

## Aula 3: Nucleossíntese

- Como se formaram os elementos primordiais (hidrogênio e hélio)
- Como se formam os elementos leves (até o Fe)
- Como se formam os elementos pesados (do Fe ao U)

# Abundâncias: a composição do Universo

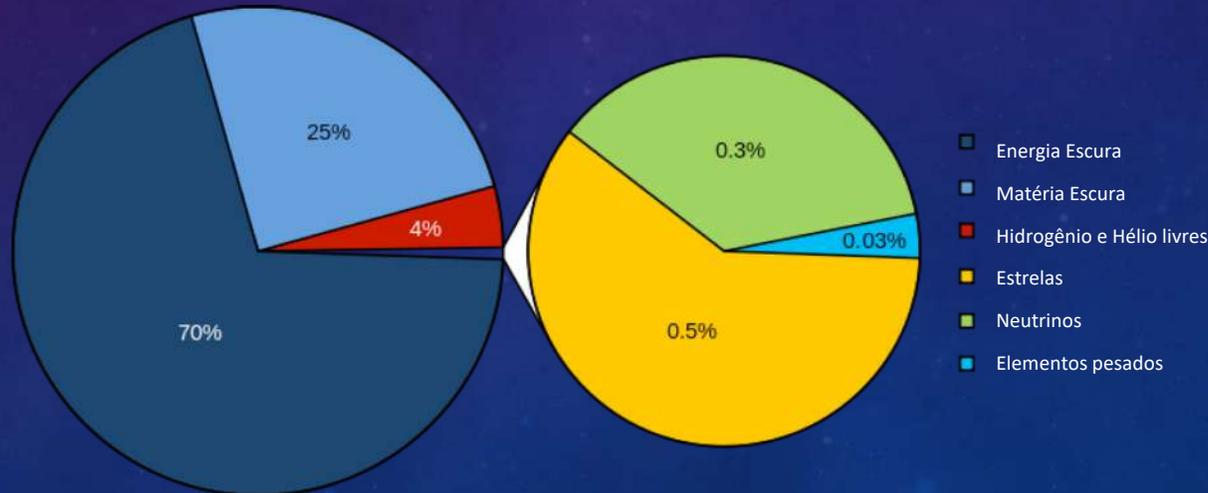
Antes de responder à questão da origem dos elementos é preciso perguntar:

De que o Universo é feito ??

Na verdade, não temos idéia. A não ser que é composto de matéria + energia.

- 70% Energia escura (não sabemos o que é)
- 25% Matéria escura fria (não sabemos o que é)
- 4% Hidrogênio e Hélio gasosos
- 0.5% Hidrogênio e Hélio em estrelas
- 0.3% neutrinos
- 0.03% elementos pesados

Tópico principal de hoje



**Por que então se preocupar com 0.03% ???**

**Algumas coisas razoavelmente importantes são compostas por estes 0.03%:**

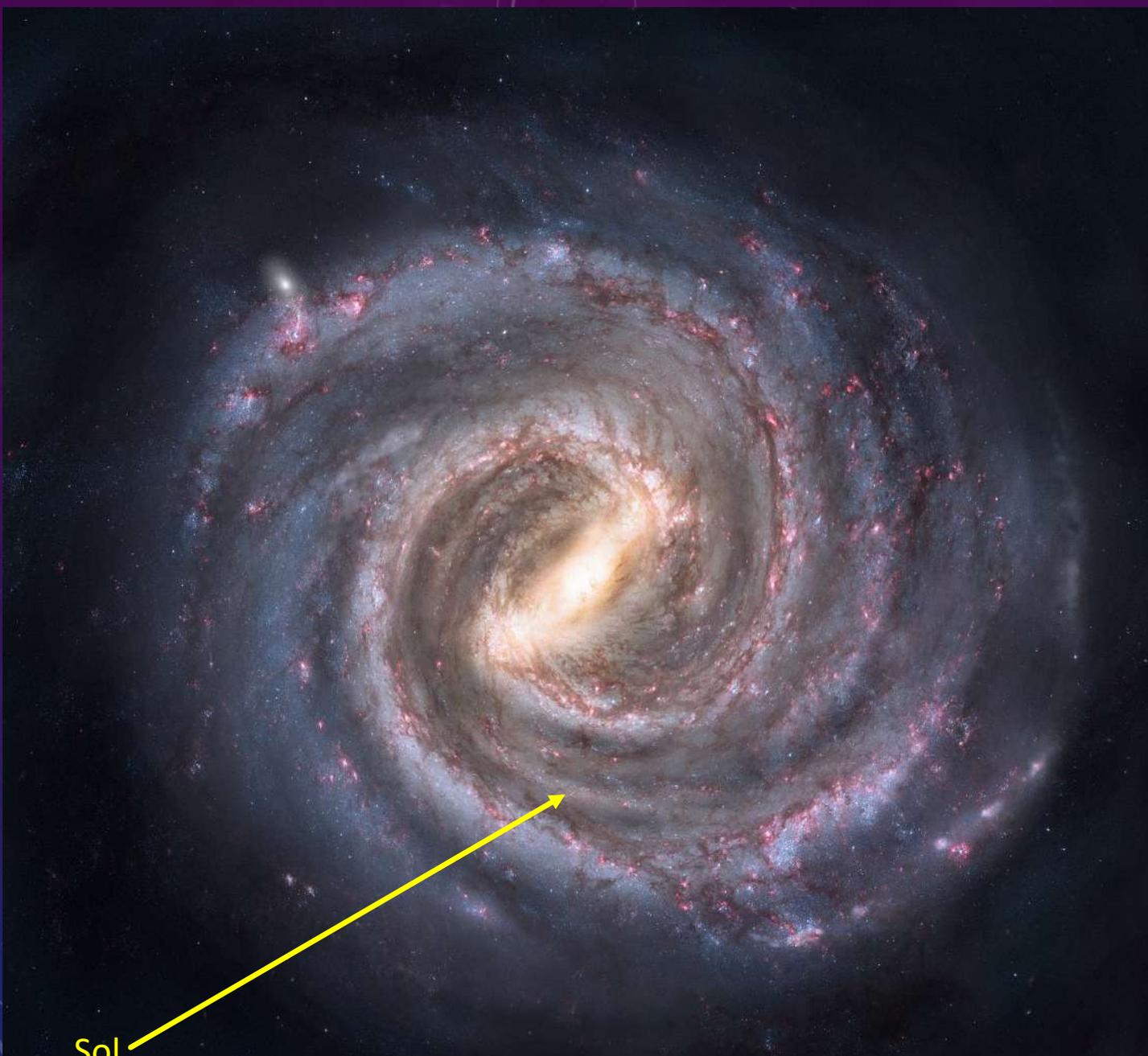




Onde moramos?

