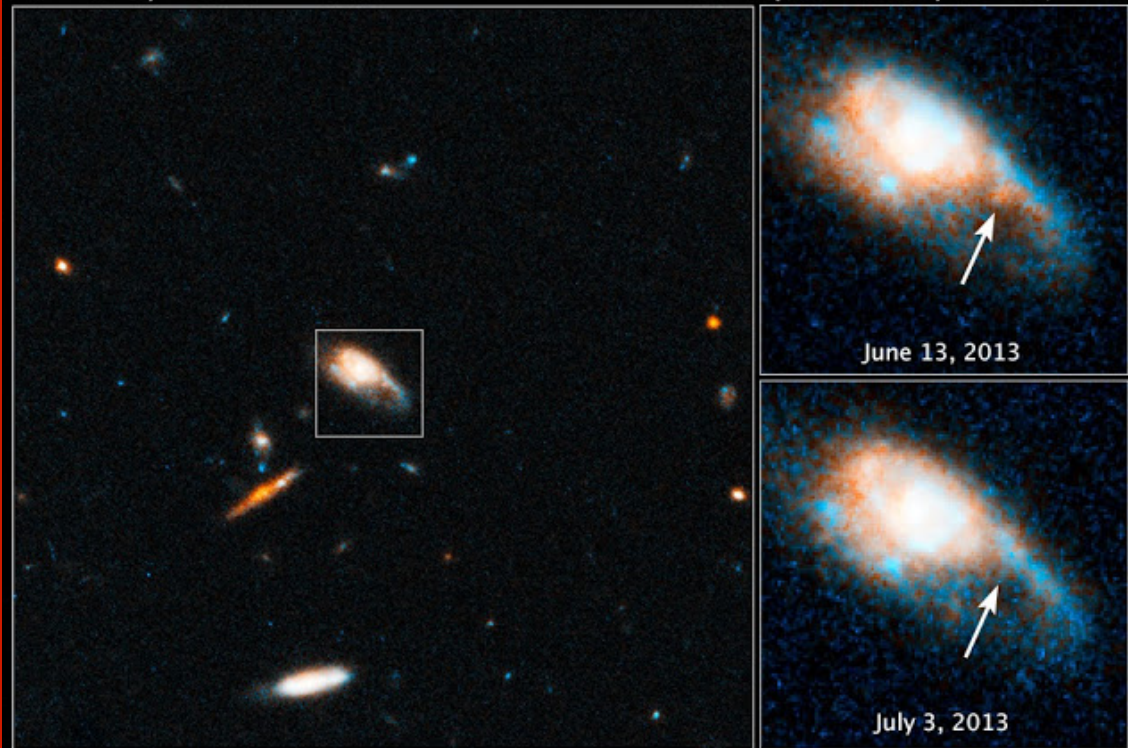
A fração n/p de cada componente é diferente, e a nucleossíntese também



