



# Evolução da Complexidade no Universo

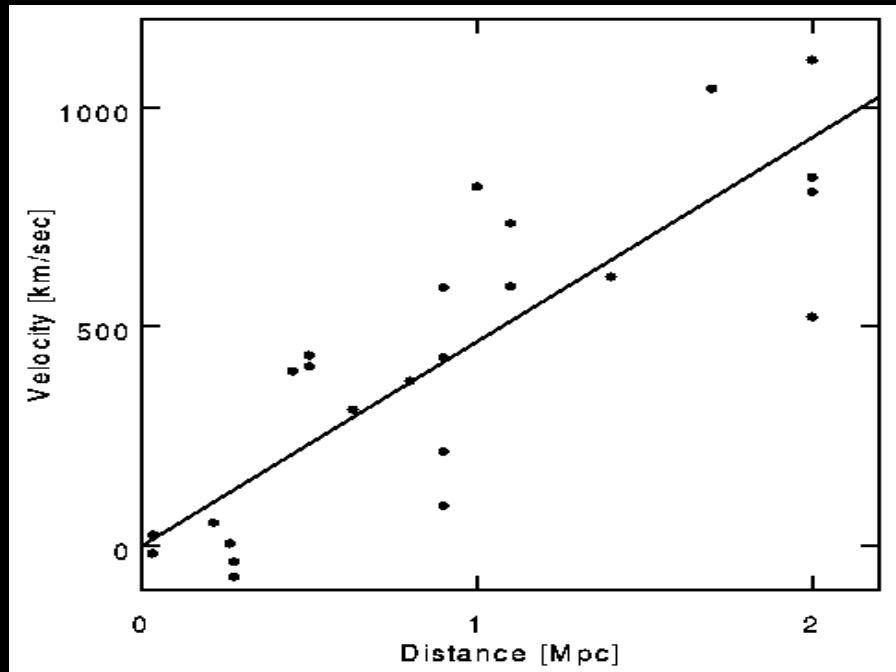


# Vida e complexidade

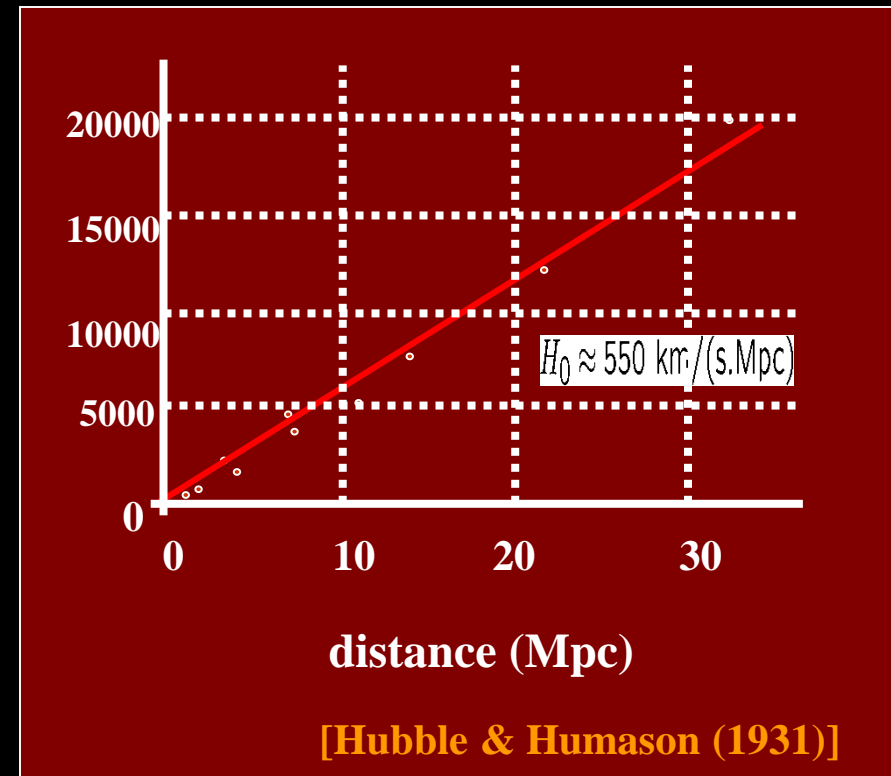
# A lei de Hubble.

desvio para o vermelho =  $\frac{H_0}{c} \times \text{dist\~{a}ncia}$

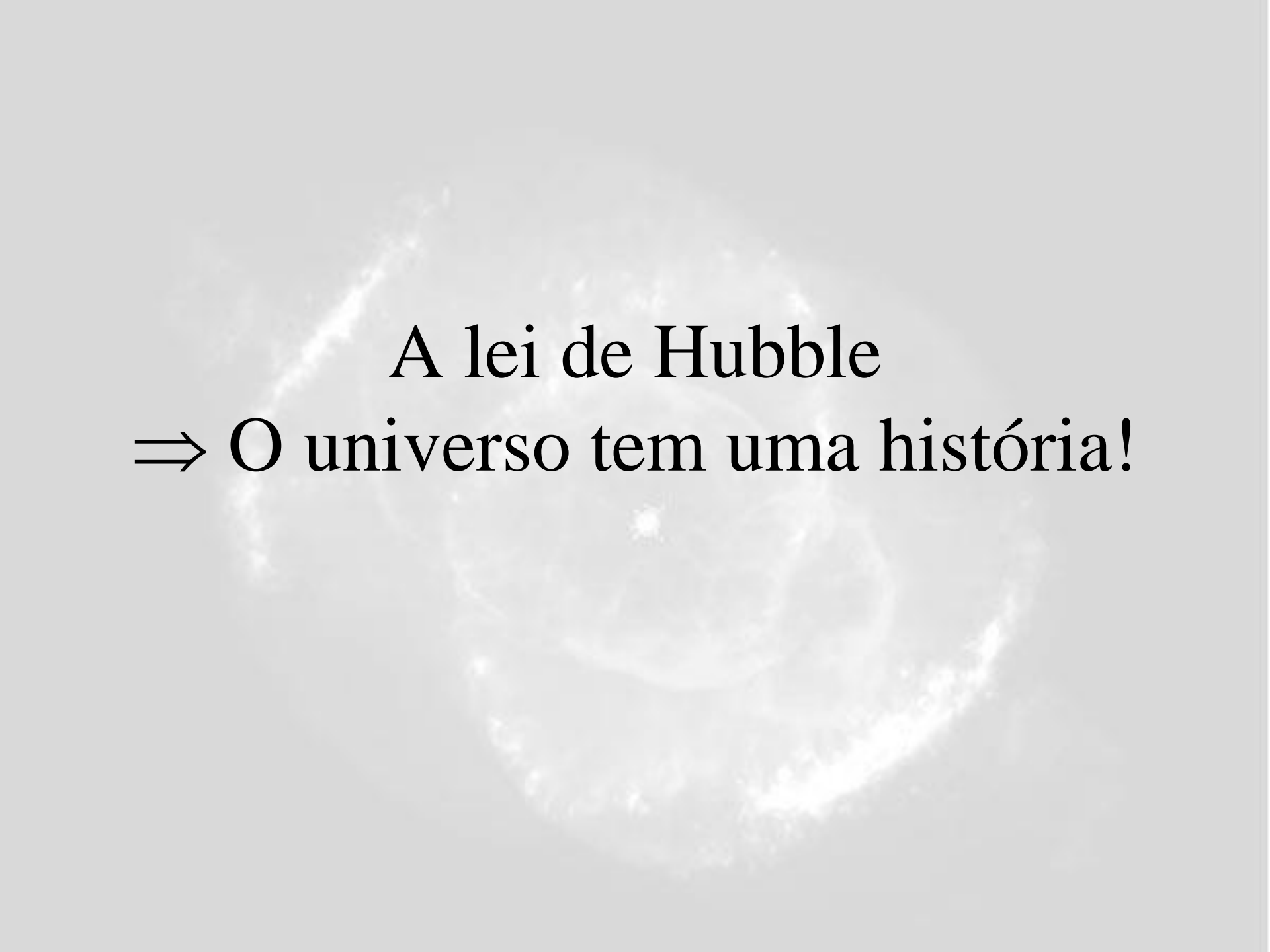
$c z = v = H_0 d \Rightarrow$  (lei de Hubble dos astr\u00f4nomos)



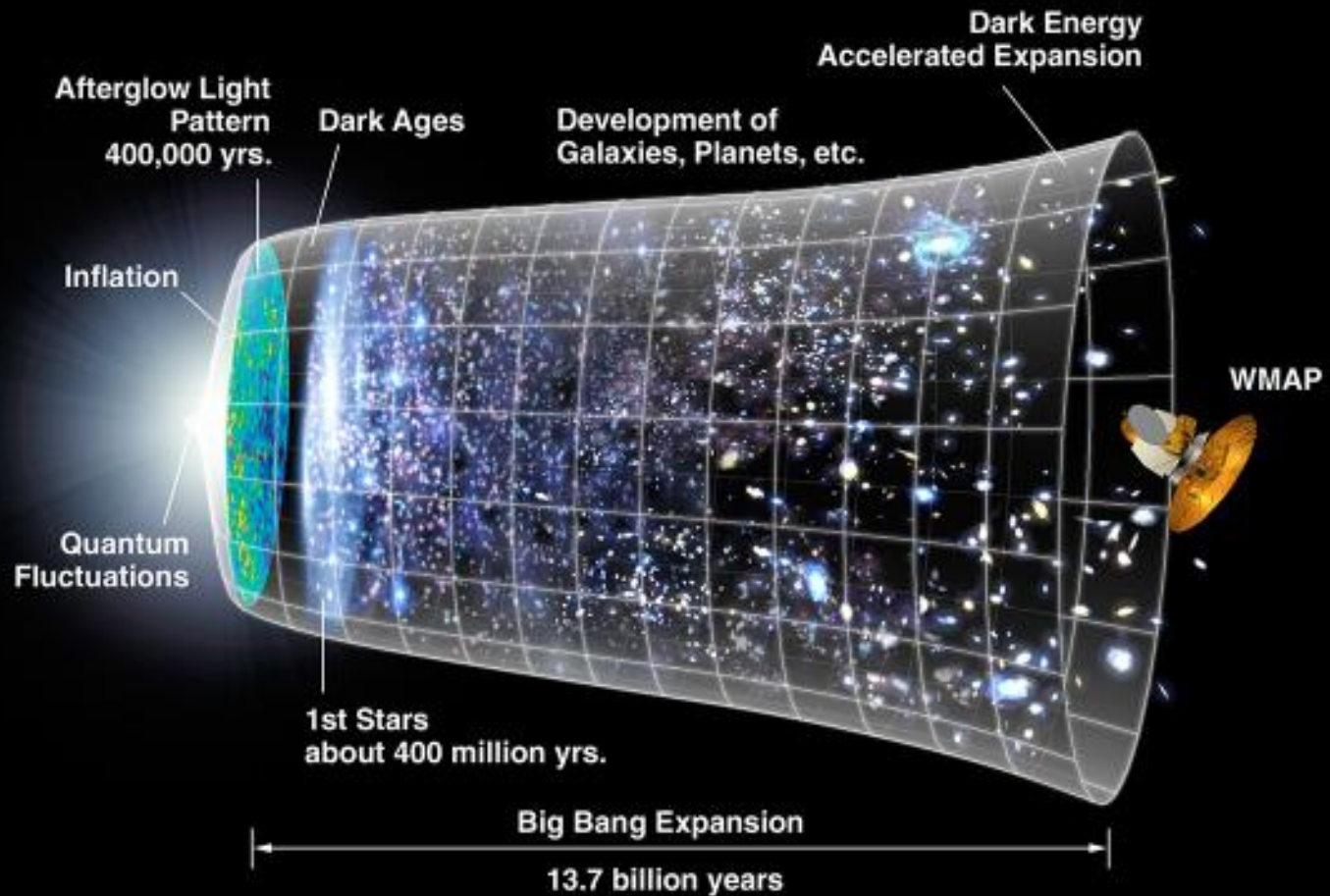
[Hubble (1929)]



[Hubble & Humason (1931)]



A lei de Hubble  
⇒ O universo tem uma história!



A história do universo é tal que surgem níveis cada vez maiores de complexidade.

*O aumento da complexidade  
permite o aparecimento da vida*

# História da Complexidade no Universo

- $10^{-43}$  s
  - $10^{-33}$  s
  - $10^{-4}$  s
  - 1 minuto
  - 300.000 anos
  - ~300 Manos
  - ~300 Manos
  - ~10 Ganos
1. Nasce o espaço (4 dimensões estendidas)
  2. Nasce a matéria (quarks e léptons)
  3. Nascem os prótons (quarks confinados)
  4. Nascem os núcleos ( $^4\text{He}$   $^2\text{H}$   $^3\text{He}$   $^7\text{Li}$ )
  5. Nascem os átomos (reunião elétrons-núcleos)
  6. Nascem os elementos pesados (C em diante)
  7. Nascem as heteromoléculas (OH, CO, H<sub>2</sub>O)
  8. Nasce a vida ( $\oplus$ : ao menos 3.85 Ganos atrás)

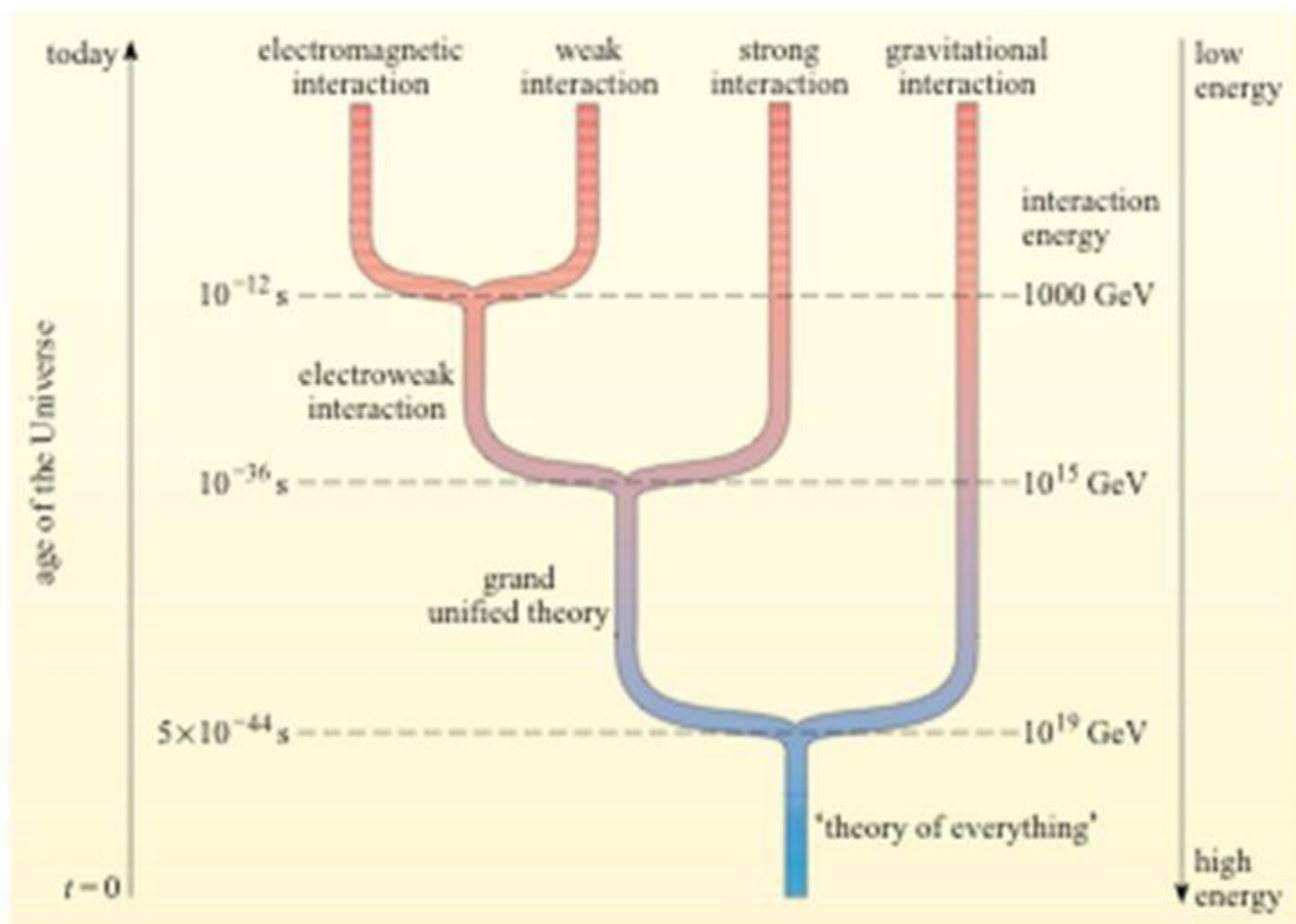
$$M_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 10^{19} \text{ GeV}$$

$$l_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 10^{-35} \text{ m}$$

$$t_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 10^{-43} \text{ s}$$



# Evolution of fundamental interactions with time



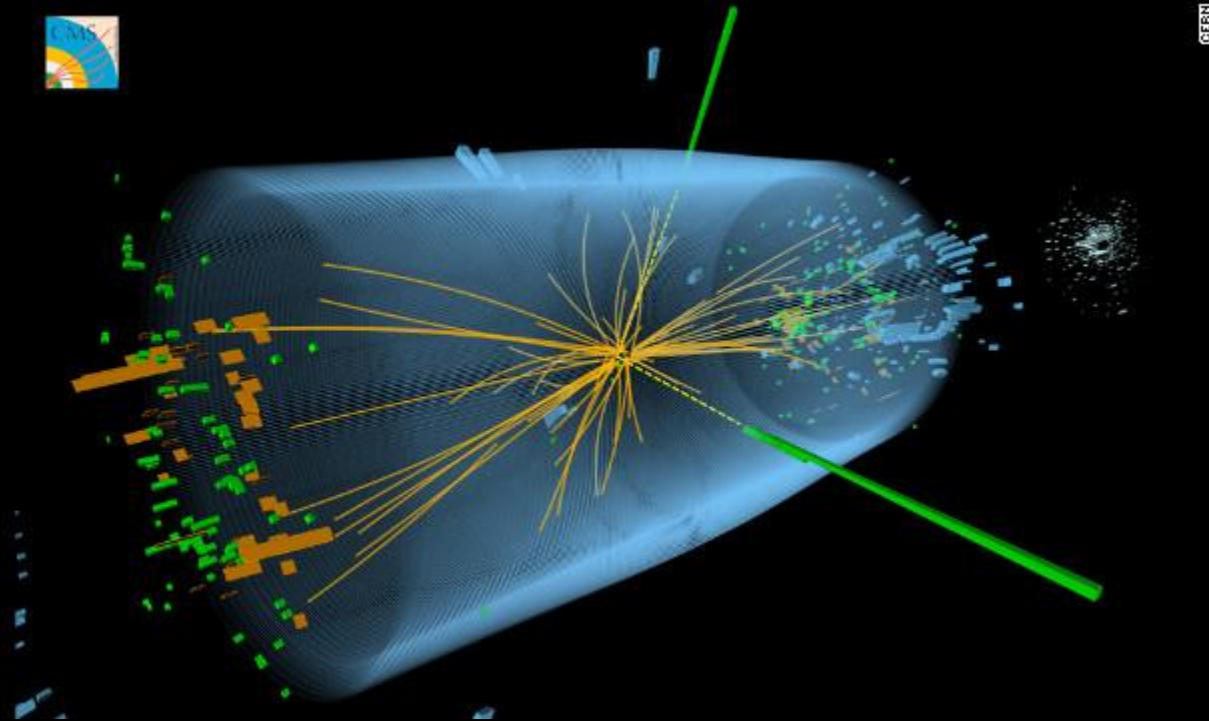
← inflation

	Fermions			Bosons	
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top	$\gamma$ photon	Force carriers
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom	$Z$ Z boson	
Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$W$ W boson	
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	$g$ gluon	
				Higgs boson	

Source: AAAS

# Scientists more certain that particle is Higgs boson

(CNN, March 14, 2013 -1919 GMT)



(CNN) -- Just in time for Albert Einstein's birthday Thursday, scientists delivered exciting news about how the universe works.