Na Via Láctea

Nossa casa no céu



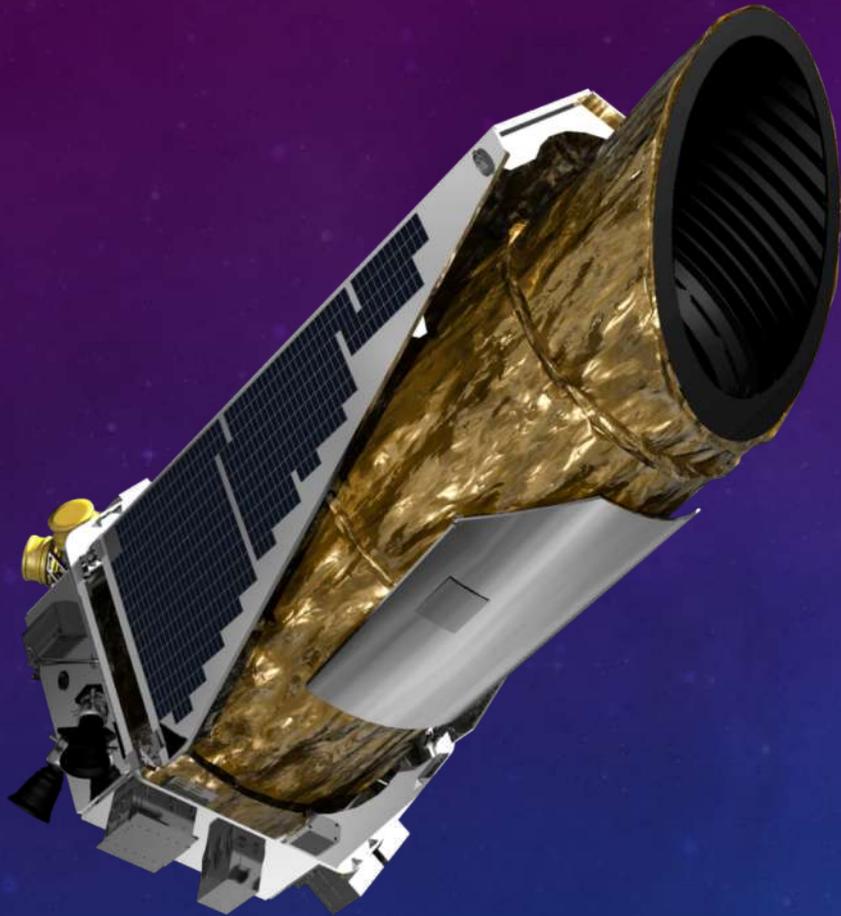
Sol

Se pudéssemos ver a Via Láctea de fora, ela seria assim

- Galáxia espiral
- O disco contém os braços espirais e grandes nuvens de gás e poeira de onde se formam as estrelas
- Possui uma pequena barra no bojo
- Diâmetro do disco:  $\sim 180.000$  anos-luz
- Número de estrelas 200-400 bilhões
- Massa estelar:  $\sim 10^{12}$  massas solares

1 ano-luz =  $9.5 \times 10^{12}$  km  
Massa do Sol =  $2 \times 10^{30}$  kg

# Existem planetas em torno de outras estrelas além do Sol?



## Satélite Kepler

- Operou entre 2009 e 2018
- Telescópio de 95 cm de diâmetro
- Observou 530.506 estrelas e detectou 2.662 planetas
- A partir dos resultados, pode-se concluir que a **grande maioria** das estrelas têm planetas

Atualmente (abril de 2022) já existem em torno de 5000 exoplanetas catalogados

# Quantas galáxias existem no Universo?

Imagem “ultra profunda” feita com o Telescópio Hubble:

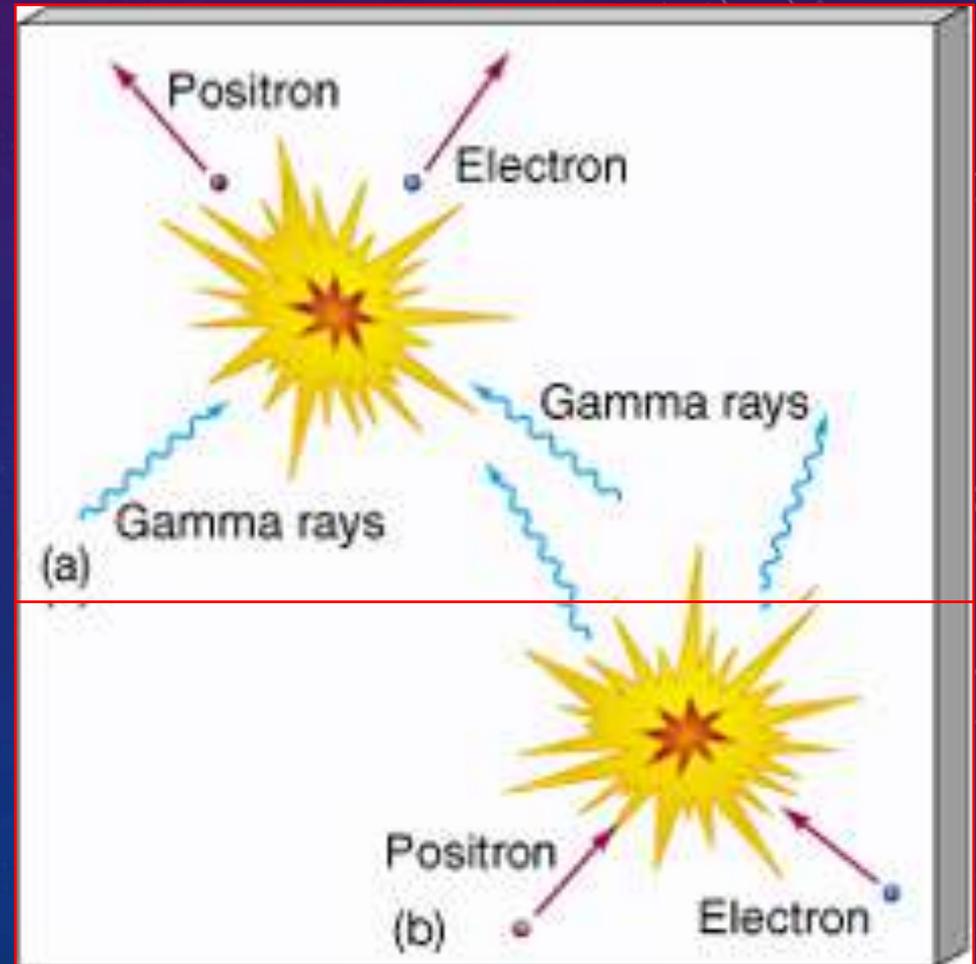
- O tempo de exposição foi equivalente a 11.3 dias de exposição contínua
- O lado do quadrado equivale a 1/10 do diâmetro da Lua cheia
- A área equivale a 0,000013 do total da área do céu (treze milionésimos)
- A imagem contém ~10.000 galáxias
- Extrapolando os limites de visibilidade do telescópio e da câmera, o número estimado de galáxias no **universo observável** é de **1-2 trilhões**