**GW 170817 e sinais
e.m. coincidentes**

Gamma-ray Burst GRB 130603B

Hubble Space Telescope - ACS/WFC3



NASA and ESA

STScI-PRC13-29a

Kilonovae

NIR excess after a
Gamma-ray burst

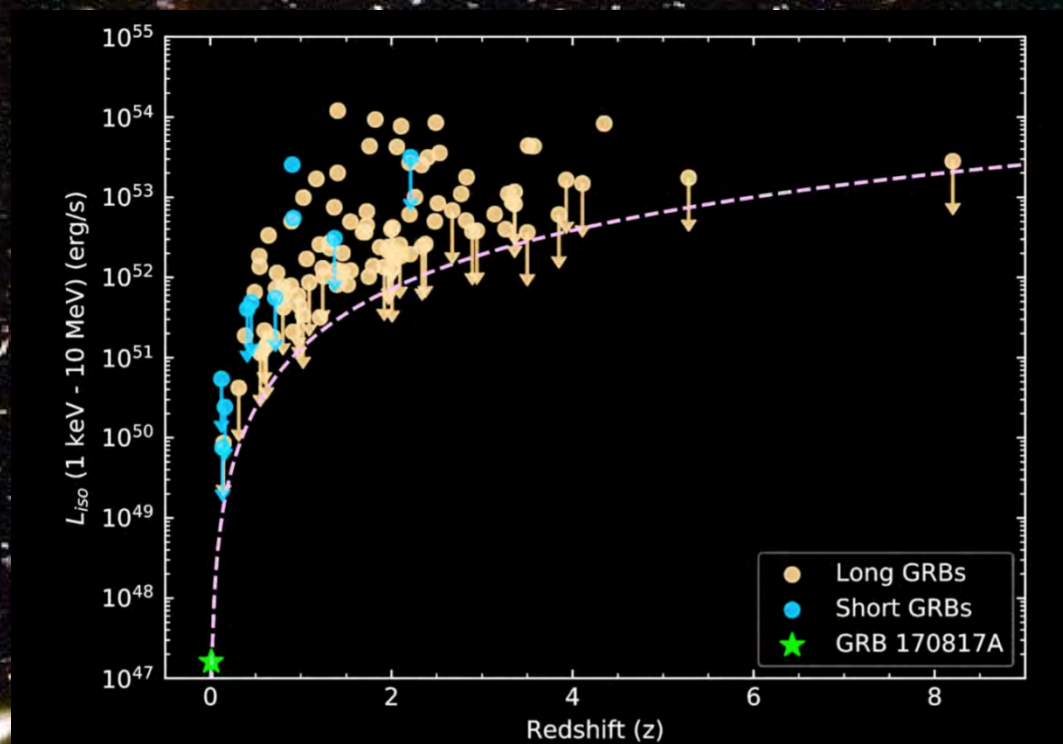
NASA Evidence Suggests Gold On Earth
Caused by Colliding Neutron Stars

NASA's Swift X-ray telescope satellite
detected a high-energy flash of gamma rays,
a "gamma ray burst" called GRB 130603B.

20 $M_{\oplus}$ of gold and 140 $M_{\oplus}$ platinum !!!