Last summer, physicists announced that they had identified a particle with characteristics of the elusive Higgs boson, the so-called "God particle." But, as often the case in science, they needed to do more research to be more certain.

On Thursday, scientists announced that the particle, detected at the Large Hadron Collider, the world's most powerful particle-smasher, looks even more like the Higgs boson.

The news came at the Moriond Conference in La Thuile, Italy, from ATLAS and Compact Muon Solenoid experiments.



## The Nobel Prize in Physics 2013

"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"



**François Englert**

**Prize share:** 1/2

**Born:** 6 November 1932,  
Etterbeek, Belgium

**Affiliation at the time of the award:** Université Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium



**Peter W. Higgs**

**Prize share:** 1/2

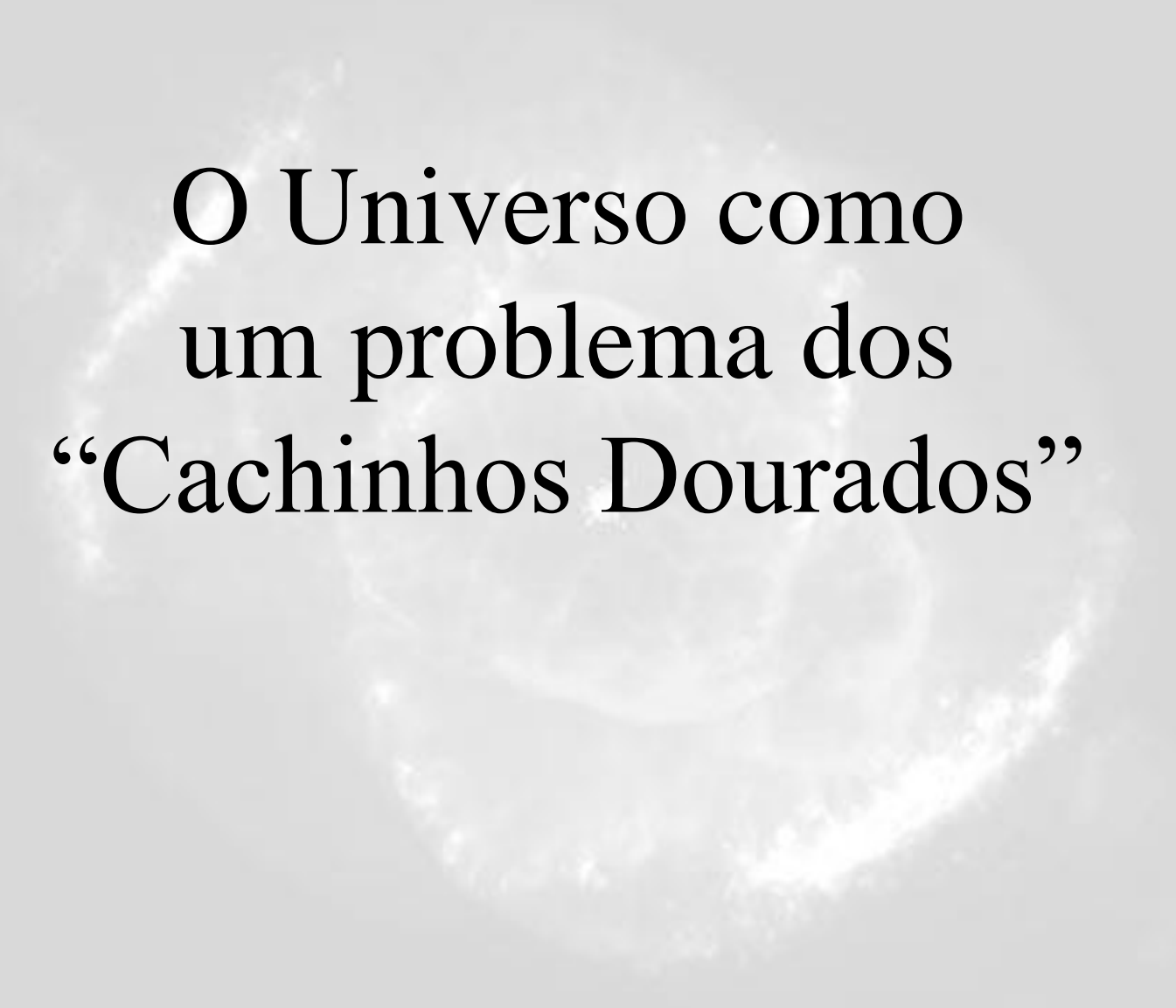
**Born:** 29 May 1929, Newcastle upon Tyne, United Kingdom

**Affiliation at the time of the award:** University of Edinburgh, Edinburgh, United Kingdom



# O Problema dos Cachinhos Dourados

ou, mais prosaicamente,  
*sintonia fina*



O Universo como  
um problema dos  
“Cachinhos Dourados”

# Um Universo Biofílico

Um universo hospitaleiro à vida – o que podemos chamar de um universo biofílico – tem que ser muito especial de diversos modos.

Os pré-requisitos para qualquer vida – **estrelas de vida longa, uma tabela periódica de elementos com química complexa etc.** – são sensíveis às leis físicas e não poderiam ter emergido de um Big Bang com uma receita que fosse mesmo ligeiramente diferente.

Martin Rees

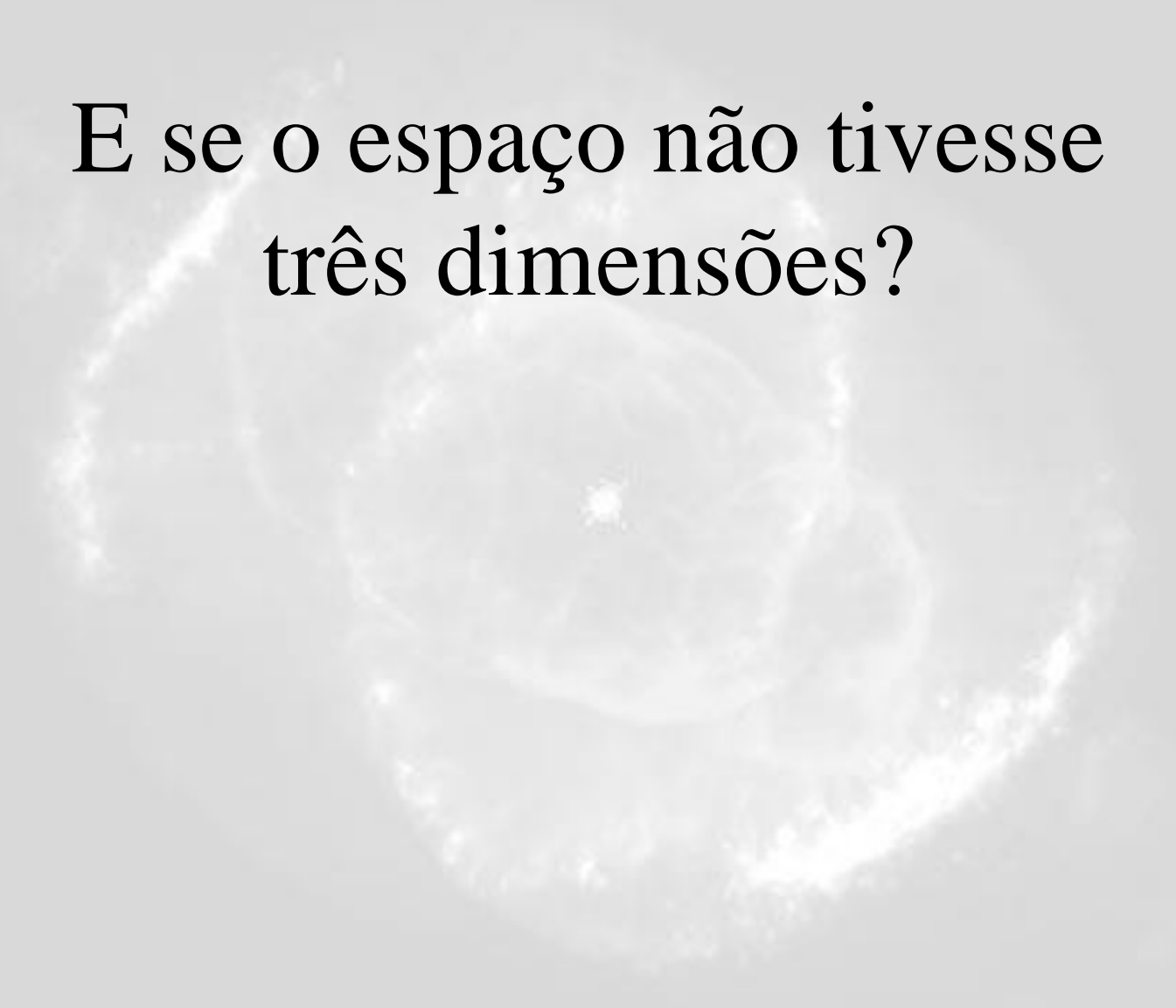
*Our Cosmic Habitat*

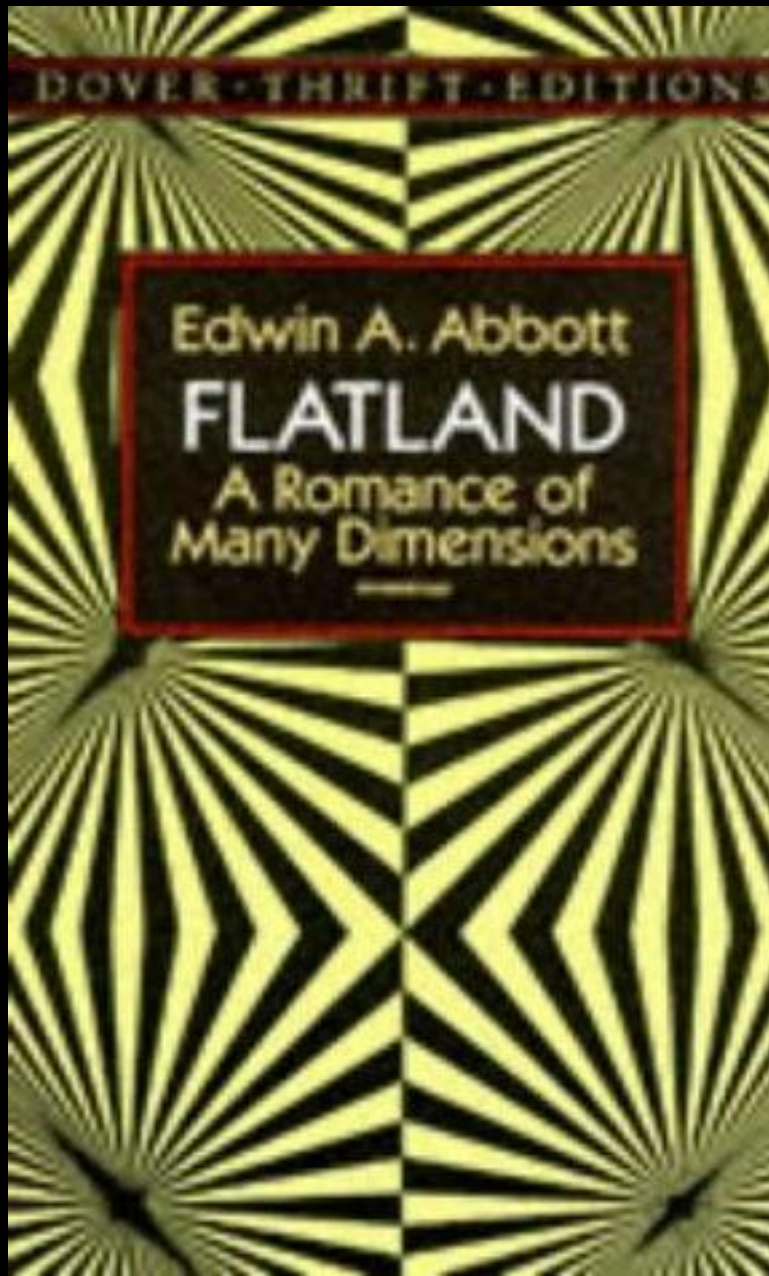
# APENAS SEIS NÚMEROS

- $N = 10^{36}$ , a razão da força eletromagnética para a força gravitacional entre dois prótons.
- $\varepsilon = 0.007$ , medida da intensidade da energia de ligação entre os nêutrons e prótons dentro do núcleo atômico.
- $\Omega = 0.3$ , quantidade de matéria no Universo
- $\lambda = 0.7$ , quantidade de energia em vácuo no Universo
- $Q = 1/100\ 000$ , medida da profundidade média das flutuações de densidade do Universo
- $D = 3$ , número de dimensões do espaço



E se o espaço não tivesse  
três dimensões?



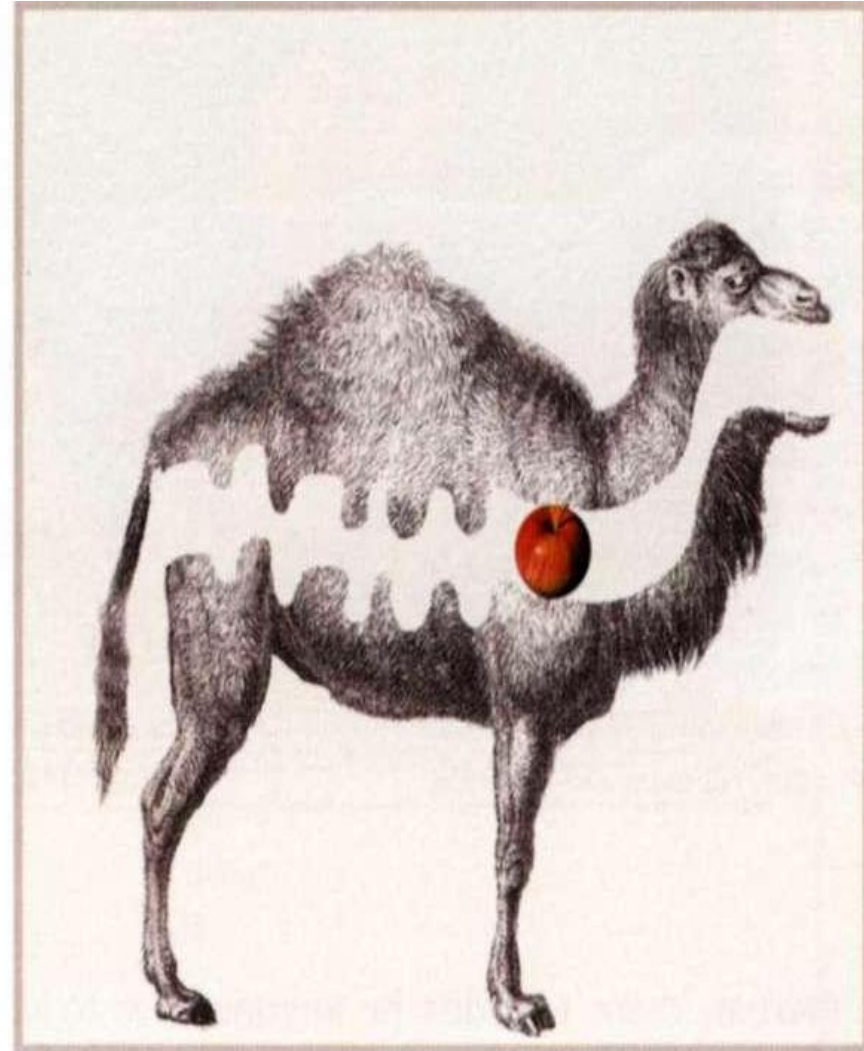
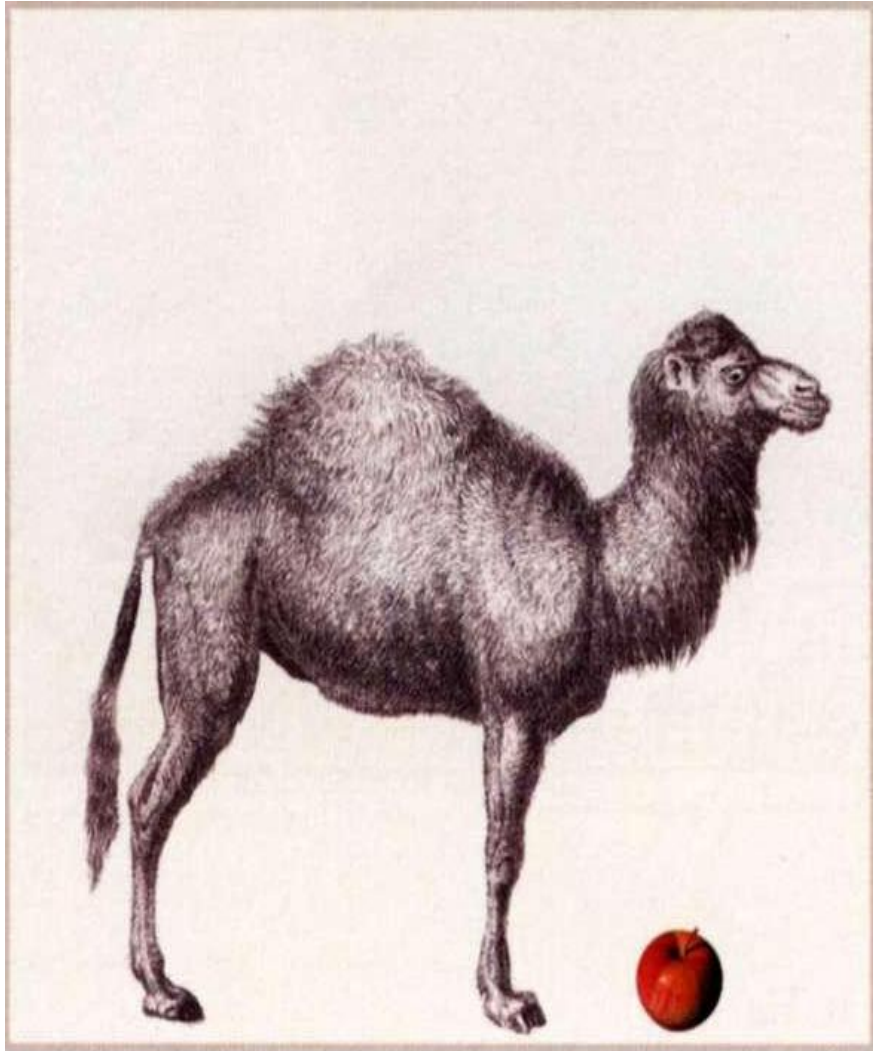


**Ficção matemática,  
1884**

Autor: padre anglicano

(Círculos, mulheres...)