# Os elementos primordiais (H, He): um caso à parte

Esses elementos foram formados no universo primitivo, logo após o Big Bang

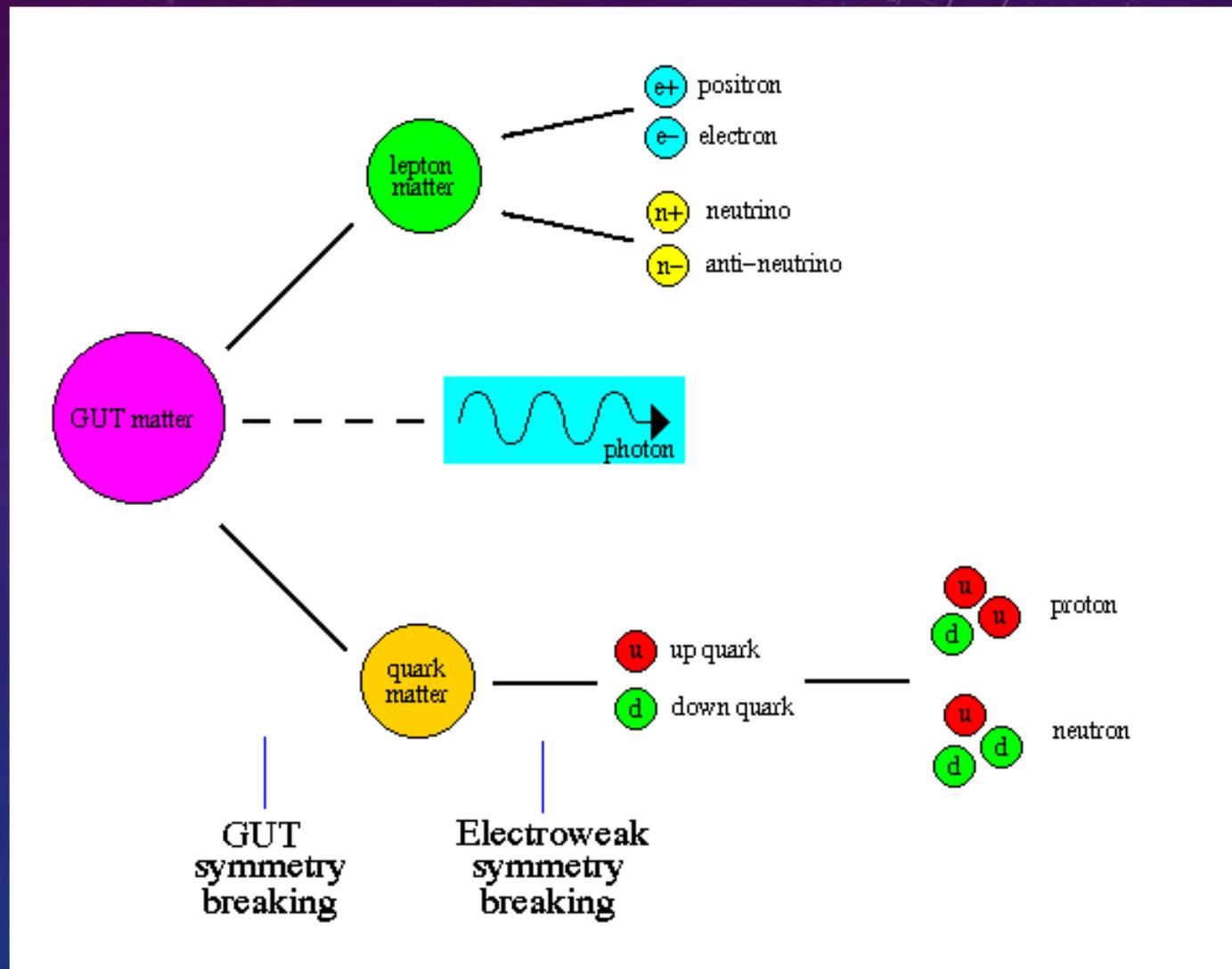
O Básico: Toda a matéria é constituída de **LÉPTONS** (elétrons, neutrinos) e **QUARKS** (formam os prótons, nêutrons, etc..). De onde eles se originam?

A origem: produção e aniquilação de pares:



## A evolução:

Quebras de simetria no universo primitivo levaram à formação da matéria como conhecemos. Tudo ocorreu nos **primeiros 4 minutos** após o BB!



# RESUMO DA HISTÓRIA DO UNIVERSO

Época	Tempo (após o Big-Bang)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Temperatura (K)	Característica principal
<b>Planck</b>	0 - 10 <sup>-43</sup> s	∞ - 10 <sup>95</sup>	∞ - 10 <sup>32</sup>	Física desconhecida Gravitação quântica 4 forças unificadas
<b>GUT</b>	10 <sup>-43</sup> – 10 <sup>-35</sup> s	10 <sup>95</sup> - 10 <sup>75</sup>	10 <sup>32</sup> - 10 <sup>17</sup>	Separação da força gravitacional 3 forças unificadas Matéria GUT Final da era GUT: separação da força forte da eletrofraca
<b>Hadrônica</b>	10 <sup>-35</sup> – 10 <sup>-4</sup> s	10 <sup>75</sup> - 10 <sup>16</sup>	10 <sup>17</sup> - 10 <sup>10</sup>	4 forças separadas Formação dos léptons, quarks e prótons e nêutrons (por produção de pares ou confinamento de quarks). T grande o suficiente para formar partículas de maior massa.
<b>Leptônica</b>	10 <sup>-4</sup> - 10 <sup>2</sup> s	10 <sup>16</sup> - 10 <sup>4</sup>	10 <sup>10</sup> - 10 <sup>4</sup>	Somente partículas leves (léptons) formam-se por produção de pares. Neutrinos desacoplam.