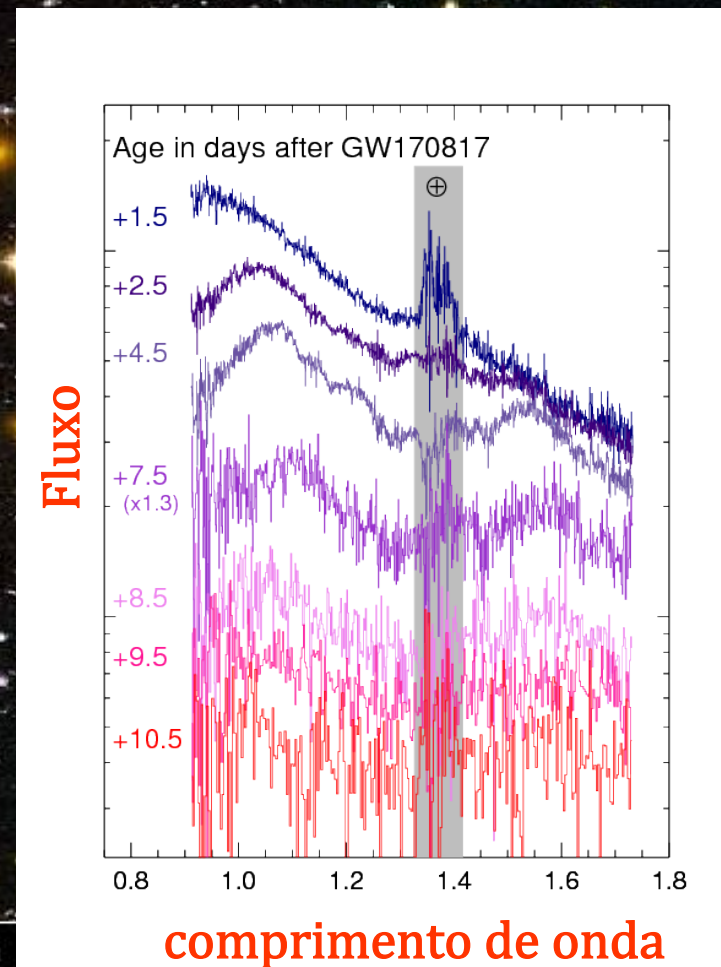
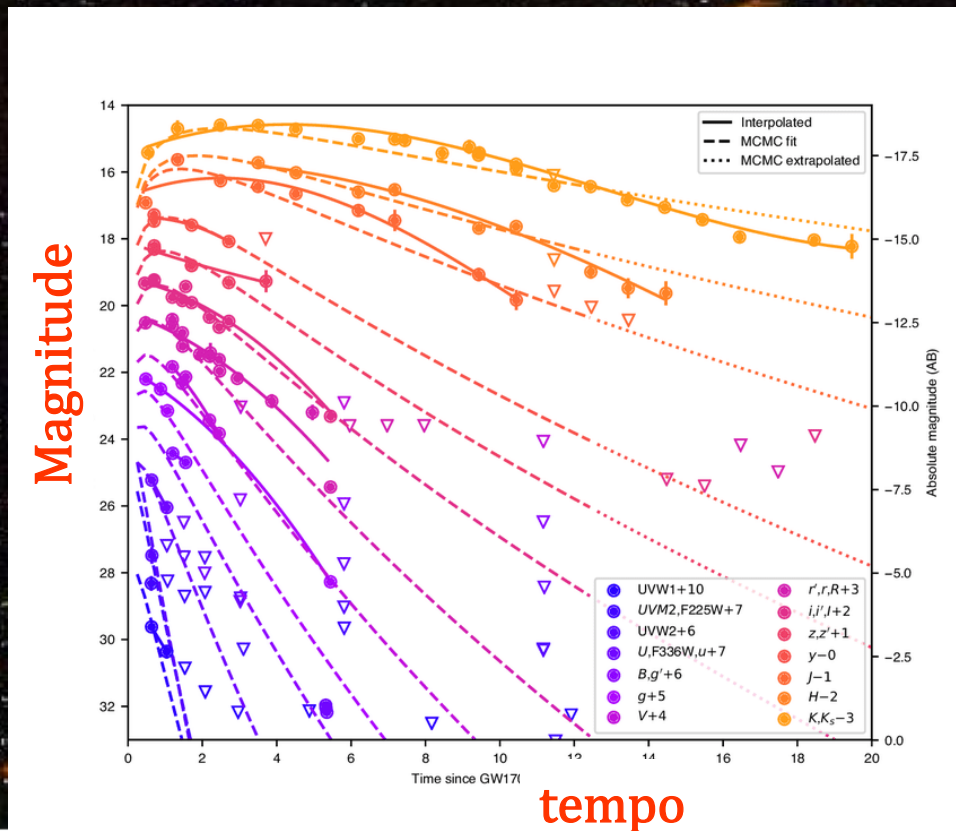
The GRB produced by the event GW170817 is subluminal !
(geometry ? Absorption by a surrounding cocoon ?)



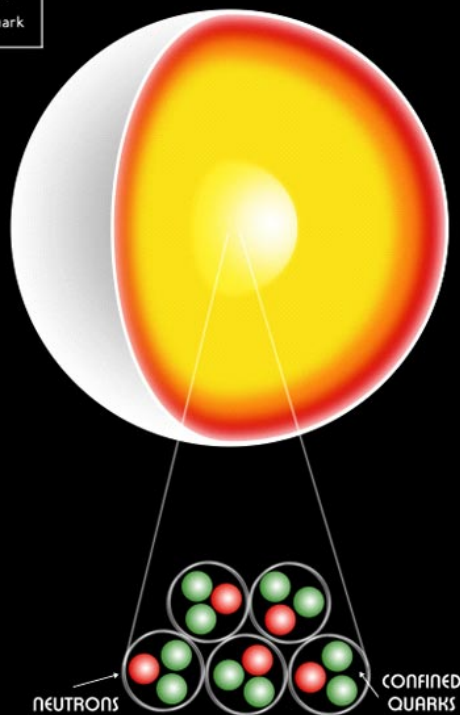
As evidências do espectro e a curva de luz do GW170817

Dois grupos de elementos produzidos pelo processo r, com $A < 140$ and $A > 140$ são o “best fit” para a curva de luz, cada um deles associado à componente “prompt” e “tidal”