Animais bidimensionais  
⇒ sistema digestivo disjunto

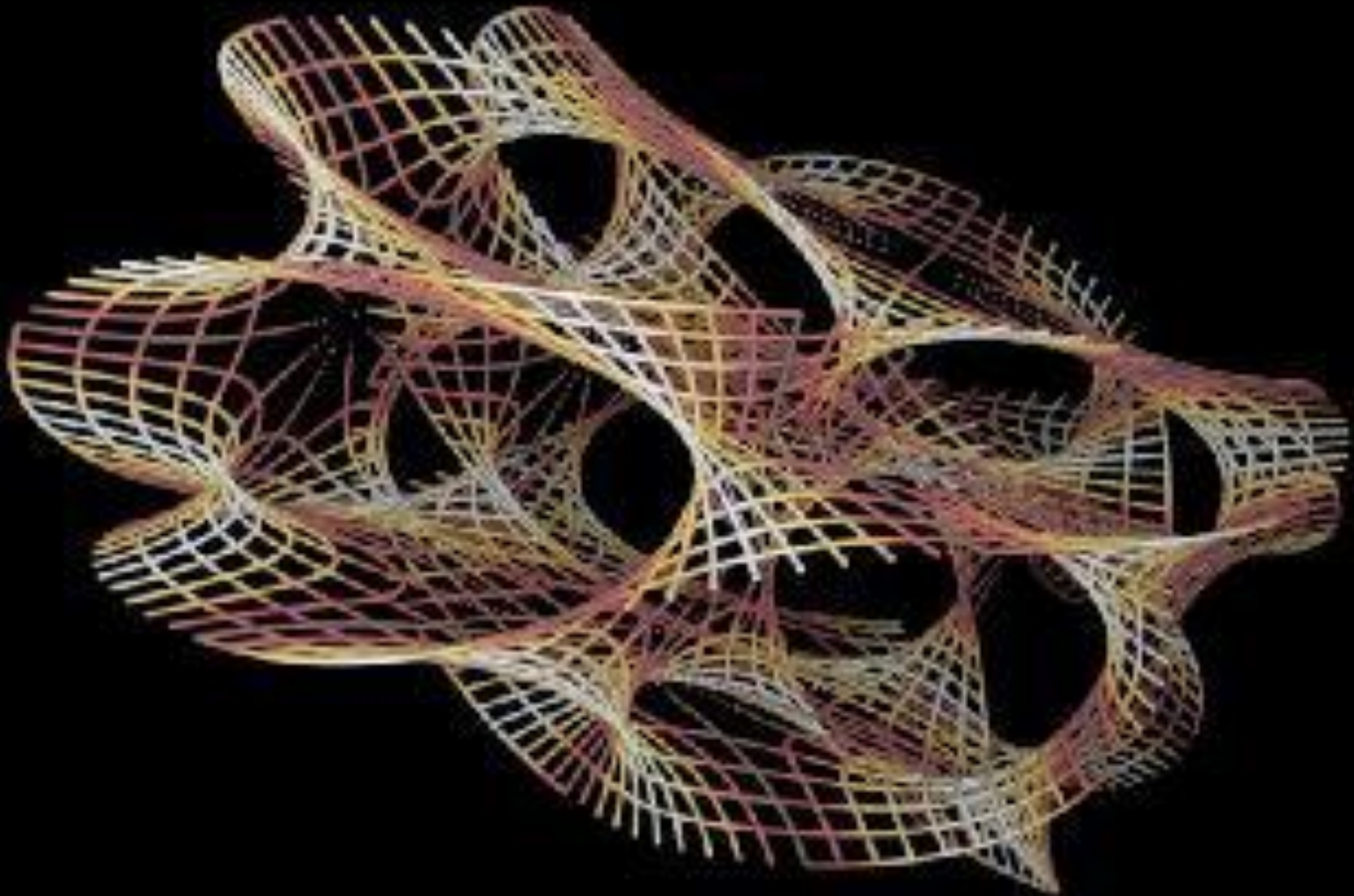


# Quinta Dimensão

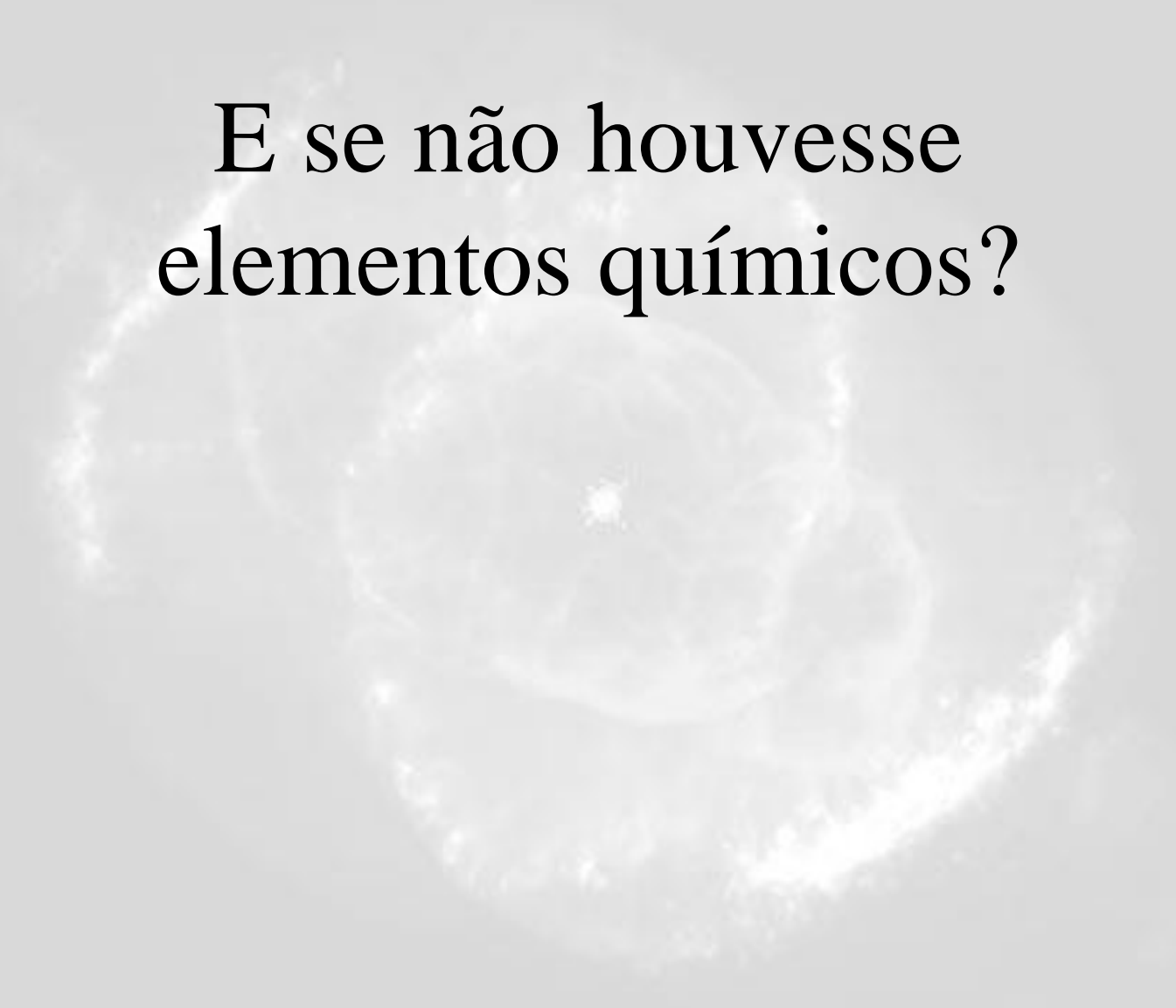
⇒ instabilidade de sistemas planetários e átomos



# A Origem do Espaço...



E se não houvesse  
elementos químicos?



# Um Universo Biofílico

Um universo hospitaleiro à vida – o que podemos chamar de um universo biofílico – tem que ser muito especial de diversos modos.

Os pré-requisitos para qualquer vida – estrelas de vida longa, **uma tabela periódica de elementos com química complexa** etc. – são sensíveis às leis físicas e não poderiam ter emergido de um Big Bang com uma receita que fosse mesmo ligeiramente diferente.

Martin Rees

*Our Cosmic Habitat*





# The Astronomer's Periodic Table

(Ben McCall)