A resposta para a questão da origem dos elementos químicos além do hidrogênio e do hélio está sendo conseguida aos poucos e ao longo de muitas décadas:

**Um trecho do discurso de Hans Bethe, ao receber o Prêmio Nobel de Física de 1967:**

*How has it been possible for the Sun to emit light and heat without exhausting its source not only during the thousands of centuries the human race has existed but also during the enormously long time when living beings needing the sun for their nourishment have developed and flourished on our Earth thanks to this source?*

- **1920:** Arthur S. Eddington sugere que a fusão nuclear poderia ser a fonte de energia das estrelas
- **1925:** Cecilia Payne demonstra que o Sol é feito basicamente de hidrogênio e hélio
- **1939:** Hans Bethe descreve as duas maneiras do H fundir-se em He: o ciclo proton-proton e o ciclo CNO
- **1957:** artigo B<sup>2</sup>FH (Burbidge, Burbidge, Fowler, Hoyle), explicando as principais cadeias de nucleossíntese estelar

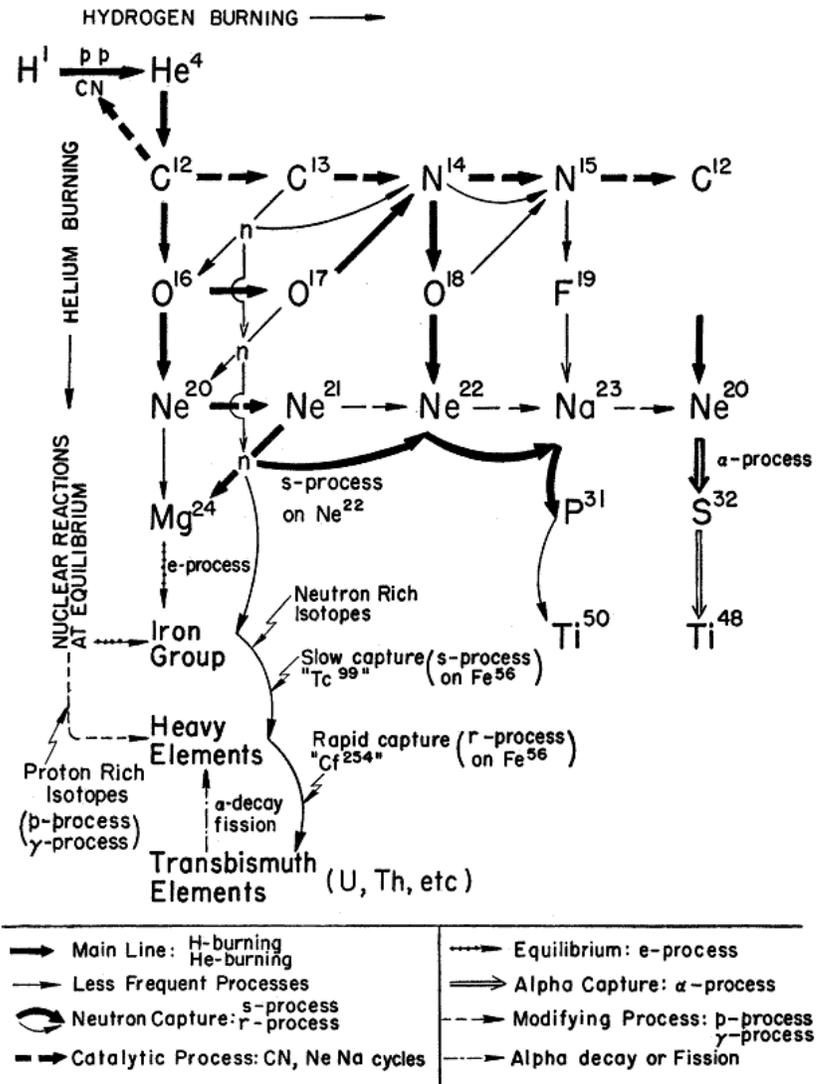
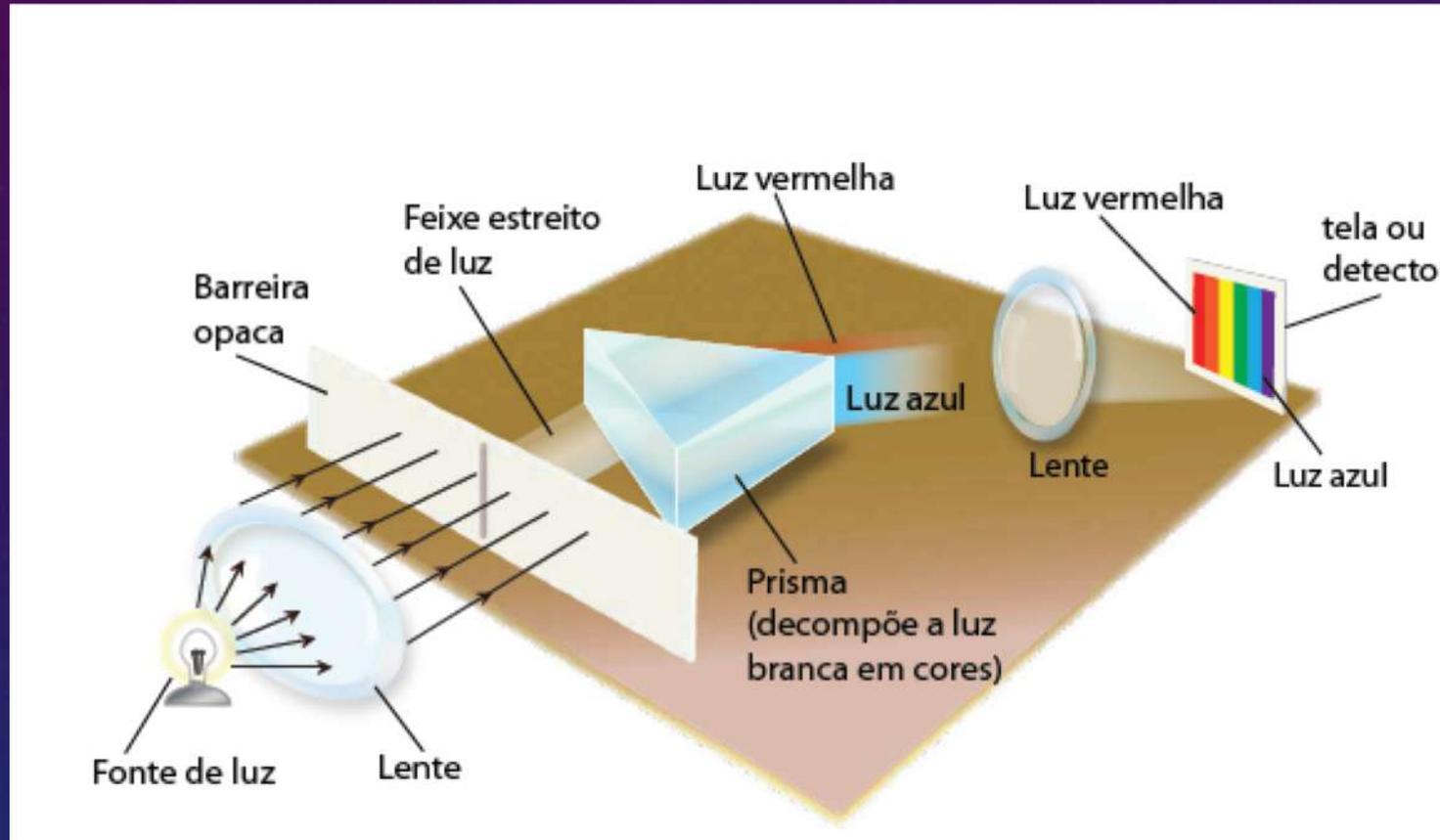