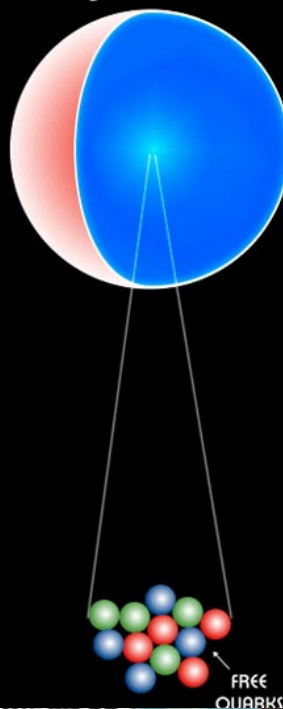
Máximos no espectro infravermelho associados aos lantanídeos



Neutron Star



Strange Quark Star



What if the merging “NS” are Strange Stars?

SQM stars have been studied for > 30 yr (Bodmer 1971, Terasawa 1979, Witten 1984...)

free vs. CFL SQM

pairing energy

$$\Omega_{CFL} = \Omega_{free} - \frac{3}{\pi^2} \Delta^2 \mu^2 + B =$$

$$= \frac{6}{\pi^2} \int_0^\nu [p - \mu] p^2 dp + \frac{3}{\pi^2} \int_0^\nu [(p^2 + m_s^2)^{1/2} - \mu] p^2 dp - \frac{3}{\pi^2} \Delta^2 \mu^2 + B.$$

$$= \frac{-3\mu^4 + 3m_s^2\mu^2}{4\pi^2} - \frac{1 - 12\log(m_s/2\mu)}{32\pi^2} m_s^4 - \frac{3}{\pi^2} \Delta^2 \mu^2 + B.$$



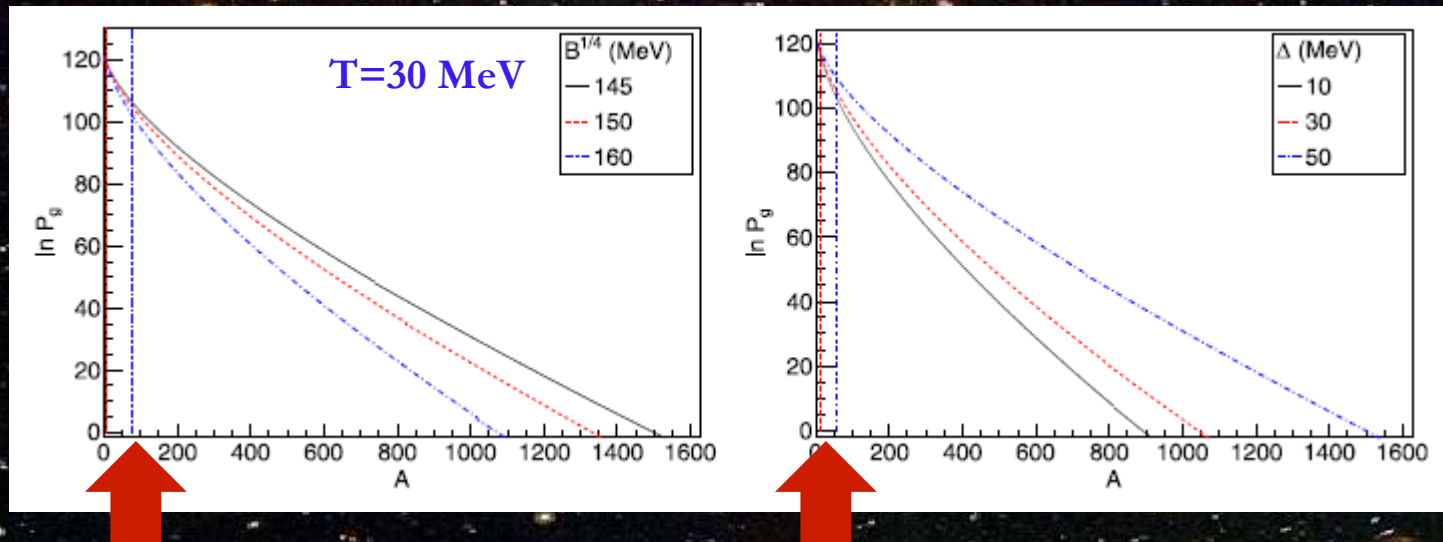
Statistical fragmentation of ejected SQM in “NS-NS” mergers

Why should *strange matter* fragment? Because it is a minimum of the E/A but not a minimum of free energy !