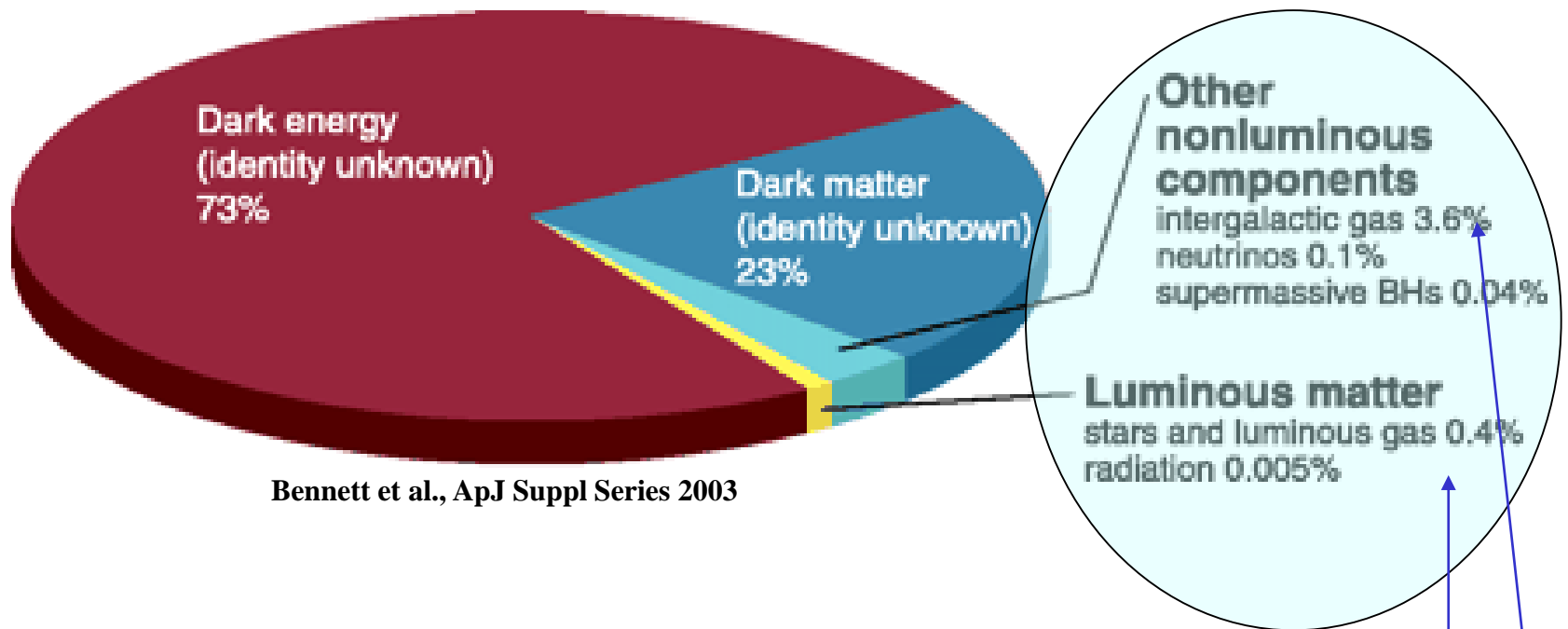
◦  
Mg

◦  
Fe

◻ ◻ ◻ ◻  
C N O Ne

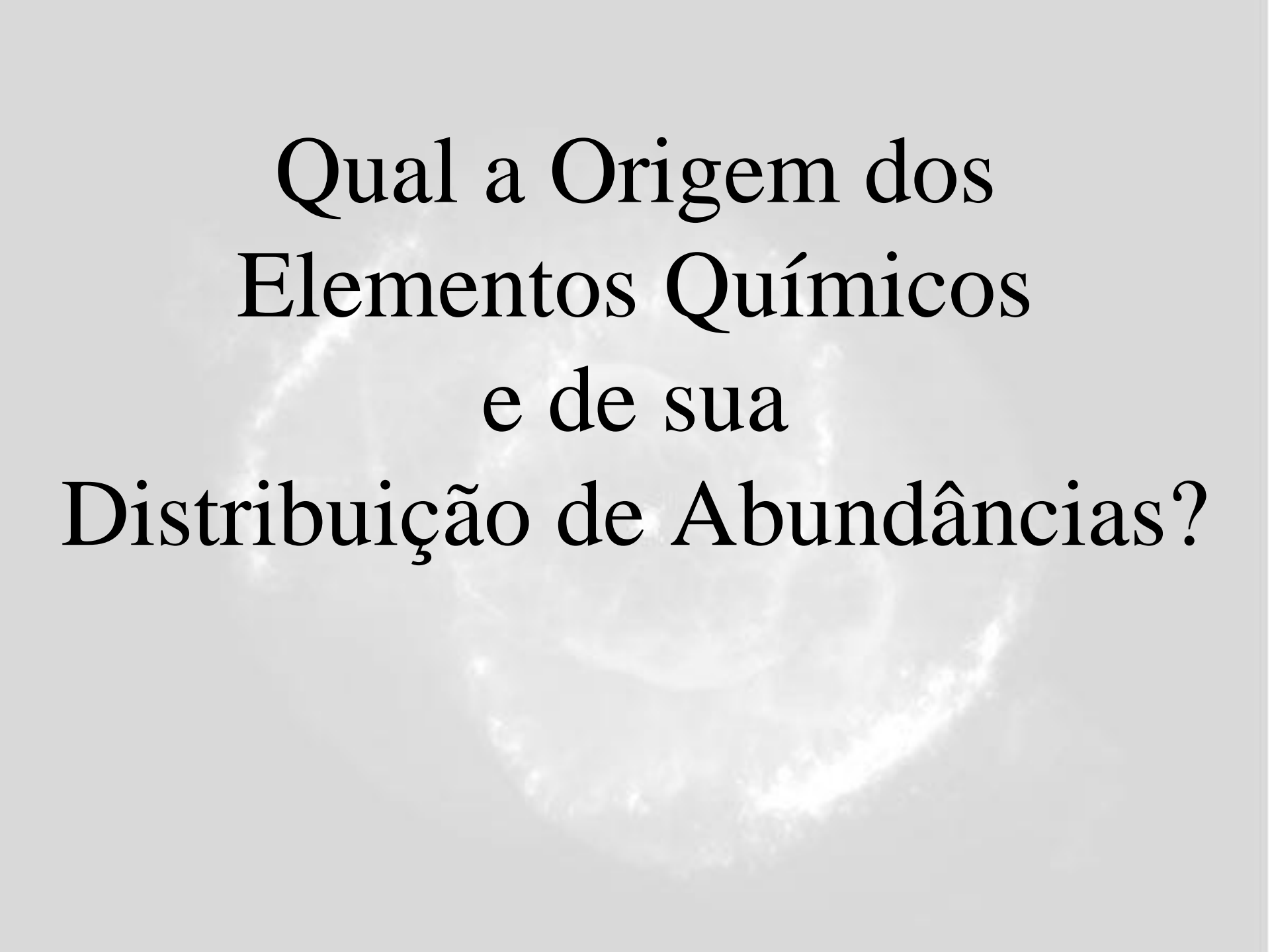
· · ·  
Si S Ar

# Lembrando o lugar da vida no universo ...somos minoria

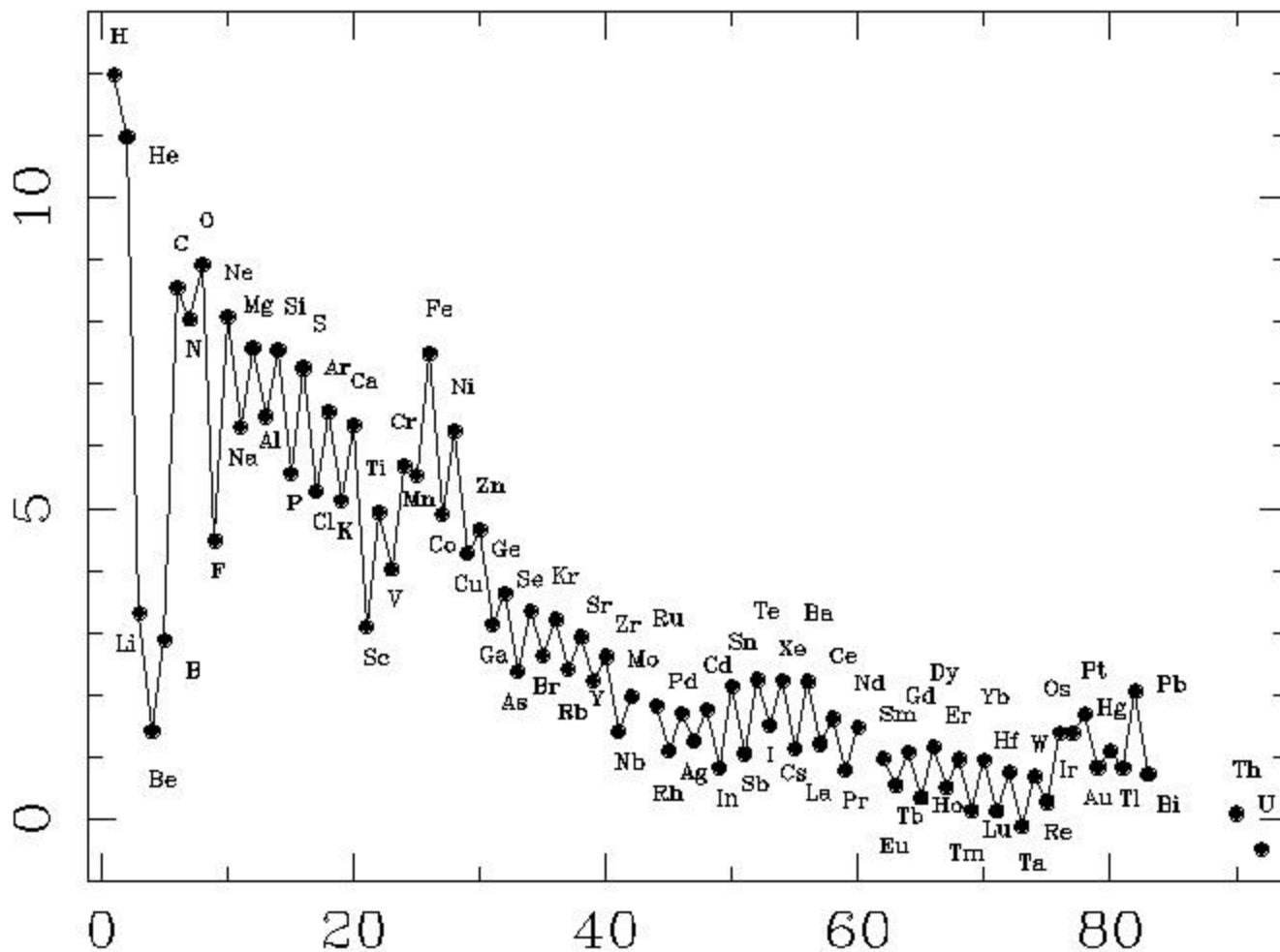


$$\Omega_b = 0.04 \Omega_T$$

**Life building blocks come from these components...**

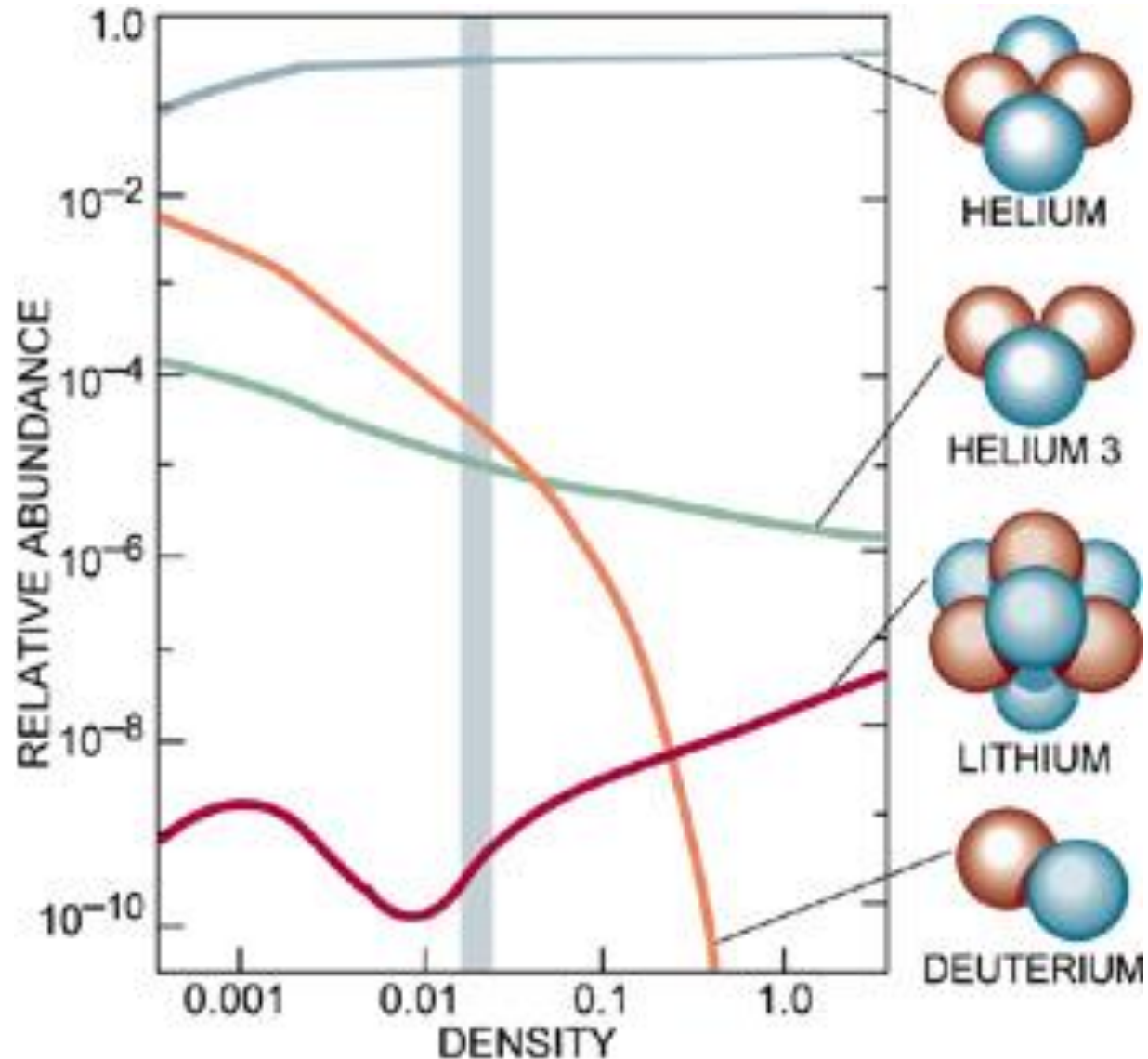


Qual a Origem dos  
Elementos Químicos  
e de sua  
Distribuição de Abundâncias?



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,<sup>1</sup> 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,<sup>1</sup> 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  $\beta$ -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  $\sigma_i$  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,<sup>2</sup> 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 abundances<sup>3</sup> it is necessary to assume the integral of  $\rho_0 dt$  during the building-up period is equal to  $5 \times 10^4$  g sec./cm<sup>3</sup>.

On the other hand, according to the relativistic theory of the expanding universe<sup>4</sup> the density dependence on time is given by  $\rho \leq 10^4/t^3$ . 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:

$$\int_{t_0}^{\infty} (10^4/t^3) dt \leq 5 \times 10^4, \quad (2)$$

which gives us  $t_0 \geq 20$  sec. and  $\rho_0 \leq 2.5 \times 10^4$  g sec./cm<sup>3</sup>. 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  $2.5 \times 10^4$  g sec./cm<sup>3</sup> which can possibly be understood if we

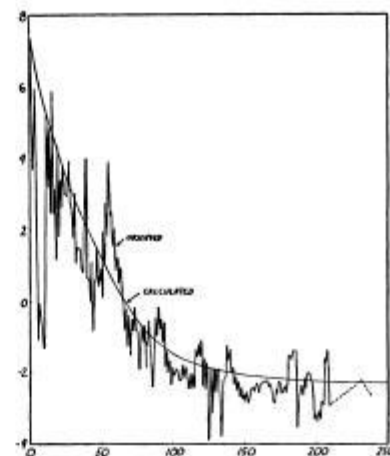
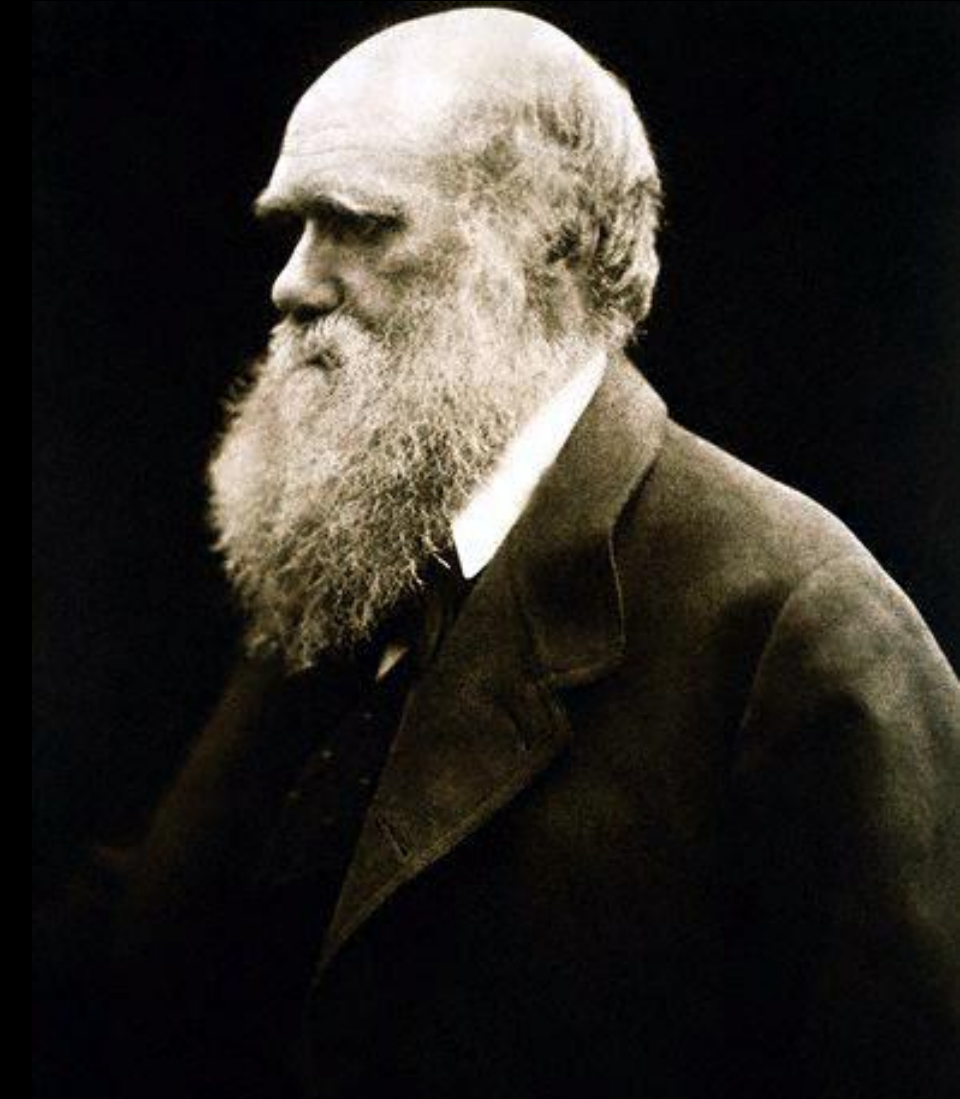
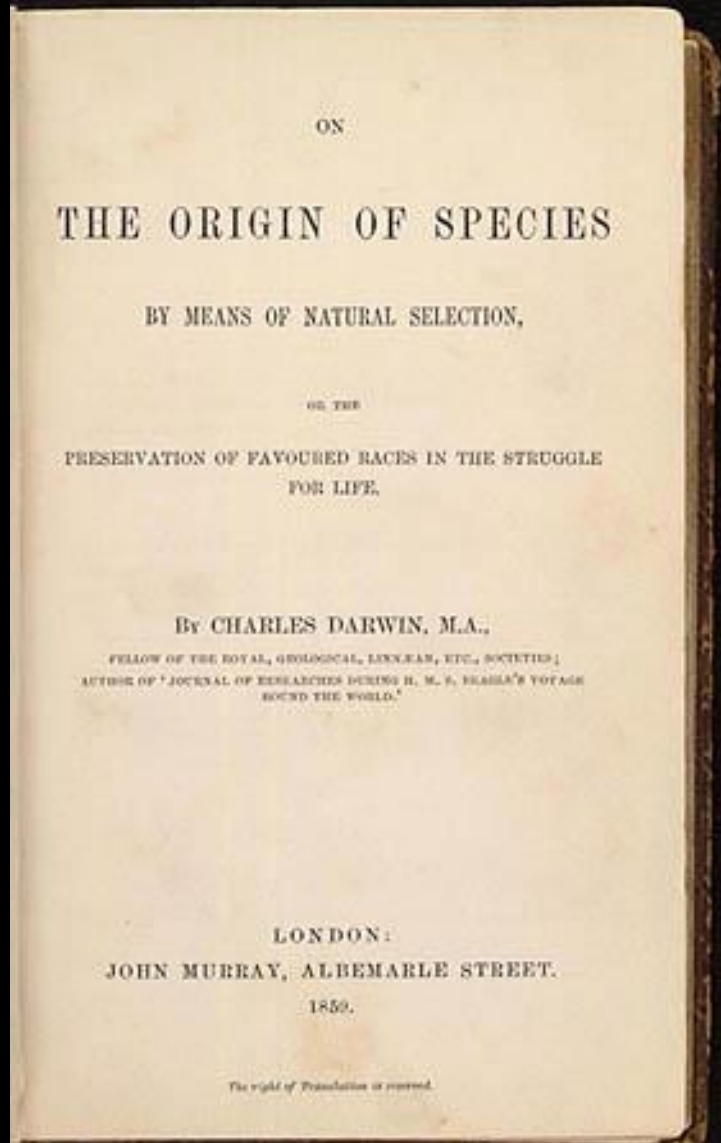


FIG. 1.  
Log of relative abundance  
Atomic weight

# “Origem das Espécies” (1859)

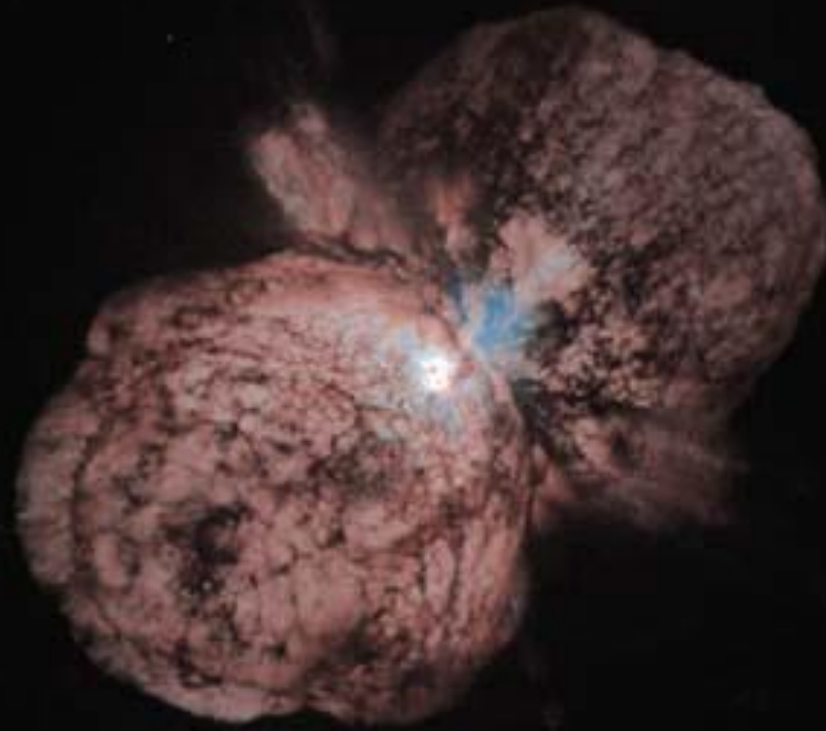


# Além da Nucleossíntese Primordial

- 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



# B<sup>2</sup>FH 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)



X George Gamow (1904-1968)

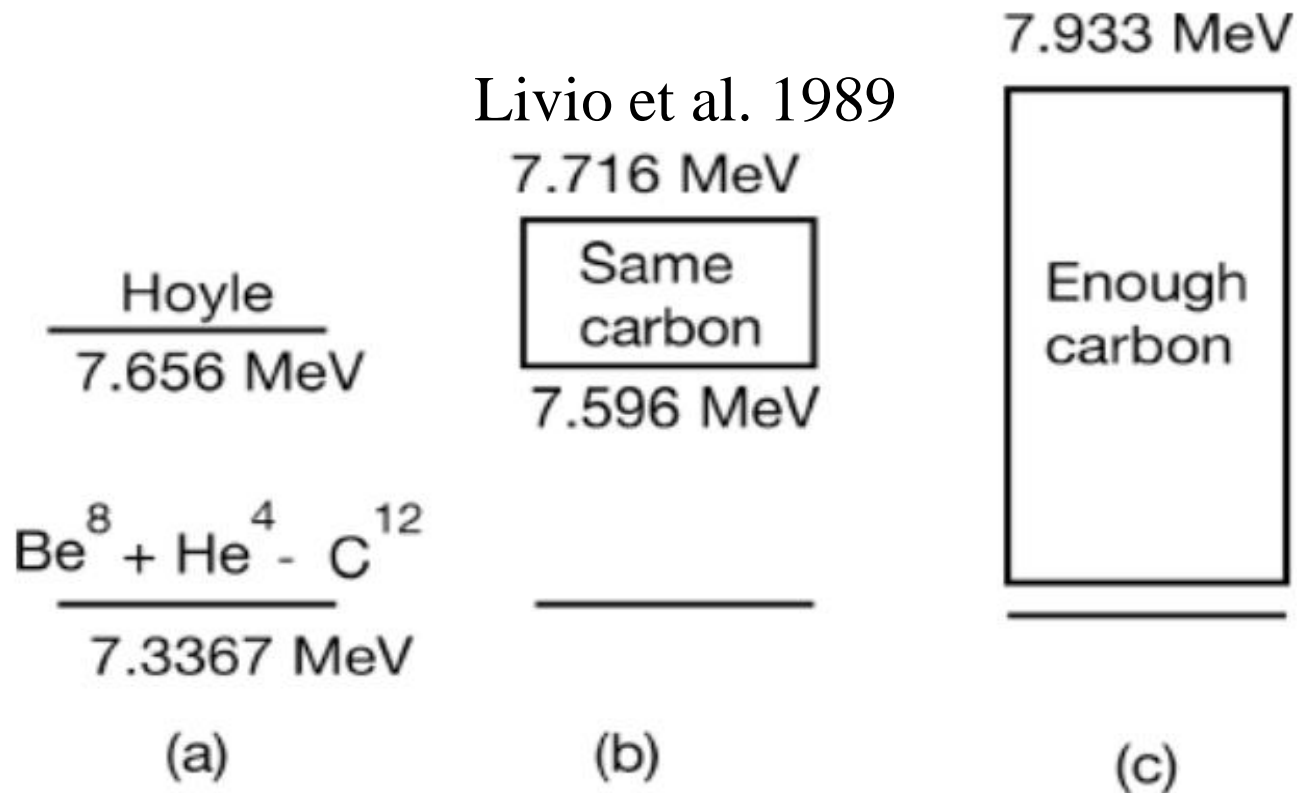


Fig. 1 (a) energy levels of carbon showing the, and the excited state predicted by Hoyle; (b) the allowed range of the excited state that would yield the same amount of carbon, (c) the range of energy for an excited state that would produce carbon adequate for life.

# The anthropic significance of the existence of an excited state of $^{12}\text{C}$

M. Livio<sup>1</sup>, D. Hollowell<sup>1</sup>, A. Weiss<sup>1,2</sup> & J. W. Truran<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Technion, Israel Institute of Technology, 32000 Haifa, Israel  
<sup>2</sup>Department of Astronomy, University of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois 61801, USA  
<sup>3</sup>Max-Planck-Institut für Astrophysik, D-8046 Garching, FRG

Were it not for the presence of an excited state of  $^{12}\text{C}$  at 7.6 MeV, at the endpoint of the triple-alpha reaction, it would be difficult for stars to manufacture carbon and heavier elements. Calculations using modified triple-alpha rates test the sensitivity of stellar nucleosynthesis to the exact position of this excited state, and allow an empirical assessment of its importance in the anthropic principle in cosmology.

THERE has been much discussion of the 'coincidences' associated with the nuclear resonance levels of carbon and oxygen, which are essential for biological evolution, in relation to the anthropic principle<sup>1</sup>. The significance of such discussions lies in the fact that they deal with physical quantities within the realm of experimentally verifiable physics (rather than, say, with the yet uncertain physics of the early Universe). In particular, considerable attention has been focused on the  $0^+$  excited nuclear state of  $^{12}\text{C}$ , at 7.644 MeV, which lies just above the energy of  $^8\text{Be}$  plus an  $\alpha$ -particle. In a truly remarkable prediction, Hoyle concluded from the observed cosmic-abundance ratios of  $^{16}\text{O} : ^{12}\text{C} : ^4\text{He}$  that such a resonant level should exist. This has been confirmed subsequently by experiment<sup>2,4</sup>.

As is consistent with the anthropic principle<sup>1,5</sup>, the energy of the resonant level of  $^{12}\text{C}$  is required to have the value it does, to ensure carbon production and the consequent development of carbon-based life. In a broader context, the location of the resonant level of carbon is the middle of three 'coincidences'. The first of these is the fact that the decay lifetime of  $^8\text{Be}$  is about four orders of magnitude longer than the time required for two  $\alpha$ -particles to scatter past one another in a non-resonant manner. This ensures the build-up of a small concentration of  $^8\text{Be}$ , which can come into equilibrium<sup>6</sup>, thus allowing its coexistence with  $^4\text{He}$ . The third 'coincidence' is the fact that the energy level of  $^{16}\text{O}$  at 7.1187 MeV is non-resonant, being below the combined energy of  $^{12}\text{C} + \alpha$  (at 7.1616 MeV). This ensures that a significant fraction of the  $^{12}\text{C}$  created will not be destroyed by  $\alpha$ -particle capture.