FIG. 1,2. A schematic diagram of the nuclear processes by which the synthesis of the elements in stars takes place. Elements synthesized by interactions with protons (hydrogen burning) are listed horizontally. Elements synthesized by interactions with alpha particles (helium burning) and by still more complicated processes are listed vertically. The details of the production of all of the known stable isotopes of carbon, nitrogen, oxygen, fluorine, neon, and sodium are shown completely. Neutron capture processes by which the highly charged heavy elements are synthesized are indicated by curved arrows. The production of radioactive  $Tc^{99}$  is indicated as an example for which there is astrophysical evidence of neutron captures at a slow rate over long periods of time in red giant stars. Similarly  $Cf^{254}$ , produced in supernovae, is an example of neutron synthesis at a rapid rate. The iron group is produced by a variety of nuclear reactions at equilibrium in the last stable stage of a star's evolution.

Uma figura do artigo B<sup>2</sup>FH publicado em 1957, descrevendo as cadeias de nucleossíntese

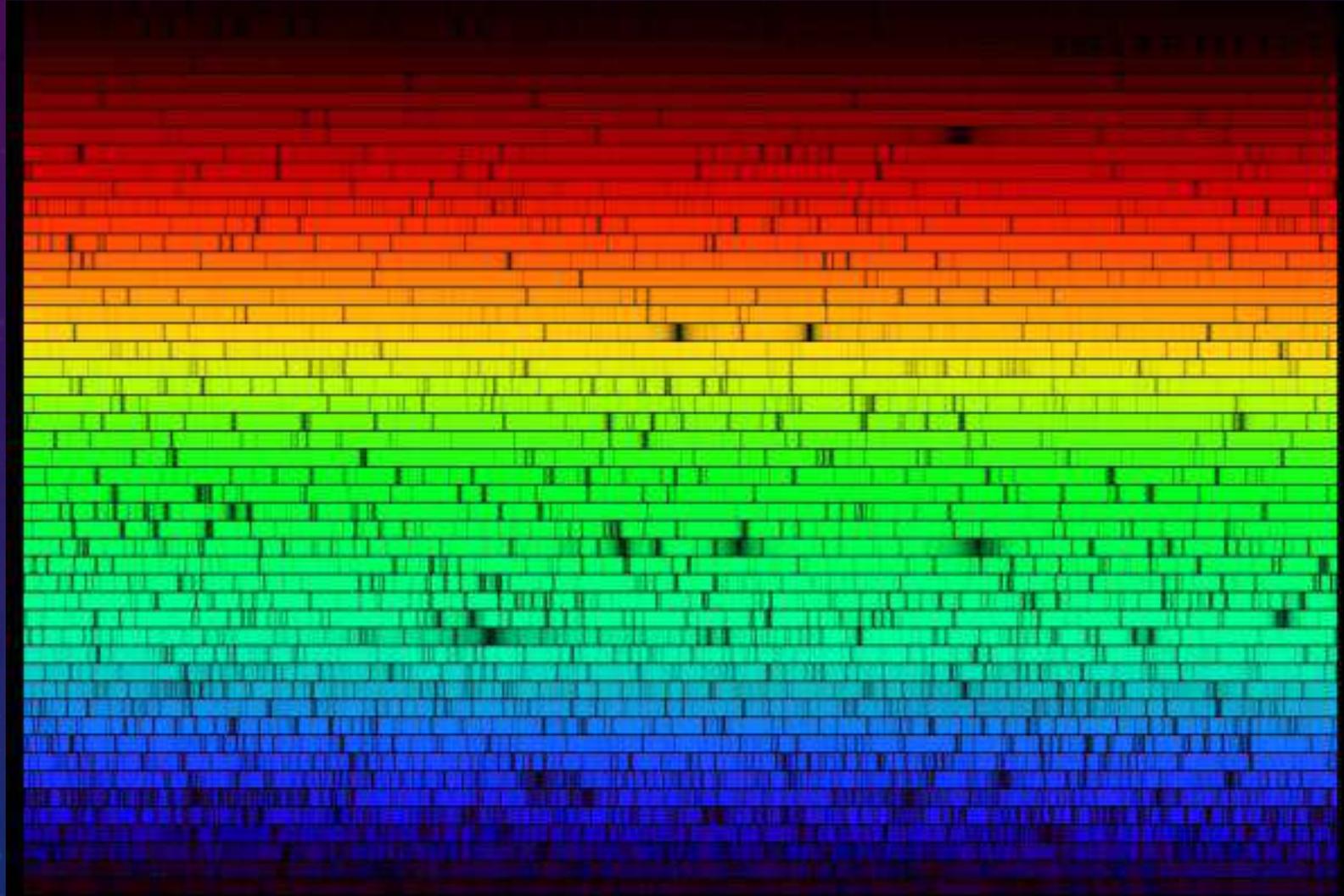
# COMO OBTER ESSAS RESPOSTAS? PELA ESPECTROSCOPIA!

(OU, EM OUTRAS PALAVRAS, COMO DEMONSTRAR QUE BLAISE PASCAL ESTAVA ERRADO?)