SQM evaporates into ordinary hadrons if temperature is high

The masss distribution of fragments is

$$\mathcal{P}_g(A) = \frac{\partial}{\partial \mu_A} p_g = \left(\frac{m_0 T}{2\pi} \right)^{3/2} A^{3/2} e^{[(\mu+W-bp_g)A - \sigma A^{2/3} - CA^{1/3}]/T}$$



$A_{\min}$ for stability for a given T

Almost all the ejected matter fragments into Λ s, later decaying into n and p

(by the way, this explains why there are no strangelet events in the AMS-02 experiment...)

Ejecta consists ultimately in p and n , but their relative abundance n/p is strongly dependent of what happens before weak interactions freezout because of degeneracy vs. expansion...

Fragmentation of bulk SQM happens at $T \sim 5\text{-}10\text{ MeV}$ and high density

Adiabatic expansion $TV^{\gamma-1} = \text{constant}$ hypothesis yields

$$T = T_0 \left(\frac{1}{1 + v/R_0 t} \right)$$

$\gamma = 4/3$ monoatomic relativistic gas

If degeneracy is ignored, before the freezout temperature, the ratio n/p evolves as

$$n_n/n_p \sim \exp \left[-\frac{(m_n - m_p)c^2}{kT} \right]$$

where the n p mass difference is $= 1.29\text{ MeV}$

The freezout condition (fixing the relative abundances) is

$$\eta < \frac{\dot{R}}{R} = \frac{v}{R_0 + vt}$$

or, using the standard expressions

$$\eta \sim \left(\frac{kT}{1\text{MeV}} \right)^5 s^{-1}$$

written as

$$kT_{\text{freezout}} = \left(\frac{v}{R_0 kT_0} \right)^{1/4}$$

After freezout, and up to $T \sim 1\text{MeV}$ some neutrons decay

$$\frac{n_n}{n_p}|_{T=1\text{MeV}} \sim \frac{n_n}{n_p}|_{T_{\text{freezeout}}} \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_n}\right)$$

But n/p does not change much because $\tau_n \gg \Delta t$

For different initial temperatures and expansion radii we found

v/c	T_i (MeV)	$T_{f\text{out}}$ (MeV)	$R_{f\text{out}}$ (km)	Δt (ms)	$(n_n/n_p)_{f\text{out}}$	$(n_n/n_p)_f$
0.1	5	4.2	24.0	2.53	0.73	0.73
0.1	10	3.5	57.1	4.76	0.69	0.69
0.3	5	*	20.0	0.89	0.77	0.77
0.3	10	4.6	43.4	1.74	0.76	0.76

Huge fractions (Big Bang values are $n/p \sim 0.15$). Matter keeps memory of its SQM origin...

As expected, it is dominated by Fe peak elements (Fowler 1957)

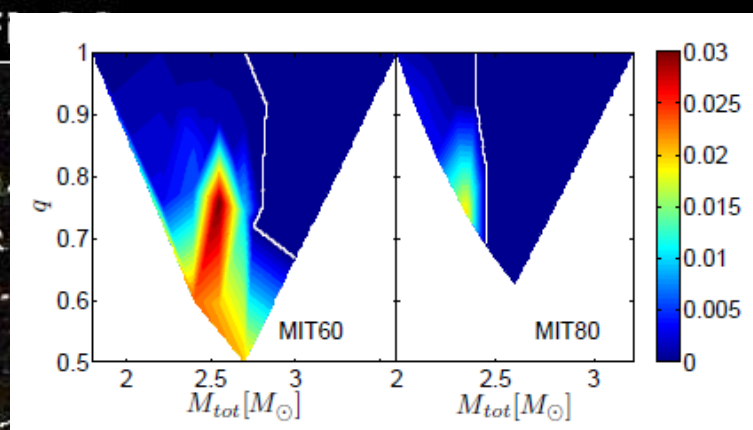
No lanthanides formed !!!!