In this exploratory work, we examine the question of how hypothetical changes in the location of the carbon  $0^+$  nuclear level might affect nucleosynthesis, carbon production, and its mixing into the interstellar medium (ISM). We note that a change in the nuclear energy levels should really be a consequence of changes in strengths of the fundamental interactions (strong, electromagnetic and so on). Such fundamental changes would affect not only the  $0^+$  level of  $^{12}\text{C}$  but also many other nuclear energy levels. Indeed, these changes might result in a completely different structure and evolution of our Universe, and hence the incorporation of all of these changes is both beyond the capability of present-day theories of nuclear physics and certainly beyond the scope of this paper. We therefore limit ourselves to considerations of the anthropic argument that are related to changes in carbon production resulting from changes in the location of the 7.644-MeV level of  $^{12}\text{C}$ . Calculations have been performed both for core triple-alpha burning and for shell

helium burning in a thermally pulsing, asymptotic-giant-branch (AGB) star.

## Core He burning in massive stars

One possible site of carbon production in stellar interiors is the core, and later the adjoining layers, of massive stars. Although in later phases of the evolution of stellar cores most of the products of helium burning will be processed to even heavier nuclei, there always remains carbon- and oxygen-rich matter that will be returned to the interstellar medium in the final supernova explosion. At the present age of the Galaxy, supernovae are probably not the main source of carbon production; rather, carbon production is expected to occur in thermal pulses in the shells of AGB stars. However, in the very early stages of galactic history, they were the only source, because less massive stars had not yet evolved far enough to return carbon to the ISM. It seems most appropriate, in the context of the anthropic principle, to investigate all possible sites of carbon production.

We have evolved a  $20-M_{\odot}$  star through the completion of core helium burning, using a modified  $0^+$  level of  $^{12}\text{C}$ , to identify the effects both on the amount of carbon produced and on the evolution. We evolve essentially the same model star as was considered by Truran and Weiss<sup>7</sup> in the context of supernova 1987A, using the same input physics and evolution code as described therein.

The only significant difference from the calculation of ref. 7 is the treatment of the triple-alpha process. In the code, the formula for the energy generation rate by this process is<sup>8</sup>

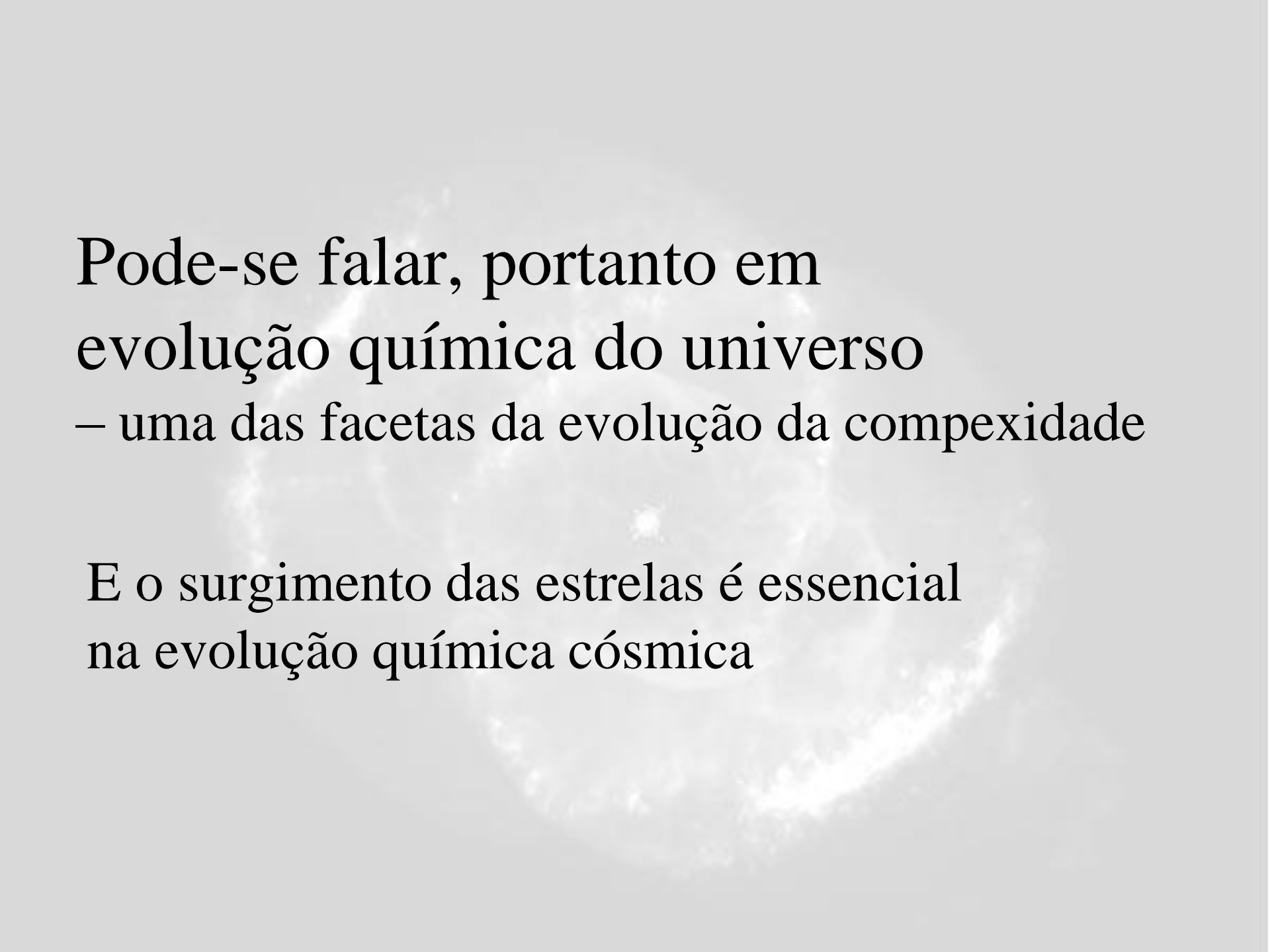
$$\epsilon_{3\alpha} = \rho^2 Y^3 T_9^{-3} \exp(26.68 - 42.94/T_9) + \rho^2 Y^3 T_9^{-3} \exp(29.90 - 274.33/T_9) \quad (1)$$

where the first term arises from the 7.644-MeV resonance and the second from the 9.64-MeV resonance. The latter state does not contribute significantly for ordinary stellar burning conditions, and is usually neglected. In equation (1),  $\epsilon$  is the energy generation rate in  $\text{erg g}^{-1} \text{s}^{-1}$ ,  $\rho$  the density in  $\text{g cm}^{-3}$ ,  $Y$  the mass fraction of helium, and  $T_9$  is the temperature in units of  $10^9$  K. The term  $-42.94/T_9$  in the argument of the first exponential function arises from  $-\Delta E/kT$ , where  $k$  is the Boltzmann constant, and  $\Delta E$  is the energy difference between a carbon nucleus in the  $0^+$  state and three  $\alpha$ -particles (see, for example, ref. 9), which amounts to 370 keV. The equivalent term in the second exponential function is that for the  $3^-$  state, where the energy difference is 2,370 keV. It can be seen immediately that if the lower resonance state did not exist, the temperature would have to be 6.5 times higher to make the higher resonance comparably effective. However, at such a temperature, which would be close to  $10^9$  K (as compared to  $\approx 10^8$  K in standard helium-burning cores), a greater variety of nuclear reactions involving heavier nuclei can occur, and such a star would evolve very differently from ordinary stars.

For the first example, we investigated the effect that would result from the total non-existence of the  $0^+$  resonance. We considered a star of typical population I composition:  $X = 0.739$ ,  $Y = 0.240$  and  $Z = 0.021$  where  $X$  is the mass fraction of hydrogen and  $Z$  is the mass fraction of all elements except hydrogen and helium. Thus, the initial carbon abundance by

Também na nucleossíntese estelar, temos, no nosso universo, uma sintonia fina das constantes físicas.

Poderíamos ter um universo com pouquíssimo Carbono.



Pode-se falar, portanto em  
evolução química do universo  
– uma das facetas da evolução da complexidade

E o surgimento das estrelas é essencial  
na evolução química cósmica

# Princípio Antrópico (B. Carter, 1973)

Argumento filosófico segundo o qual observações do universo físico devem ser compatíveis com uma **VIDA CONSCIENTE** que o observe.

Alguns defensores do argumento sustentam que ele explica porque o Universo tem a idade e as **constantes fundamentais** necessárias para acomodar vida consciente.

Em consequência, acreditam que não é extraordinário o fato das constantes fundamentais do Universo estarem dentro de uma **faixa estreita** exigida para permitir a vida.

# PRINCÍPIOS ANTRÓPICOS “FRACO” E “FORTE”

## FRACO:

Há localizações privilegiadas do espaço-tempo no Universo (ajuste fino **local** na nossa época)

## FORTE:

Os valores das **constantes fundamentais** da física têm um ajuste fino **em toda parte**

(Barrow & Tipler: “The Anthropic Cosmological Principle”, Oxford University Press, 1988)



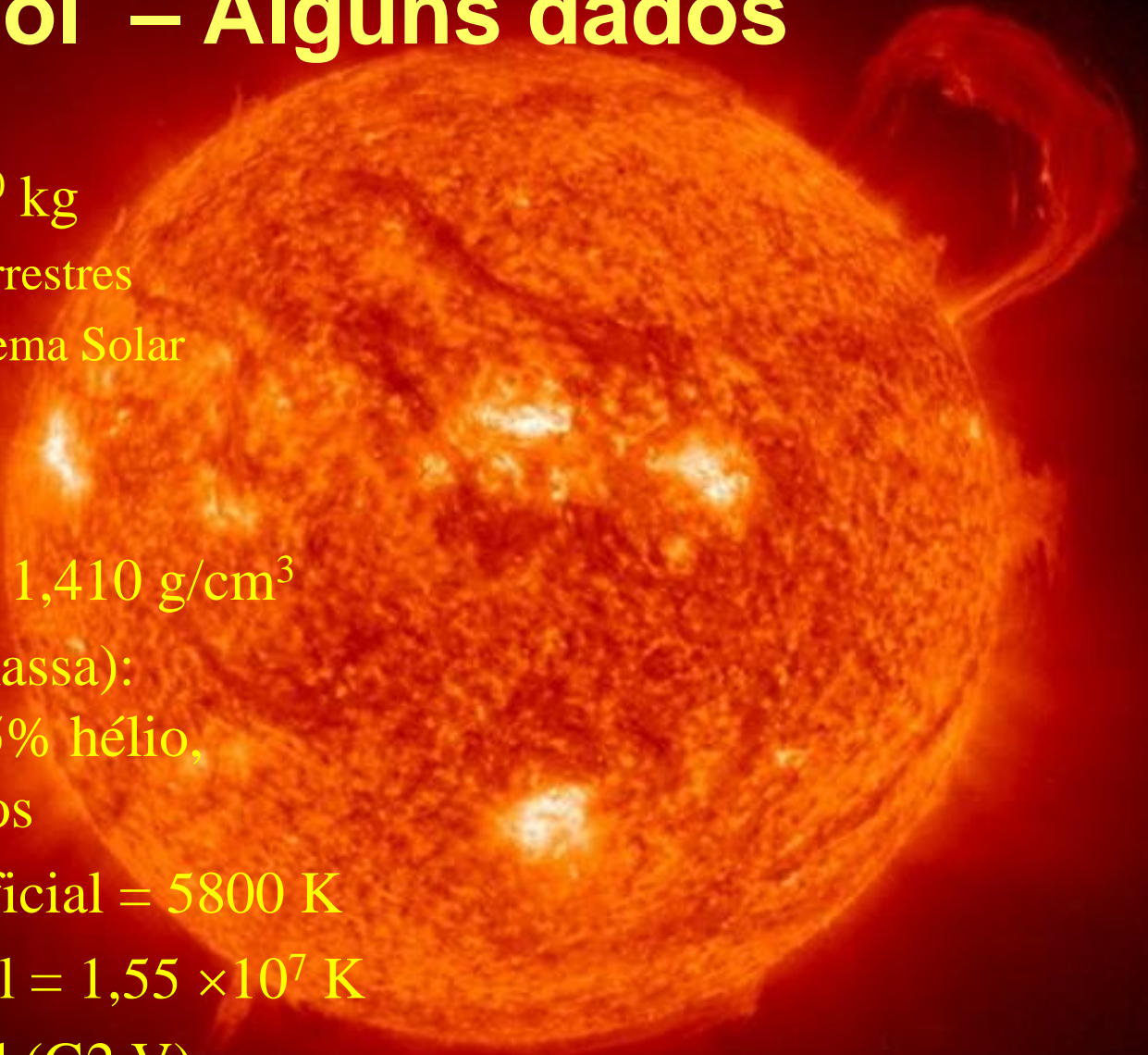
# Nucleossíntese estelar

- O Sol como ilustração



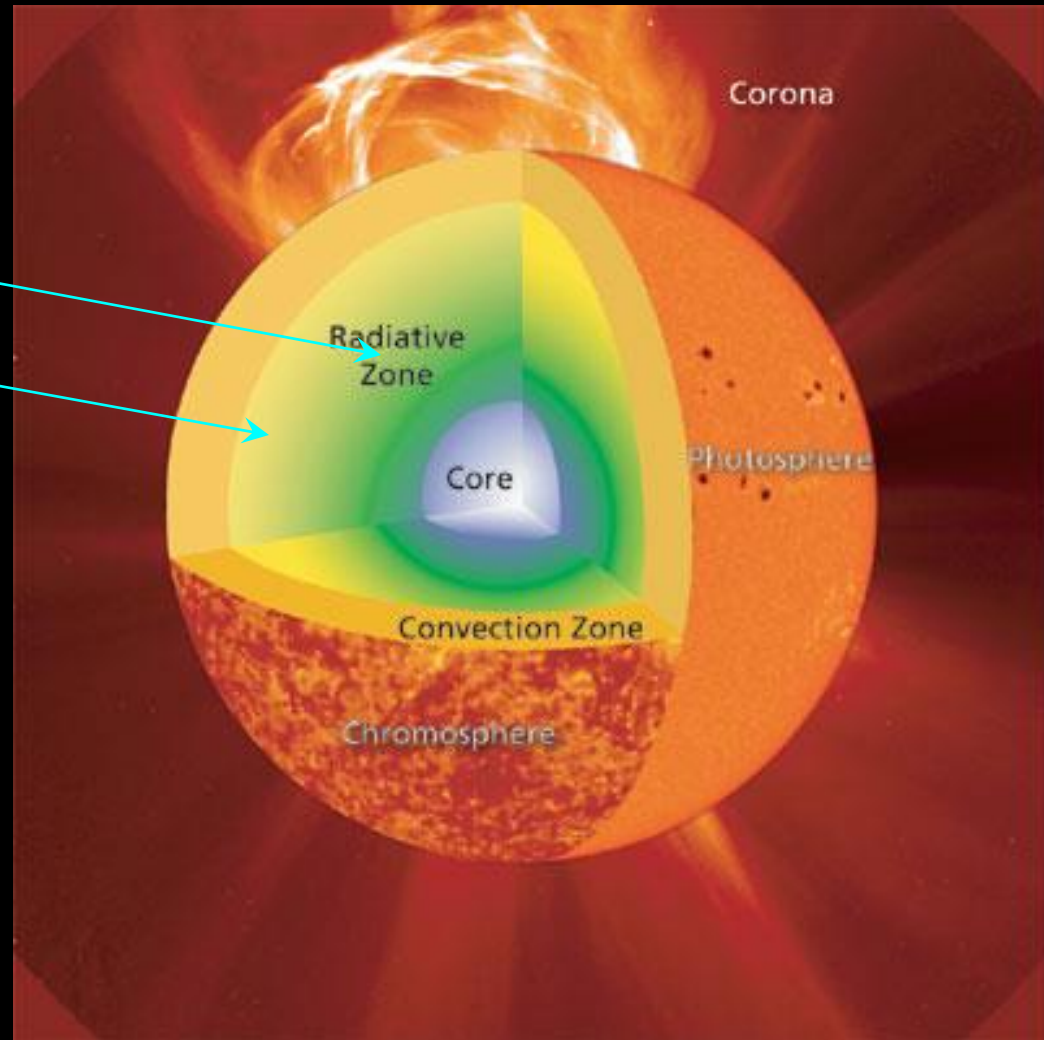
# O Sol – Alguns dados

- $M_{\odot} = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$ 
  - 333.000 massas terrestres
  - 99% massa do Sistema Solar
- $R_{\odot} = 6,96 \times 10^8 \text{ m}$ 
  - 103 raios terrestres
- Densidade média =  $1,410 \text{ g/cm}^3$
- Composição (em massa):  
74% hidrogênio, 25% hélio,  
1% outros elementos
- Temperatura superficial = 5800 K
- Temperatura central =  $1,55 \times 10^7 \text{ K}$
- Sequência Principal (G2 V)



# A Estrutura do Sol

- O Interior
  - Região central (0.2 raio solar)
  - Zona radiativa (0.2-0.7 raio solar)
  - Zona convectiva (0.7-1 raio solar)
- A Superfície e a Atmosfera
  - Fotosfera
  - Cromosfera
  - Corona

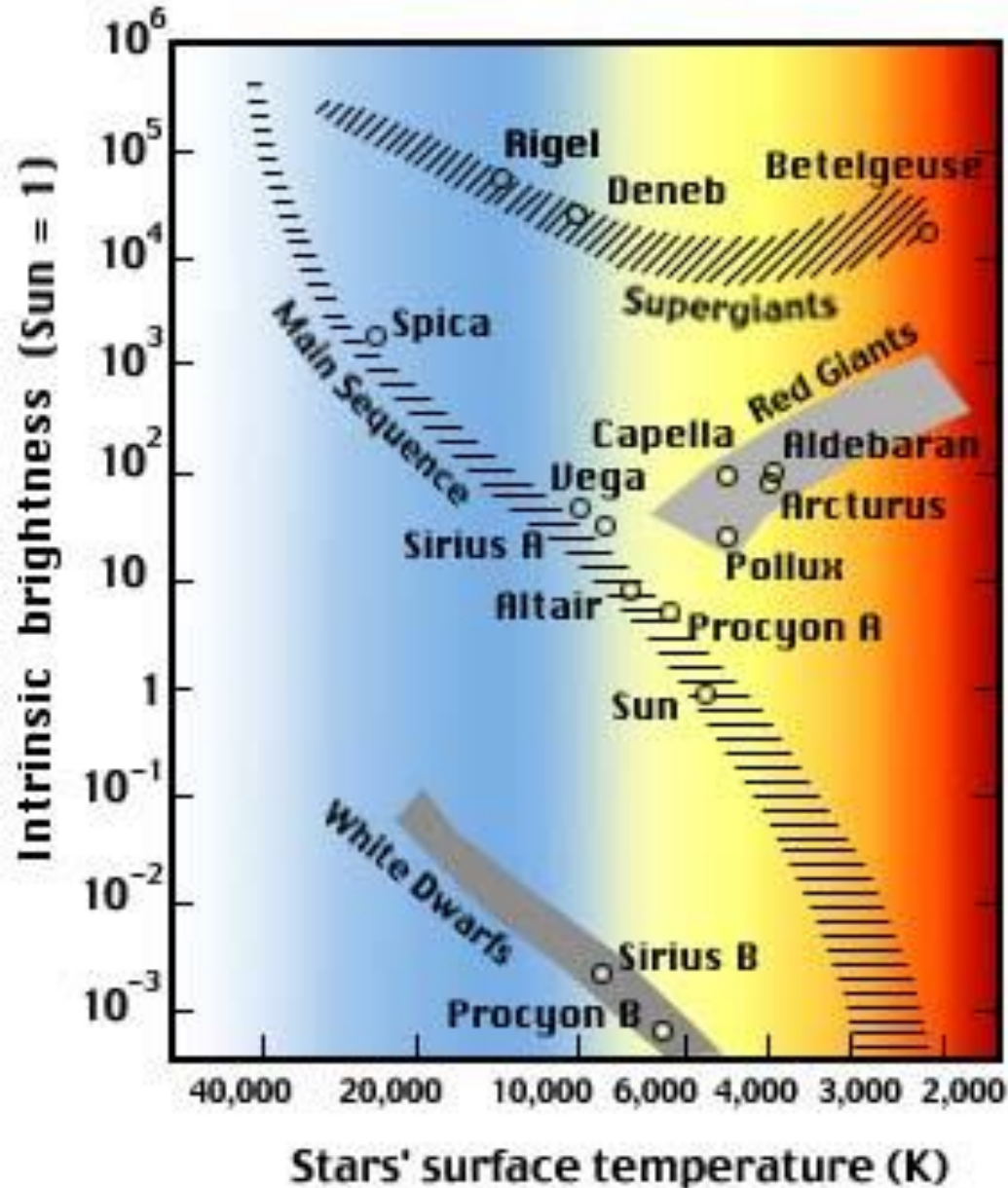


# A fonte de energia do Sol é fusão nuclear de H em He no seu centro



- 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)

# Diagrama HR (Hertzsprung-Russell)



Estrelas de Sequência Principal (SP) (como o Sol, tipo G2 V; a classe de luminosidade “V” indica que é da SP) representam o estágio mais longo e mais estável na evolução de uma estrela, durante o qual a estrela está queimando hidrogênio em hélio em seu núcleo. Durante o estágio de SP, a estrela se encontra aproximadamente em equilíbrio hidrostático com condições relativamente constantes. Em contraste, os estágios finais da evolução estelar (por exemplo, o estágio de gigante vermelha) estão em rápida evolução. (o Sol passará 90% de sua vida na SP).