A decomposição da luz em suas cores dá ao astrônomo a possibilidade de estudar distintas propriedades dos corpos celestes tais como composição química e velocidade em relação a nós

# Exemplo de um espectro com linhas de absorção: a luz do Sol decomposta por um espectrógrafo



## Exemplo de um espectro com linhas de emissão: a coroa solar

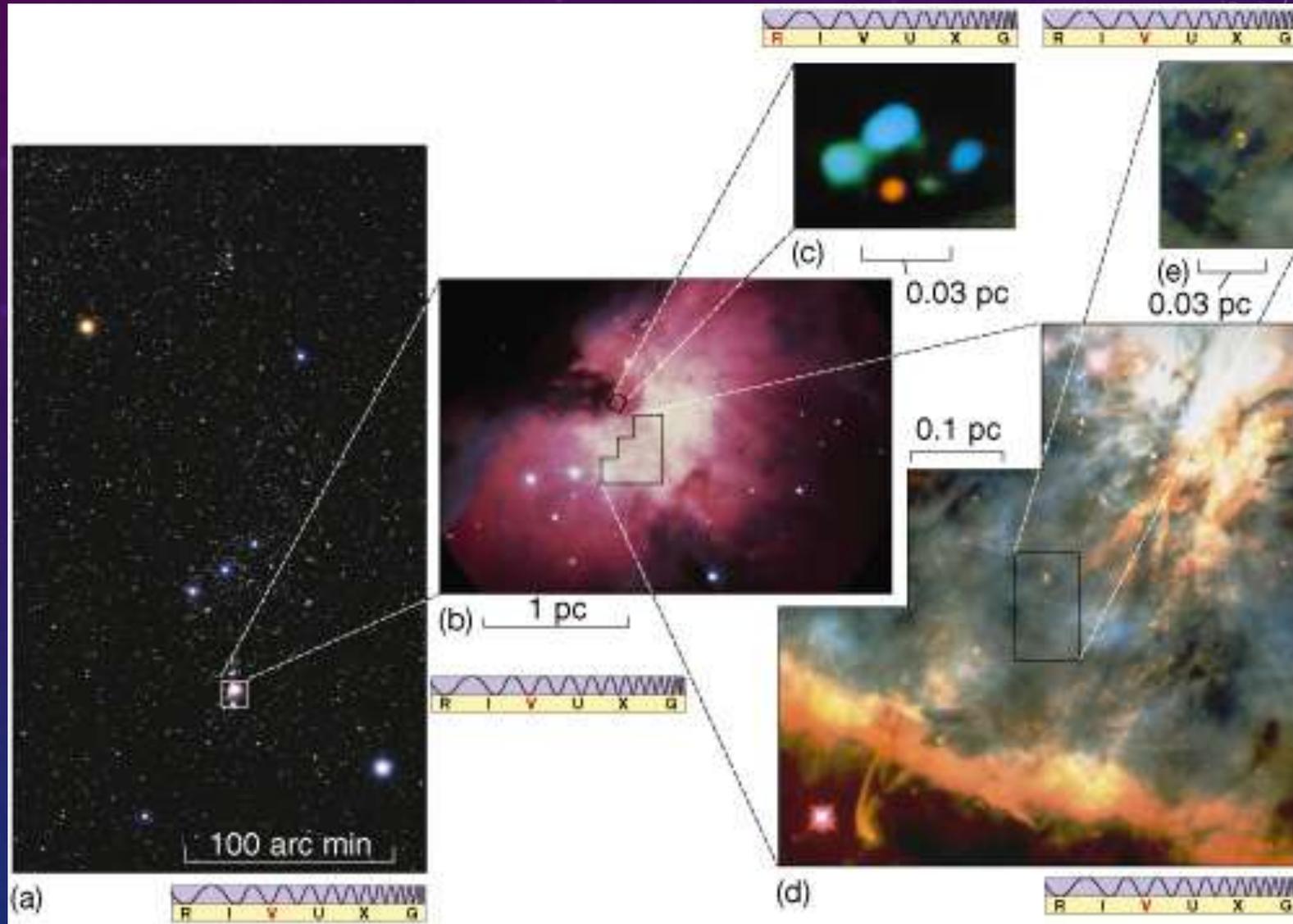