 ^{32}P

**Decays in 14.3 days injecting 1.7 MeV
positrons into the opaque ejecta
(similar to SNIa with Ni->Co -> Fe)**

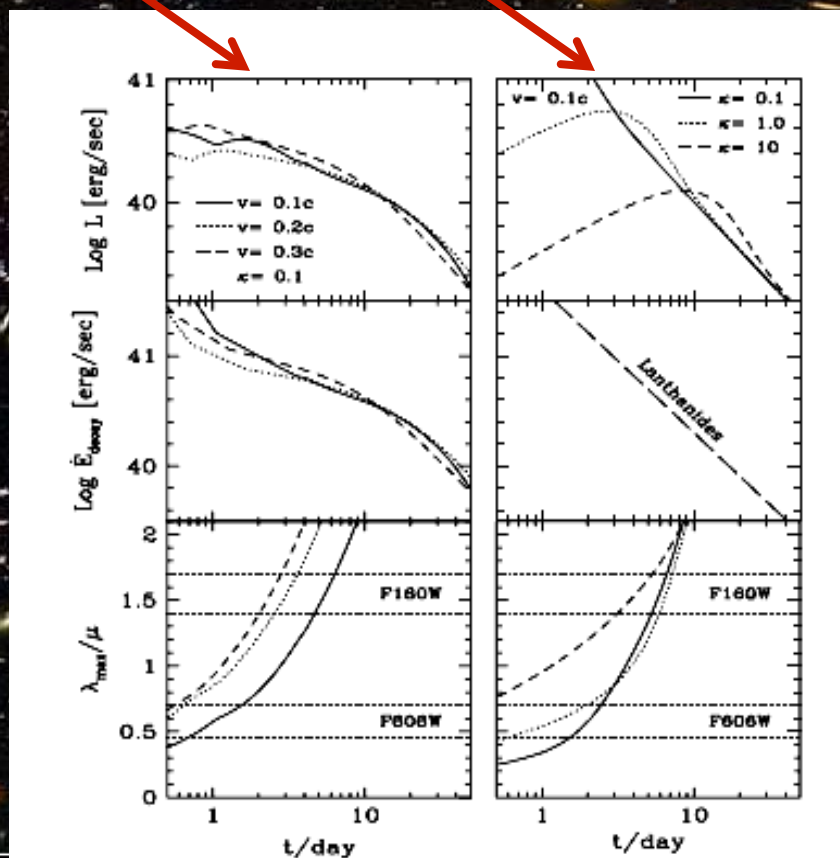
Light curves

$10^{-2} M_{\odot}$ ejected



Mergers of SS,
Bauswein et al. 2009)

Our calculations “standard NS”



Apparently the hypothesis
of equilibrium is too strong
There should be lanthanides
(and actinides)

A full non-equilibrium
picture is under construction

Duas NS voltam da morte para
completar a Tabela Periodica

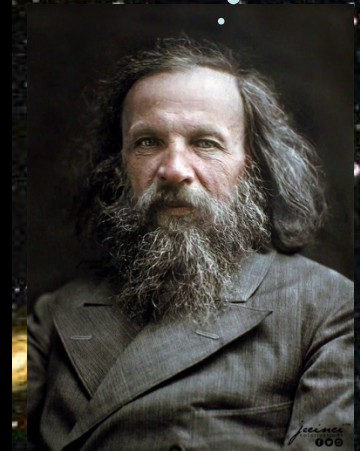


Síntese da formação da Tabela Periódica ($t > 2017$)

A origem dos elementos

1 H																	2 He		
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra																		
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U														

Joroschó !



Fusão de NS

Morte de estrelas do tipo solar

Explosão de estrelas massivas
Explosão de WD

Big Bang
Fissão pelos raios cósmicos

Conclusões

- Acreditamos que a compreensão da origem da Tabela Periódica pode ser atingida analisando integralmente o Big Bang + a evolução das estrelas
- O sucesso qualitativo e quantitativo destes estudos é grande, embora haverá novidades no futuro
- O “elo perdido” da nucleossíntese, o evento da colisão de duas estrelas de nêutrons foi identificado em 2017, e existe evidência para pensar que aí mesmo são produzidos a quase totalidade dos actínídeos e boa parte dos lantanídeos do Universo

Obrigado *tovarich* Dmitry por ter começado todo !

Não foi nada...