# A EVOLUÇÃO ESTELAR DEPENDE DA MASSA

Massa intermediária ( $0,8^* a 8 M_{\odot}$ ) vs. alta massa ( $> 8 M_{\odot}$ )

➤ Massa intermediária

“morte”: Nebulosa Planetária

resto: anã branca

➤ Alta massa

“morte”: Supernova

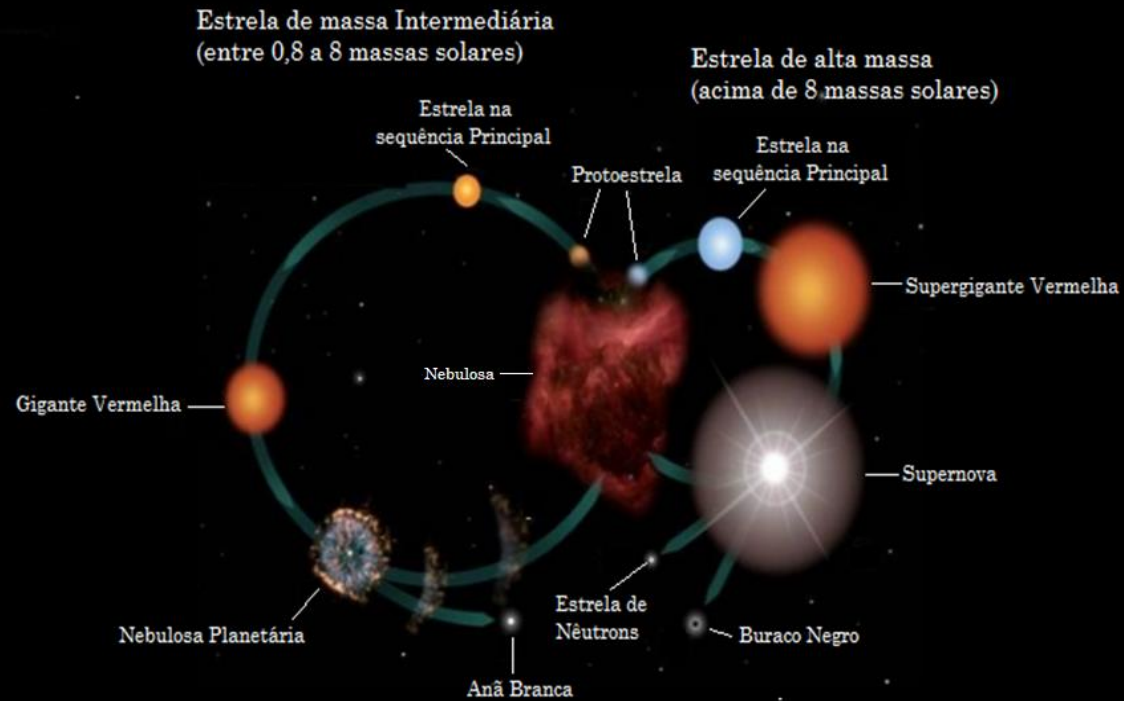
resto: estrela de nêutrons

buraco negro

➤ Nucleossíntese quiescente  
(equilíbrio hidrostático)

– durante a vida da estrela

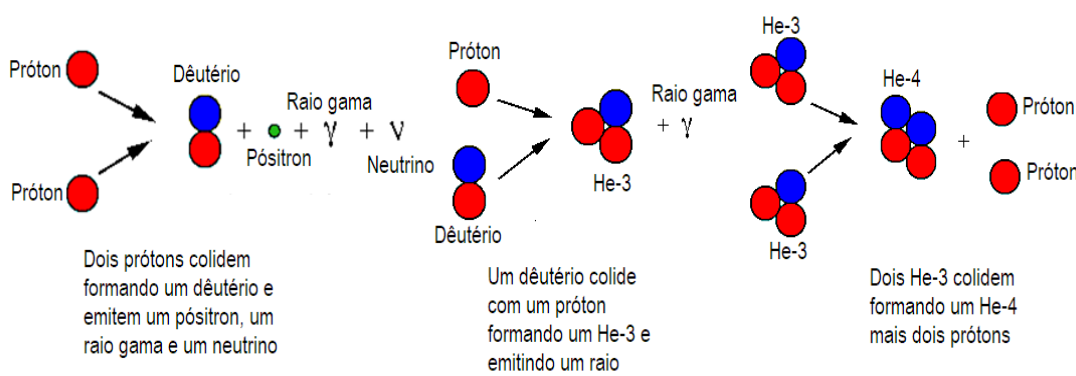
➤ Nucleossíntese explosiva  
Supernova



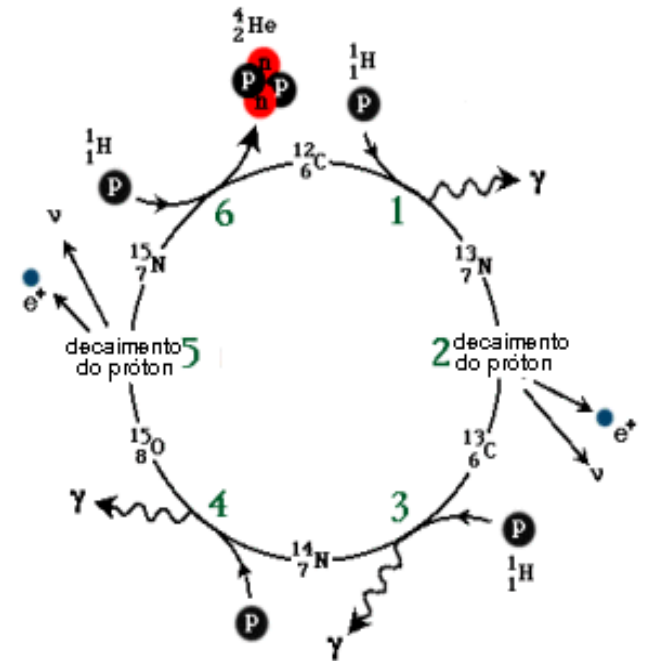
\*O tempo de vida de estrelas com  $M < 0,8 M_{\odot}$  é maior do que a idade do Universo: não contribuem à evolução química cósmica

# NUCLEOSSÍNTESE ESTELAR

## Fusão do H em He



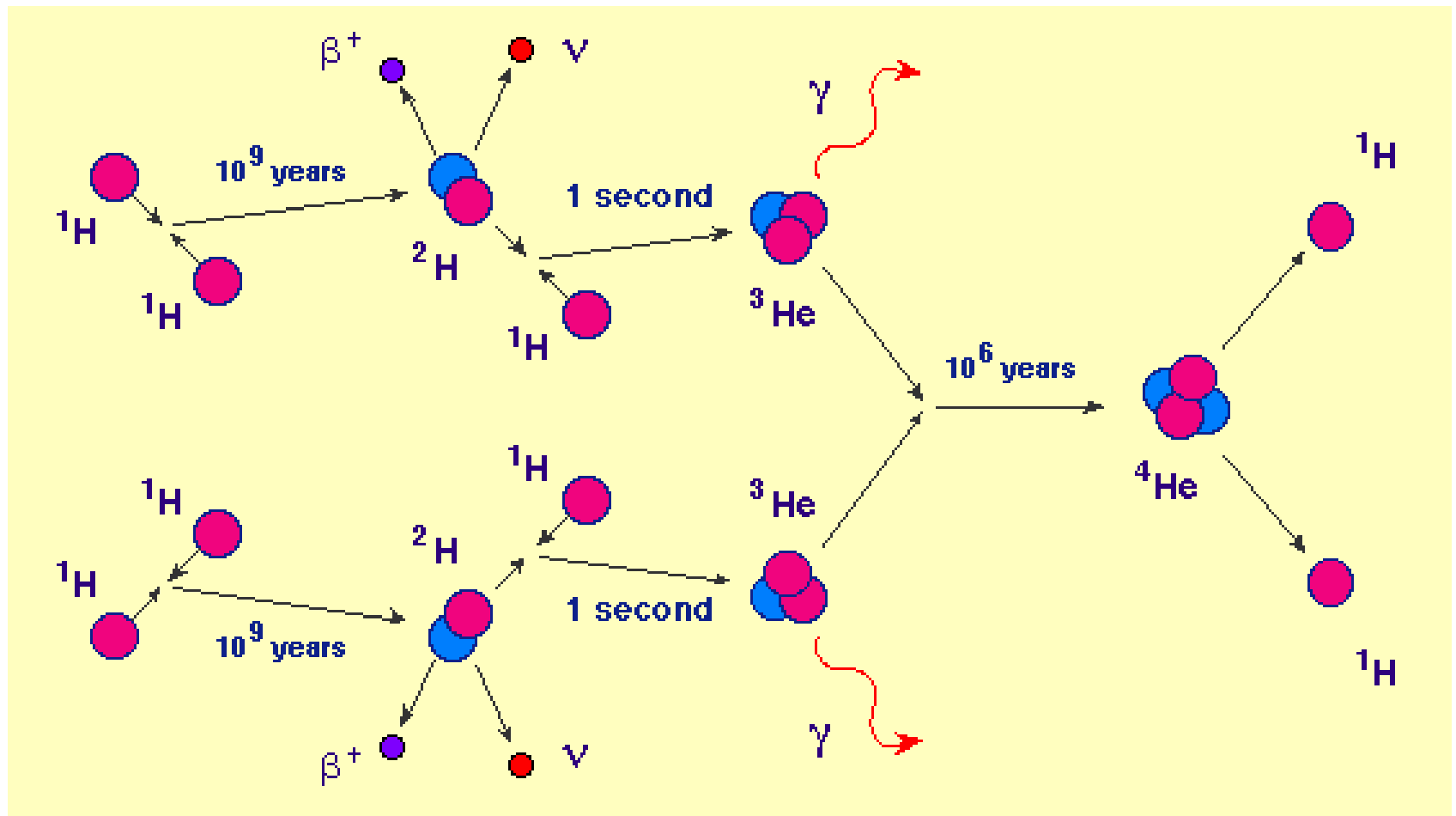
Cadeia próton-próton  
 $M > 0,08 M_{\odot}$



Ciclo Carbono-Nitrogênio-Oxigênio (CNO)

Mais eficiente que p-p para  $M > 1,4 M_{\odot}$

# Cadeia Próton-Próton





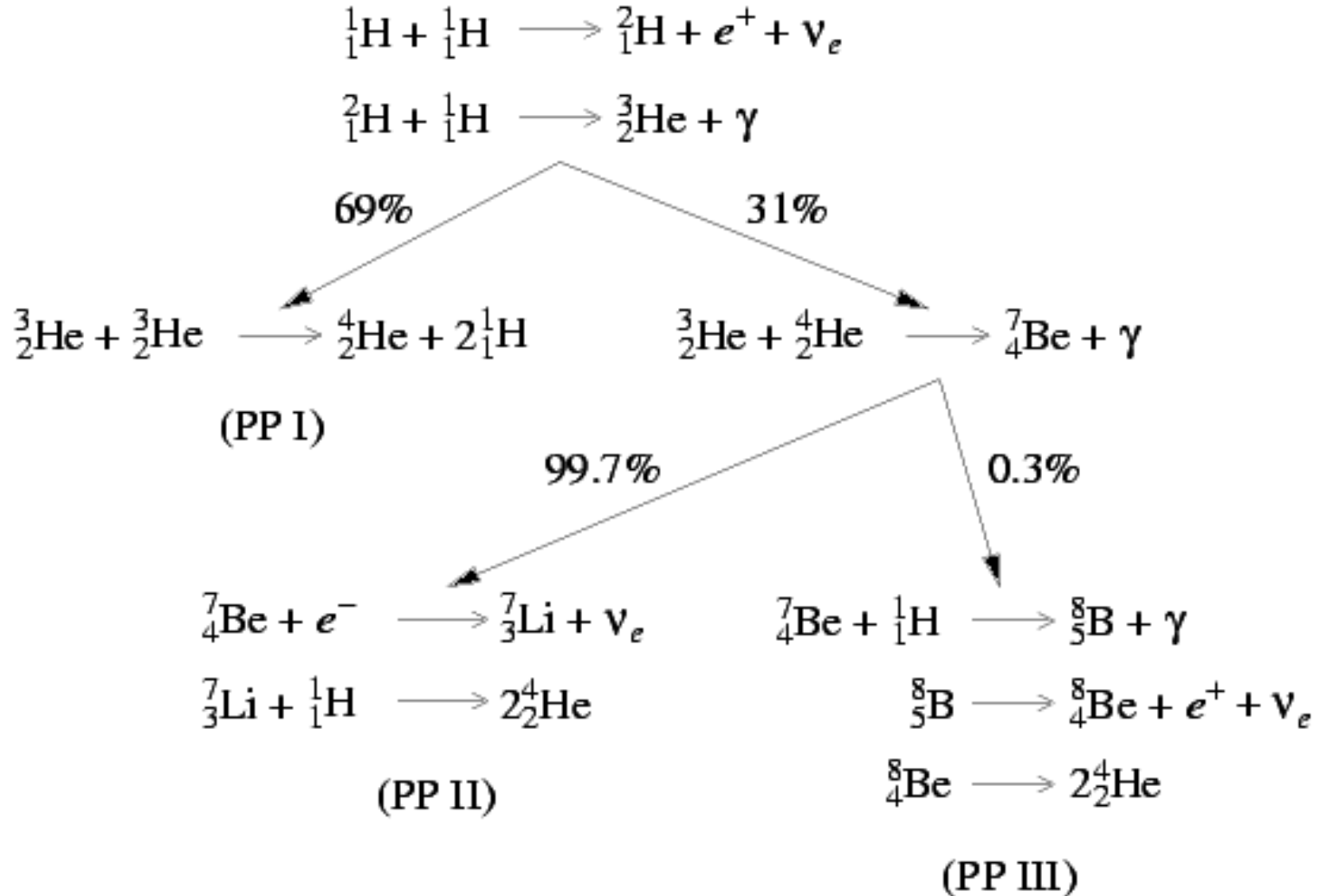
## The Proton-Proton Chain

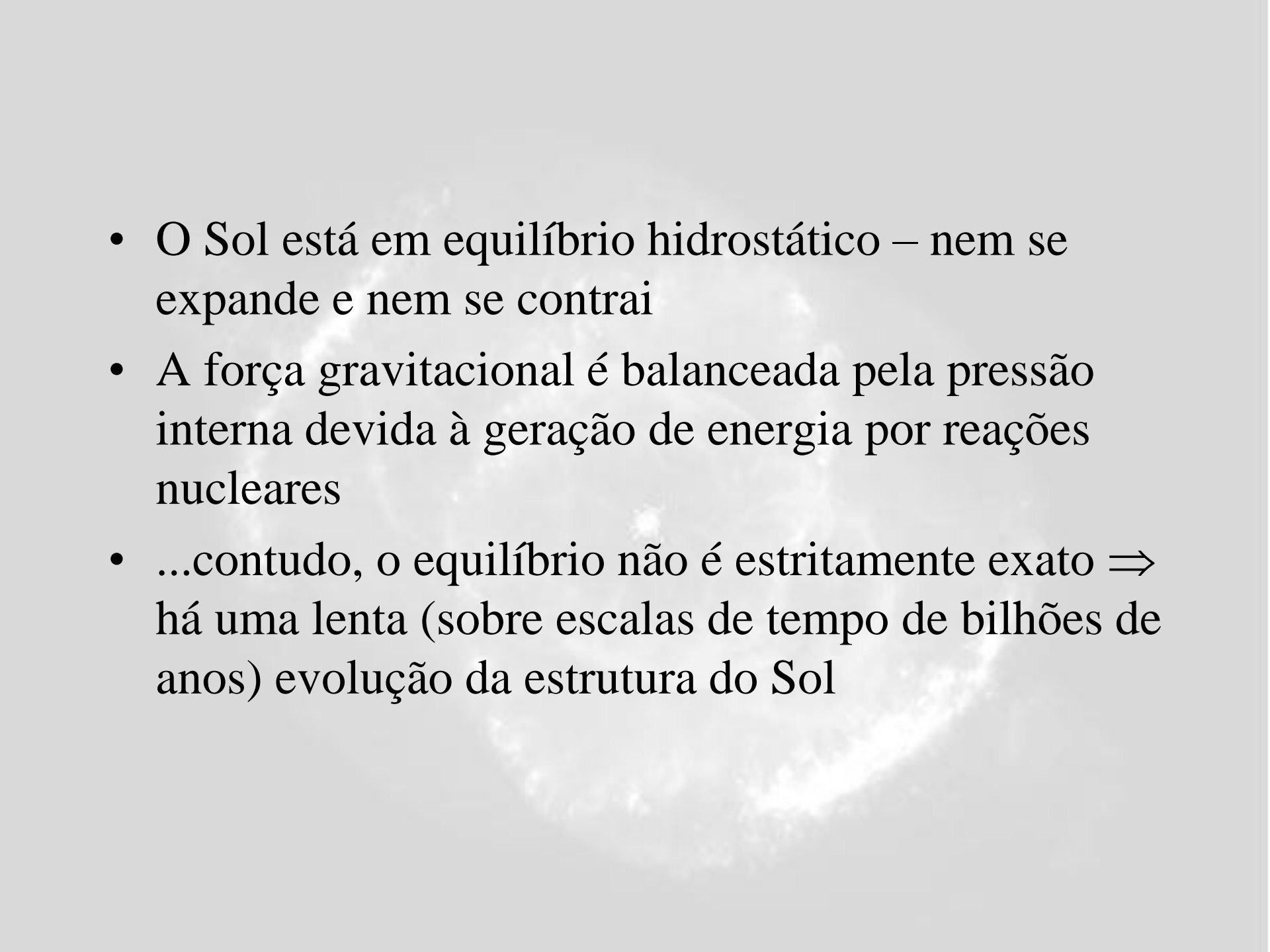
Weak Nuclear Interaction  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$   $t_{\text{Mean}} \sim 5\,000\,000\,000$  years