He

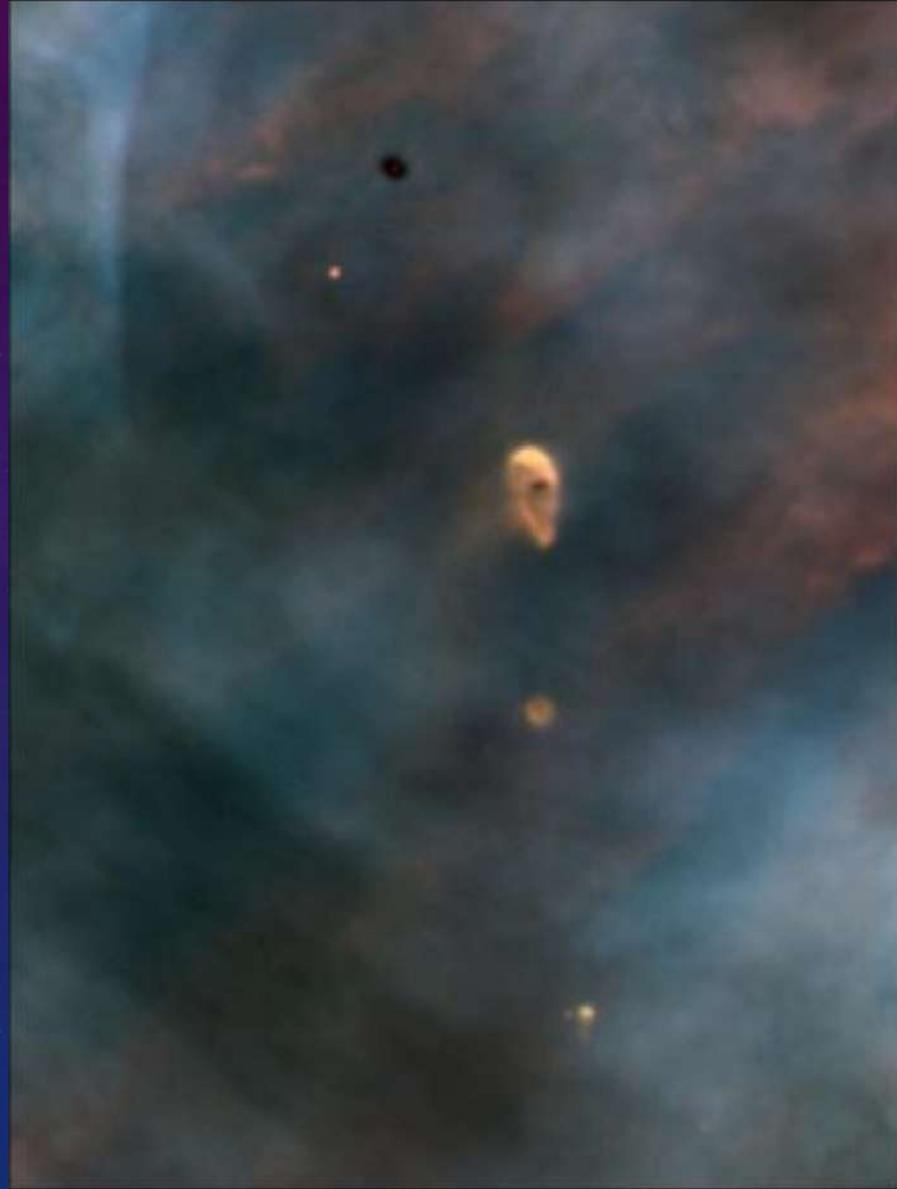


Descoberto por Joseph  
Lockyer em 1868

# O COMEÇO: ONDE SE FORMAM AS ESTRELAS ?

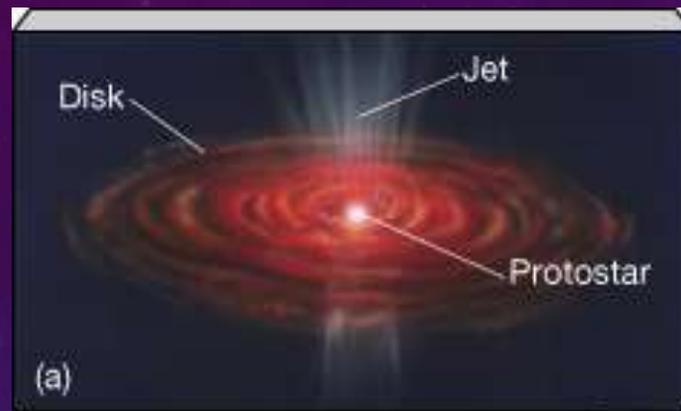


# UMA PROTO-ESTRELA



# Como se forma uma estrela ?

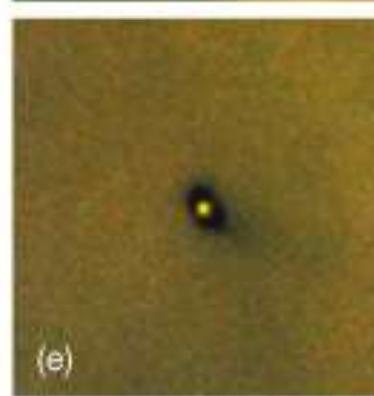
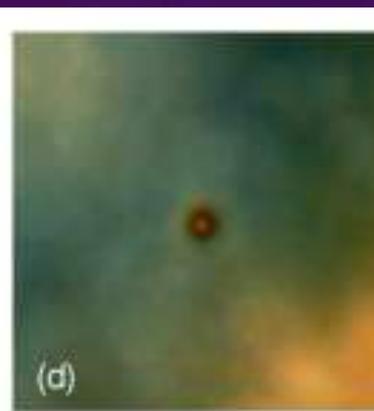
A protoestrela e seu disco