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

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

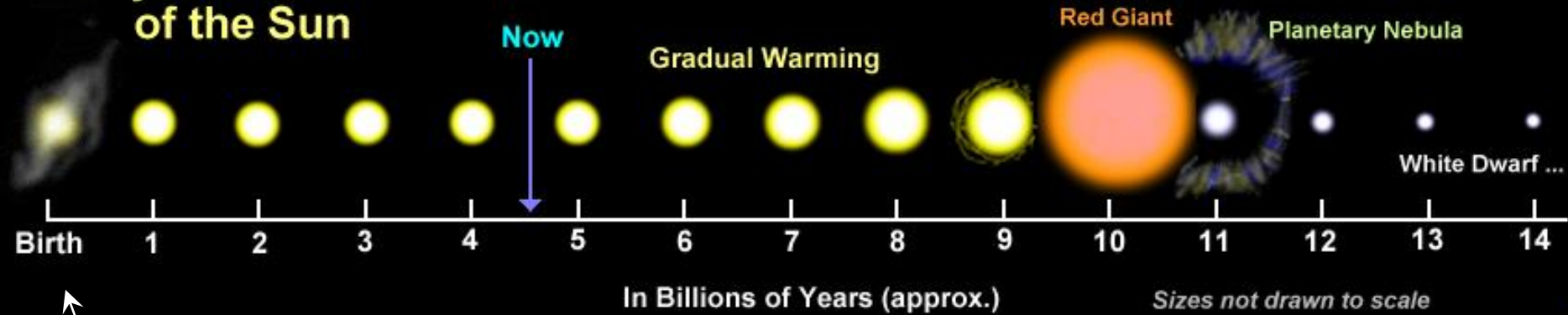
# Cadeia p-p (em detalhe)



- 
- O Sol está em equilíbrio hidrostático – nem se expande e nem se contrai
  - A força gravitacional é balanceada pela pressão interna devida à geração de energia por reações nucleares
  - ...contudo, o equilíbrio não é estritamente exato  $\Rightarrow$  há uma lenta (sobre escalas de tempo de bilhões de anos) evolução da estrutura do Sol

# Evolução do Sol

## Life Cycle of the Sun



Colapso da nuvem molecular

A Terra provavelmente será destruída

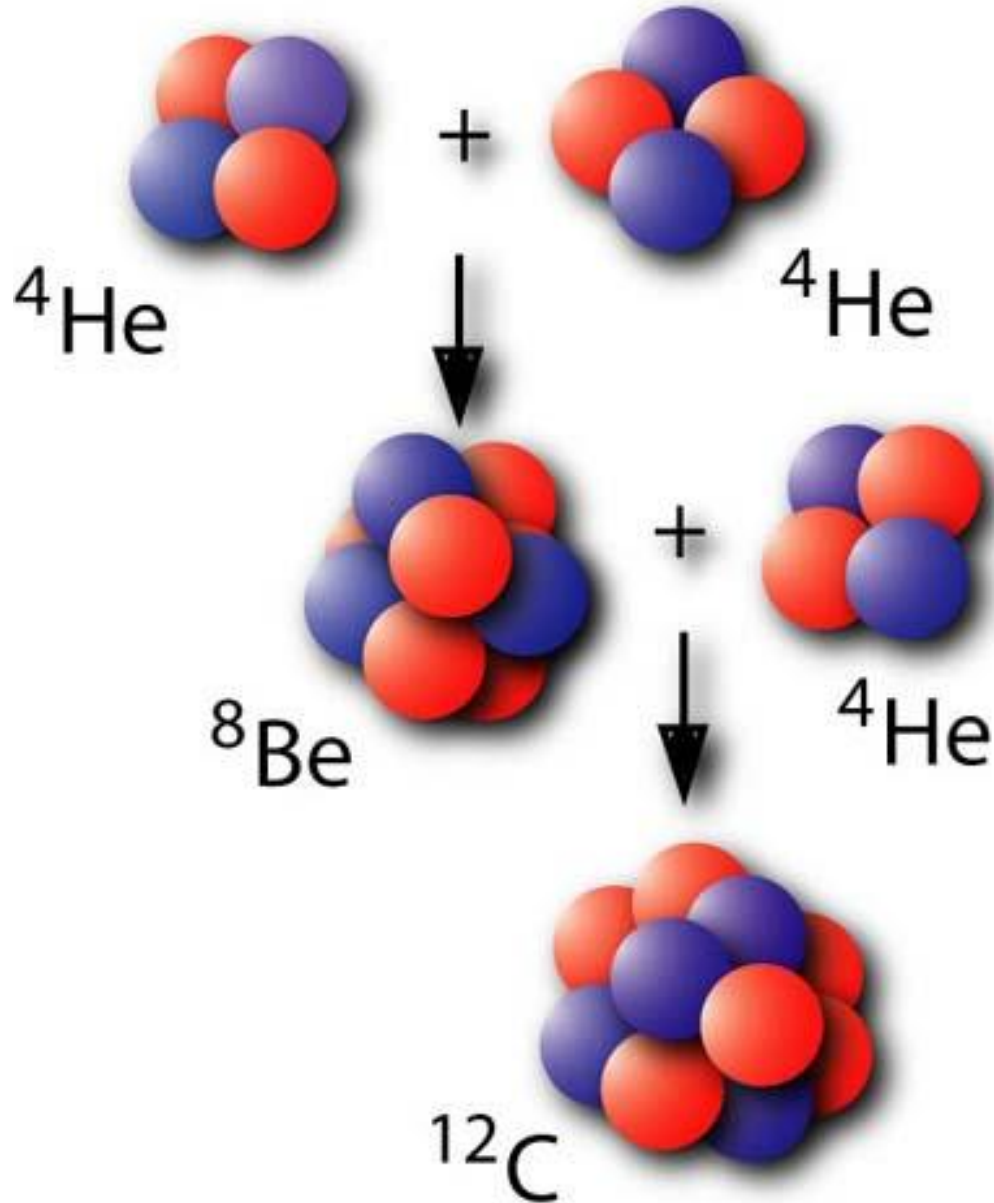
# Por que o Sol fica mais luminoso com o tempo?

- H se funde em He no centro
- O centro torna-se mais denso
- O centro se contrai e se aquece
- Com o aumento da densidade e da temperatura, as reações nucleares ocorrem a uma taxa mais rápida
- Mais energia é produzida no centro  $\Rightarrow$  mais energia é irradiada na superfície

# 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  $^{12}\text{C}$
- Esta queima do He é chamada *processo triplo  $\alpha$* , pois envolve 3 núcleos de He, ou seja, 3 partículas  $\alpha$
- 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



# E 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  $^4\text{He}$  em  $^{12}\text{C}$  no núcleo e a queima simultânea de H em  $^4\text{He}$  em uma camada adjacente ao núcleo e um pouco mais fria do que este.
- Parte do carbono formado pode também se converter em  $^{16}\text{O}$ , 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**

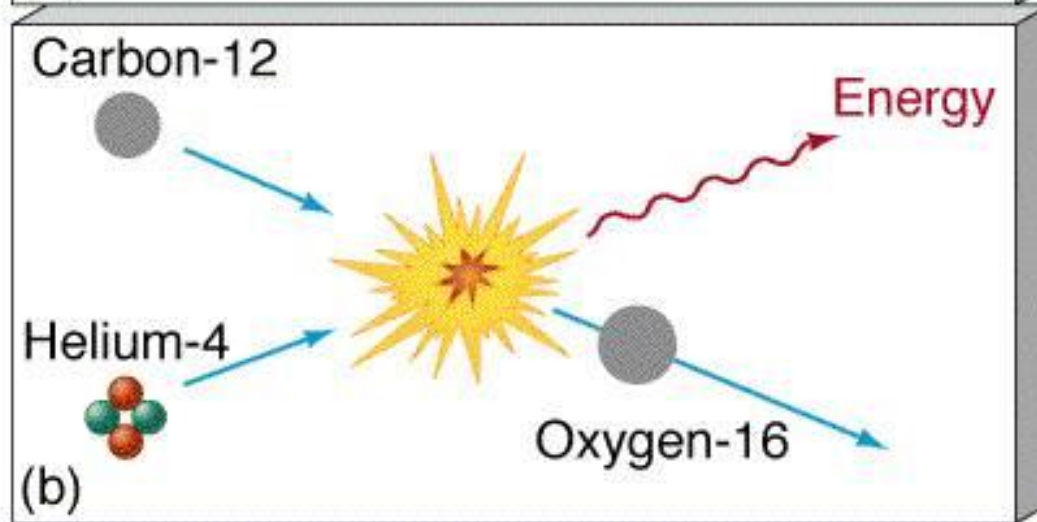
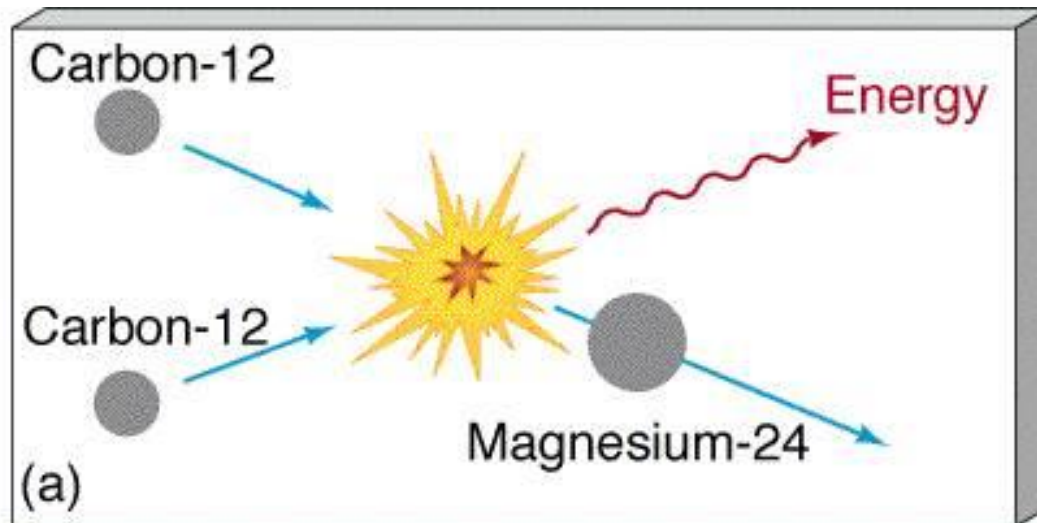
PR95-01a · ST ScI OPO · January 1995 · P. Harrington (U.MD), NASA

**HST · WFPC2**

12/13/94 zgl

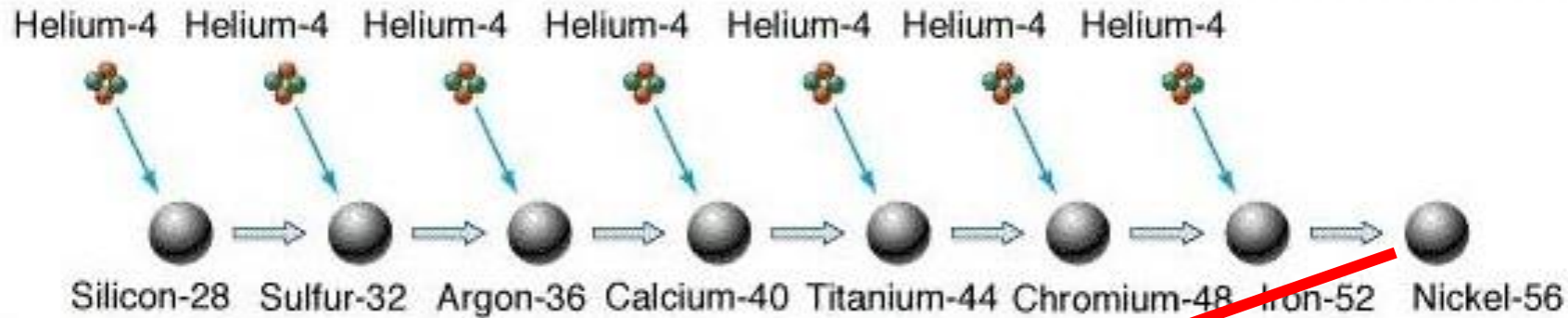
# Elementos alfa

- 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  $^{16}\text{O}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  e alguns de seus isótopos.
- Esses são chamados elementos alfa, pois sua formação dá-se pela captura de um núcleo de  $^4\text{He}$  (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  $^{56}\text{Fe}$
- Além do  $^{56}\text{Fe}$ , 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



$^{56}\text{Fe}$

$^{56}\text{Co}$   
instável

instável

O  $^{56}\text{Fe}$  é o elemento mais estável

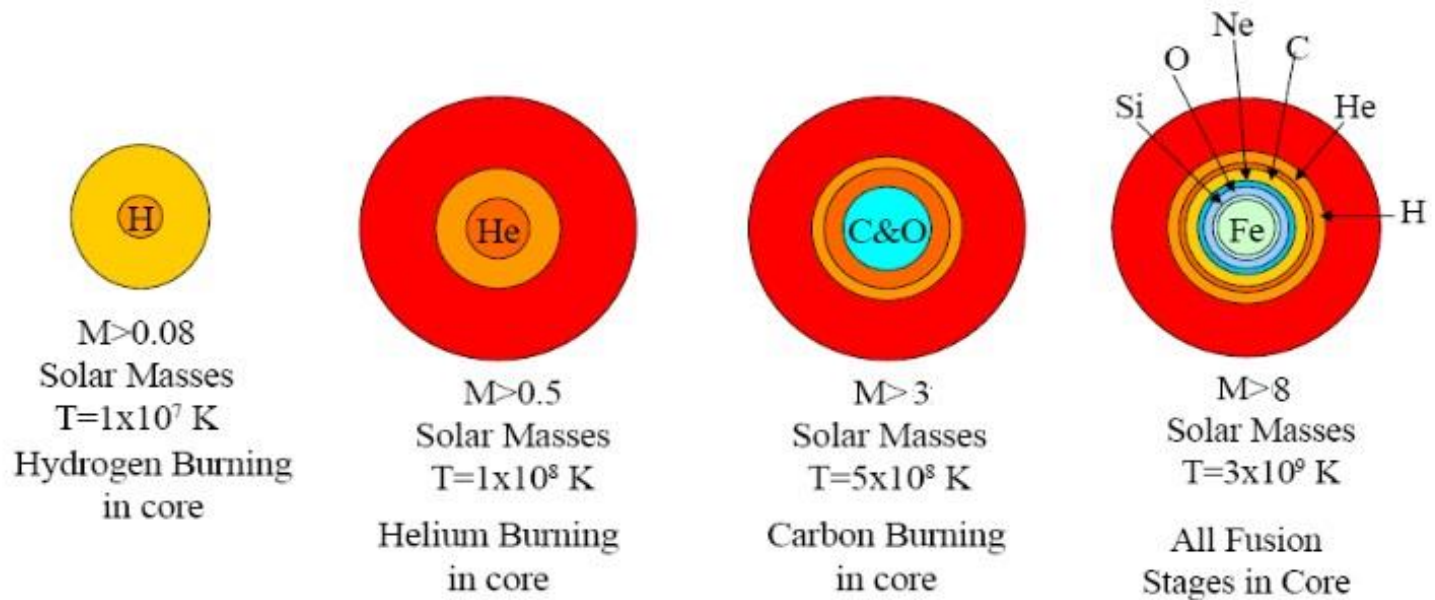
Após ele as reações são endotérmicas (“roubam” energia)

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

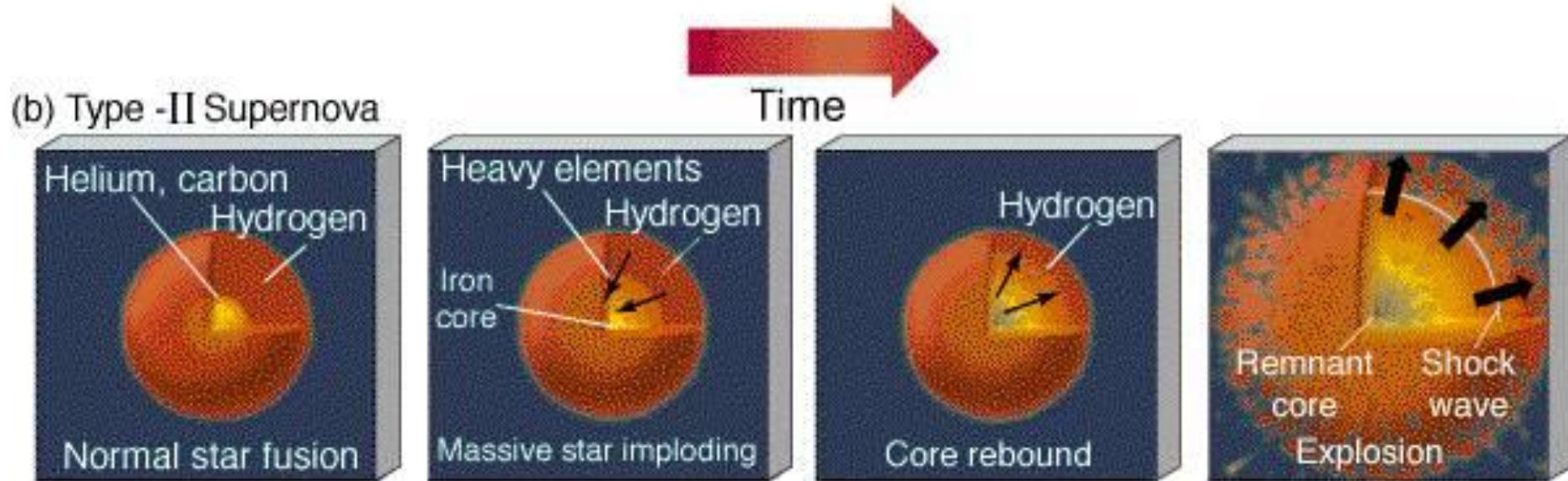
<b>Process</b>	<b>Fuel</b>	<b>Products</b>	<b>Temperature</b>
Hydrogen Burning	H	He	$1 \times 10^7$ K
Helium Burning	He	C,O	$1 \times 10^8$ K
Carbon Burning	C	O,Ne,Na, Mg	$5 \times 10^8$ K
Neon Burning	Ne	O,Mg	$1 \times 10^9$ K
Oxygen Burning	O	Mg-S	$2 \times 10^9$ K
Silicon Burning	Si	Fe + nearby elements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

# NUCLEOSSÍNTESE ESTELAR

## Dependência com a massa estelar



# Produção de uma Supernova de Tipo II (estrela acima de 8 massas solares)



# Supernova 1987A Rings



Hubble Space Telescope  
Wide Field Planetary Camera 2



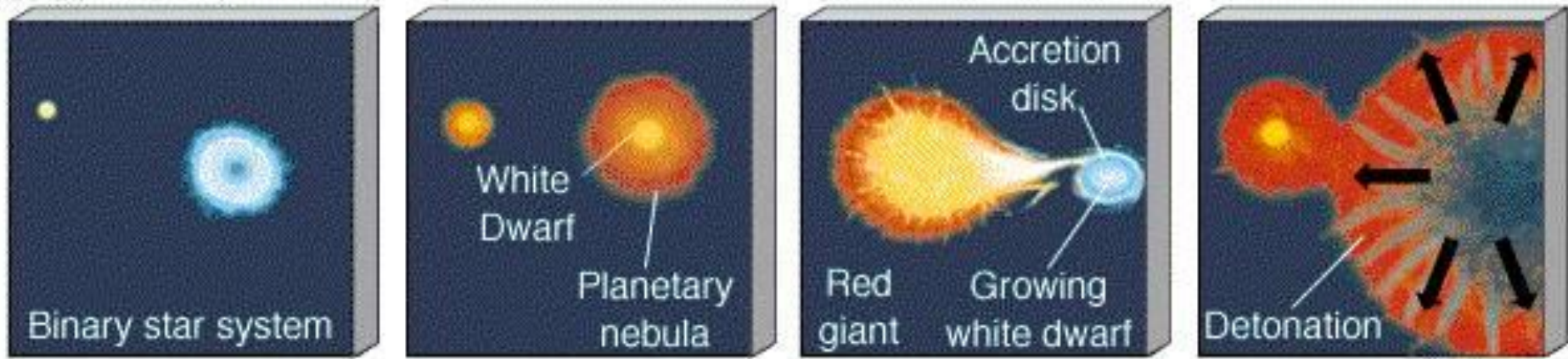
SPACE  
TELESCOPE  
SCIENCE  
INSTITUTE

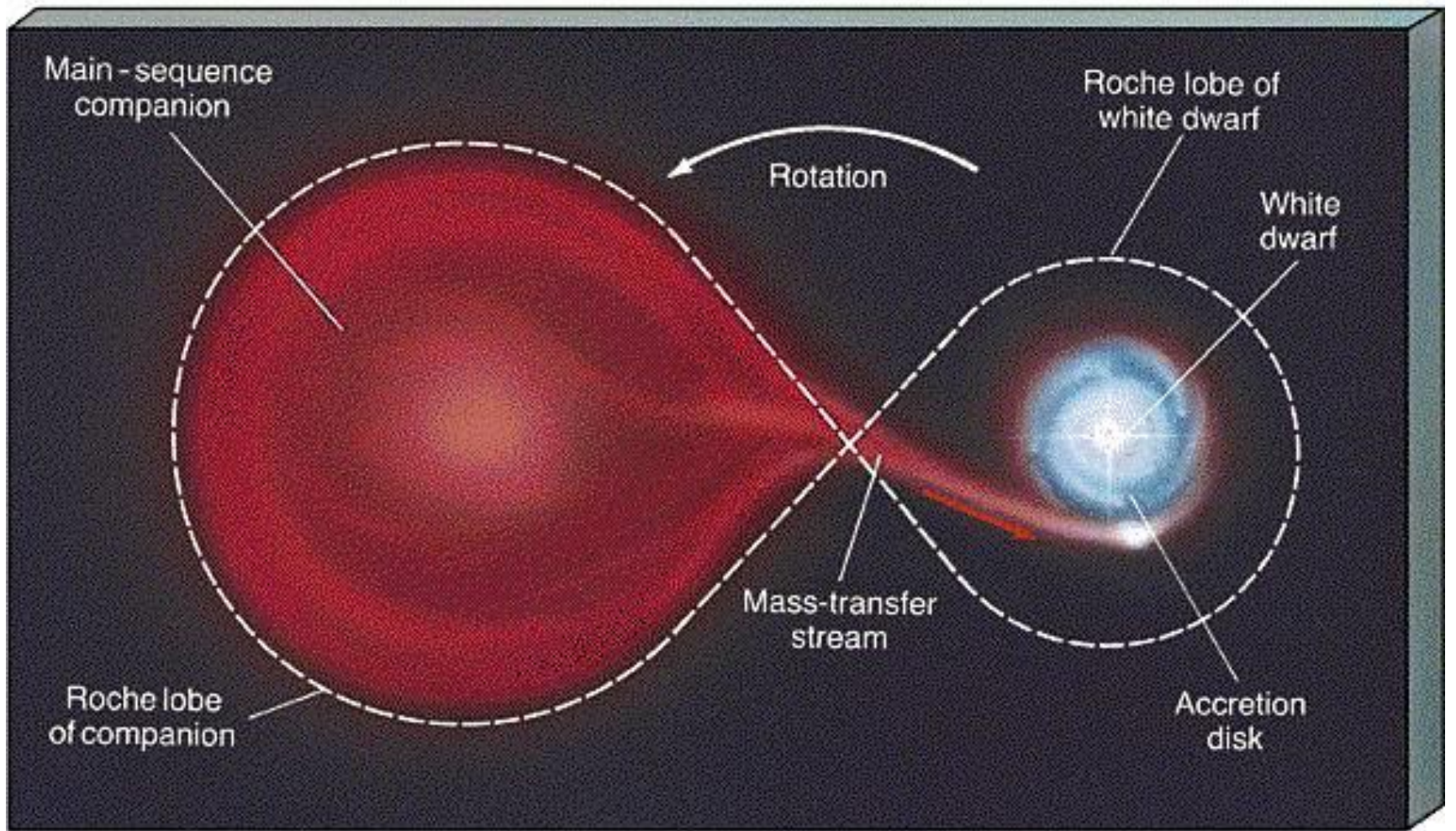




# Produção de uma Supernova de Tipo Ia (Sistema binário com ambas estrelas tendo menos de 8 massas solares)

(a) Type -I Supernova





Sintetizando



# 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  $\alpha$ , C, (Fe), (N)
- Tempos: Manos (ou anos para as hipernovas primevas)

Supernova!



SN1987A (David Malin and the Anglo Australian Observa

# Supernovas Ia

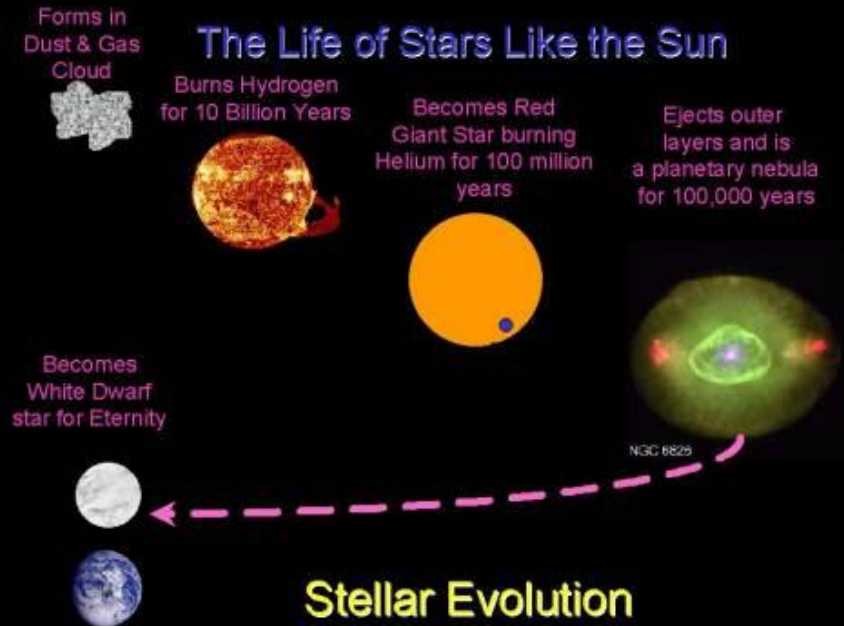
- SN Ia: anãs brancas em sistemas binários
- Incertezas quanto a companheira:
  - anã branca,
  - gigante vermelha,
  - degenerada,
  - não degenerada
- $L \sim 10 - 100 \times L_{\text{SNII}}$
- Produção de Fe
- Tempos: 0.1-1 Ganos



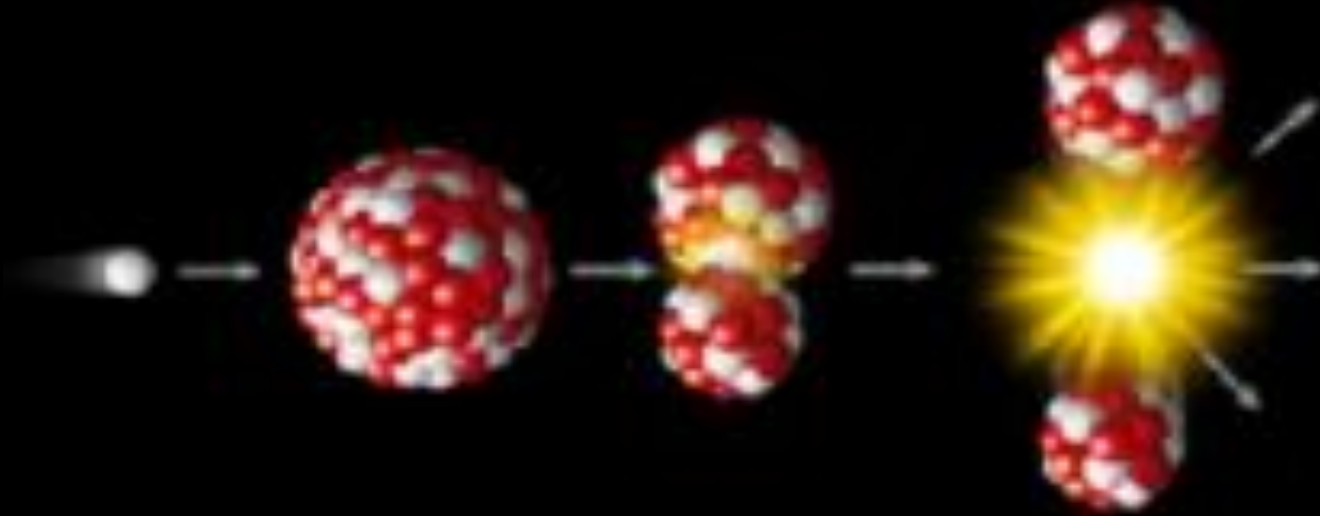
SN1994D - Hubble Space Telescope

# 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
- Produção de C, N
- Tempos: até vários Ganos
- Promovem as condições pré-bióticas.



**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)

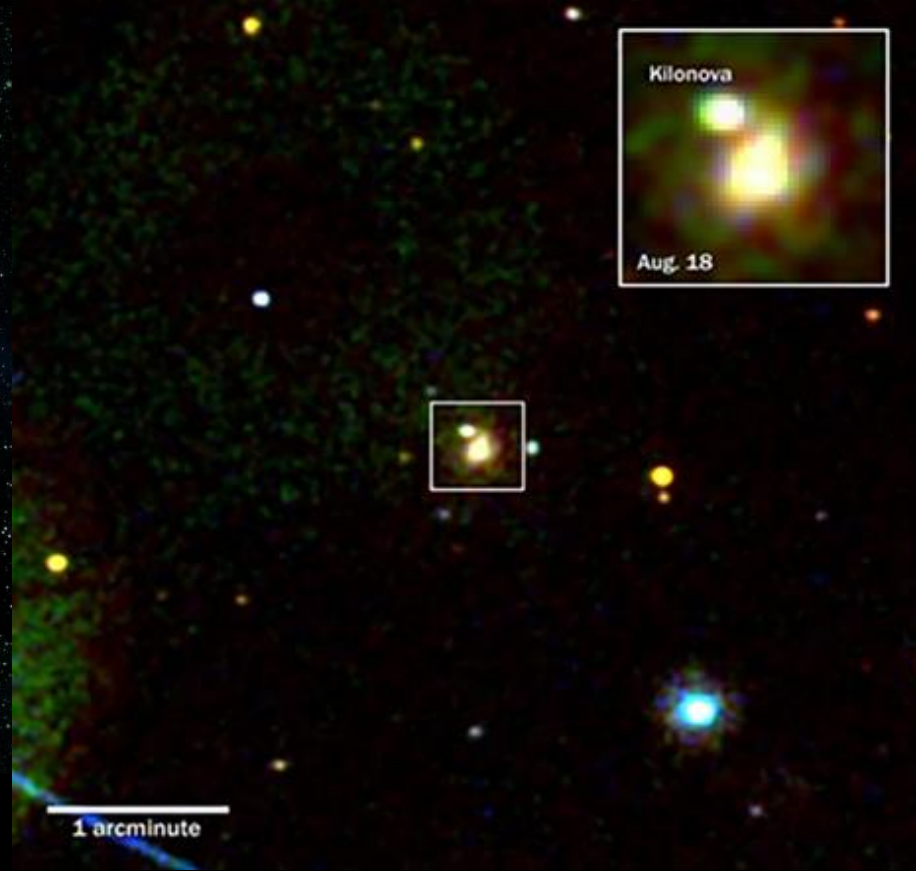
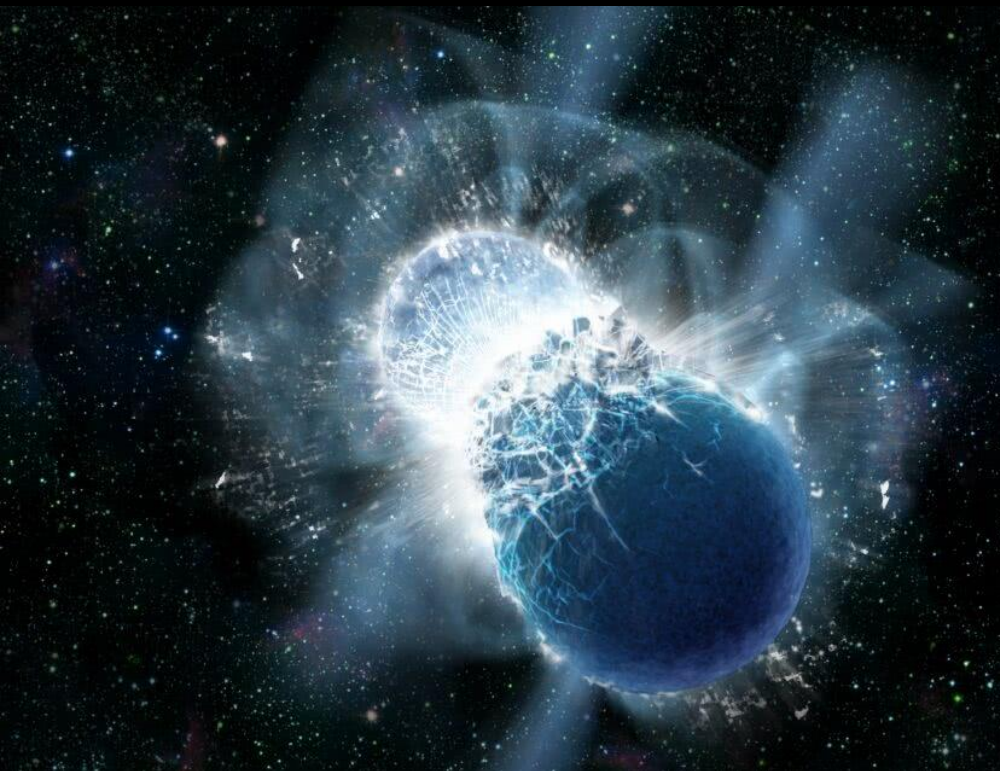
\* ${}^7\text{Li}$  é produzido no Big Bang, por espalação e em estrelas



# 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 massa intermediária 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*.

# Fusões 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.

# Sítios de Nucleossíntese

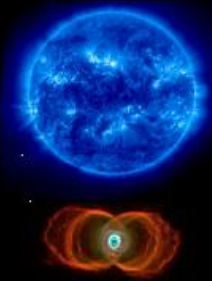
- Big Bang
- Meio interestelar (espalação por raios cósmicos)
- Estrelas de massa intermediária/Nebulosas Planetárias
- Estrelas de alta massa/Supernovas de tipo II
- Supernovas de tipo Ia
- Fusões de estrelas de nêutrons
- Outros:
  - Novas
  - Ventos estelares de estrelas de alta massa

# TABELA ORIGEM DOS ELEMENTOS QUÍMICOS

Símbolo	Nº Atômico	Objeto Relacionado	Massa Atômica	D i e t r ô n i c a
H	1		1.00794	
He	2		4.002602	
Li	3		6.941	
Be	4		9.012182	
B	5		10.811	
C	6		12.0107	
N	7		14.00643	
O	8		15.9994	
F	9		18.9984032	
Ne	10		20.1797	
Na	11		22.98976928	
Mg	12		24.304	
Al	13		26.9815386	
Si	14		28.0855	
P	15		30.973761508	
S	16		32.06	
Cl	17		35.453	
Ar	18		39.948	
K	19		39.0983	
Ca	20		40.078	
Sc	21		44.955912	
Ti	22		47.88	
V	23		50.9415	
Cr	24		51.9961	
Mn	25		54.938045	
Fe	26		55.845	
Co	27		58.933195	
Ni	28		58.6934	
Cu	29		63.546	
Zn	30		65.38	
Ga	31		69.723	
Ge	32		72.64	
As	33		74.9216	
Se	34		78.96	
Br	35		79.904	
Kr	36		83.80	
Rb	37		85.4678	
Sr	38		87.62	
Y	39		88.906	
Zr	40		91.224	
Nb	41		92.90638	
Mo	42		95.94	
Tc	43			
Ru	44		101.07	
Rh	45		102.9055	
Pd	46		106.42	
Ag	47		107.8682	
Cd	48		112.414	
In	49		114.818	
Sn	50		118.710	
Sb	51		121.757	
Te	52		127.60	
I	53		126.90547	
Xe	54		131.29	
Cs	55		132.90545196	
Ba	56		137.327	
Hf	72		178.49	
Ta	73		180.94788	
W	74		183.84	
Re	75		186.207	
Os	76		190.23	
Ir	77		192.222	
Pt	78		195.084	
Au	79		196.966569	
Hg	80		200.59	
Tl	81		204.3833	
Pb	82		207.2	
Bi	83		208.9804	
Po	84			
At	85			
Rn	86			
La	57		138.90547	
Ce	58		140.12	
Pr	59		140.90765	
Nd	60		144.242	
Pm	61			
Sm	62		150.36	
Eu	63		151.964	
Gd	64		157.25	
Tb	65		158.92535	
Dy	66		162.50	
Ho	67		164.93032	
Er	68		167.259	
Tm	69		168.93032	
Yb	70		173.054	
Lu	71		174.967	
Ac	87			
Th	90		232.0377	
Pa	91		231.036888	
U	92		238.02891	

**Big Bang**

Estrela de massa intermediária (entre 0,8 e 8 massas solares), que termina sua vida como Nebulosa Planetária.



Estrela de alta massa (acima de 8 massas solares), que termina sua vida como Supernova de tipo II

Fusão de estrelas de nêutrons.



**Espalação**  
Processo de colisão entre raios cósmicos (partículas de alta energia) e núcleos atômicos do meio interestelar

Supernova de tipo Ia, que é o resultado da evolução de um sistema de duas estrelas, cada uma de massa intermediária



Elementos produzidos artificialmente

Tabela adaptada por Karline Brandão