A ignição da estrela



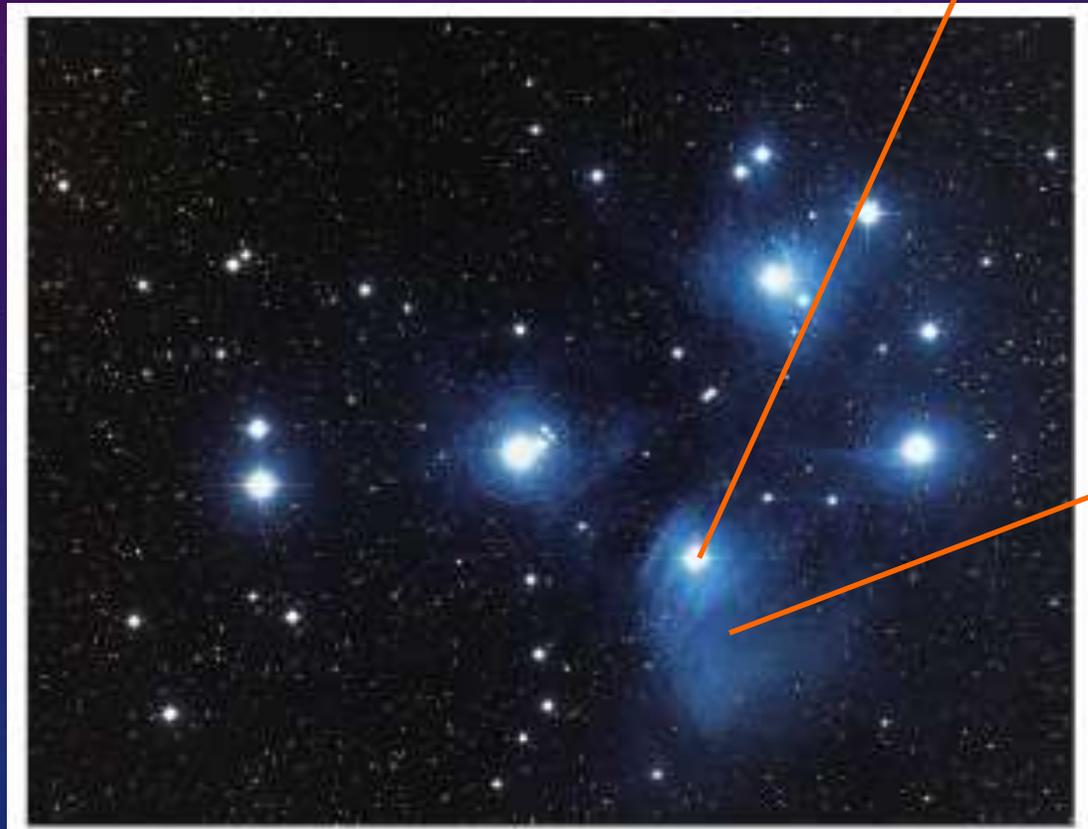
Vento estelar varre o disco



Concepção artística

# ESTRELAS NO BERÇÁRIO: AS PLÊIADES

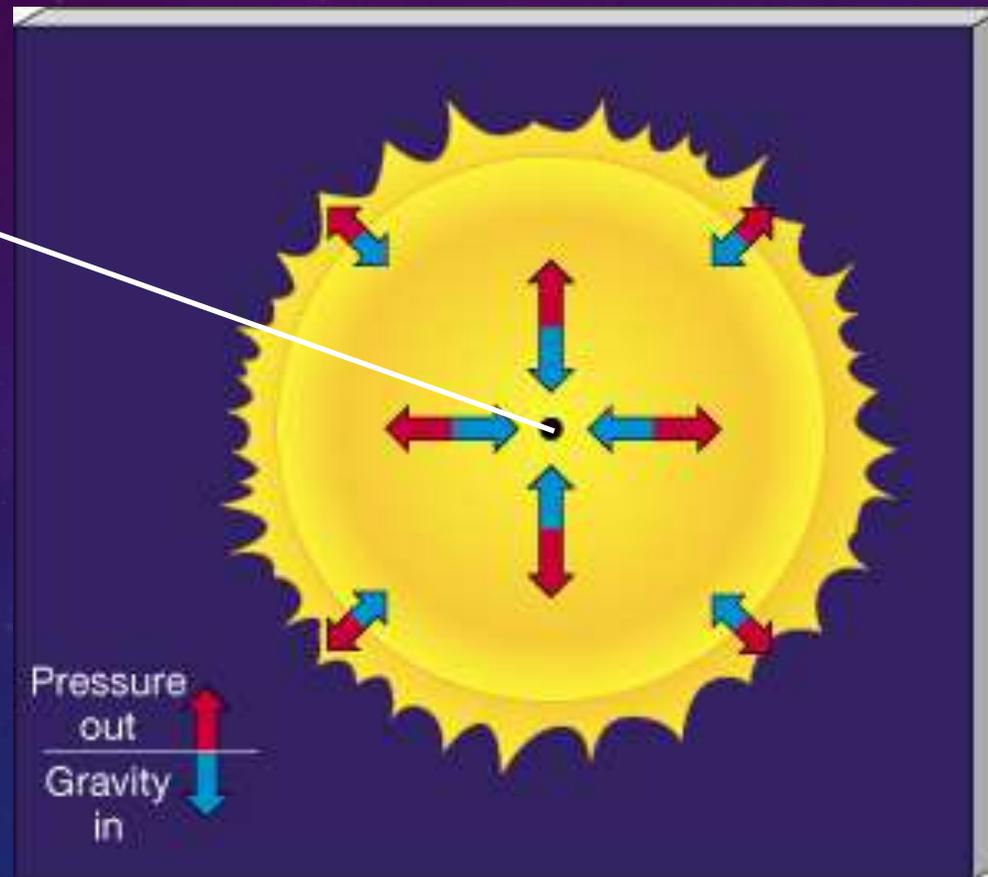
O bebê



A placenta

# COMO FUNCIONAM AS ESTRELAS?

Fusão termonuclear  
de hidrogênio



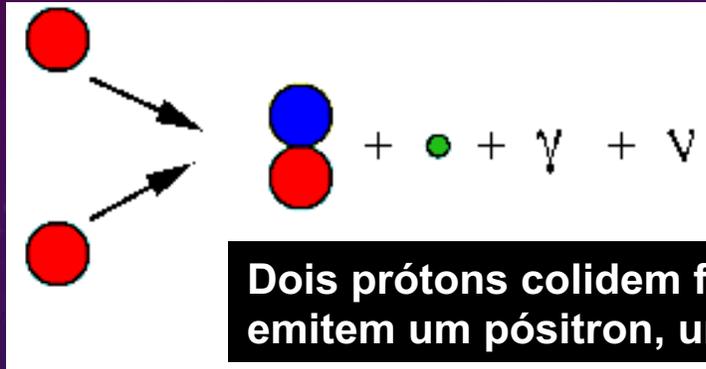
Num estado estacionário de “queima” de material nuclear, o equilíbrio Pressão de Radiação X Gravidade em toda a estrutura interna garante a estabilidade da estrutura

# MAS ATENÇÃO! É NOS NÚCLEOS ESTELARES QUE AS COISAS ACONTECEM!

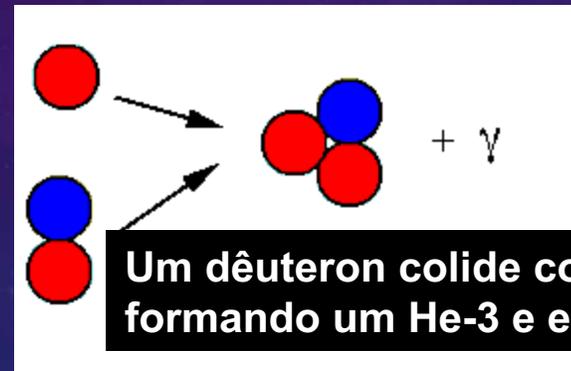
Um exemplo: o núcleo do Sol

- Cerca de 20% do raio ( $\sim 0.8\%$  do volume, 34% da massa)
- Temperatura:  $1.57 \times 10^7$  K
- Densidade:  $162 \text{ g/cm}^3$
- Pressão: 265 Gbar (260 bilhões de atm)
- É onde ocorre a produção de energia e a síntese dos elementos químicos

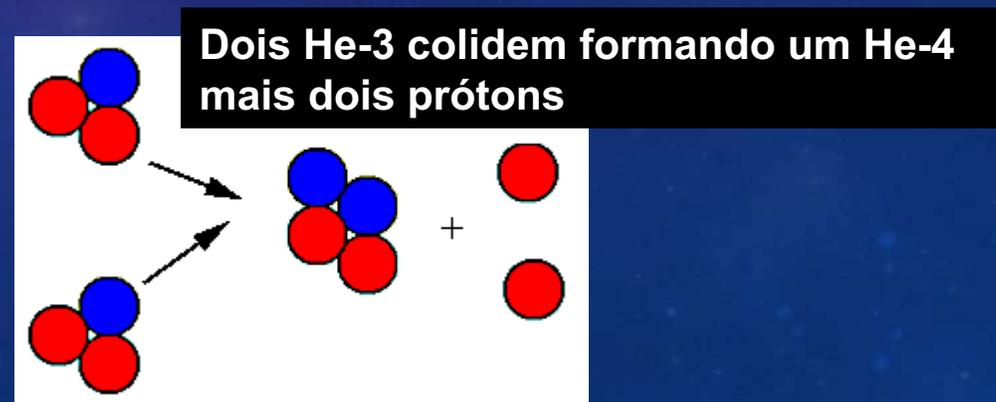
# A FUSÃO DO H: O CICLO PRÓTON - PRÓTON



Dois prótons colidem formando um dêuteron e emitem um pósitron, um raio gama e um neutrino

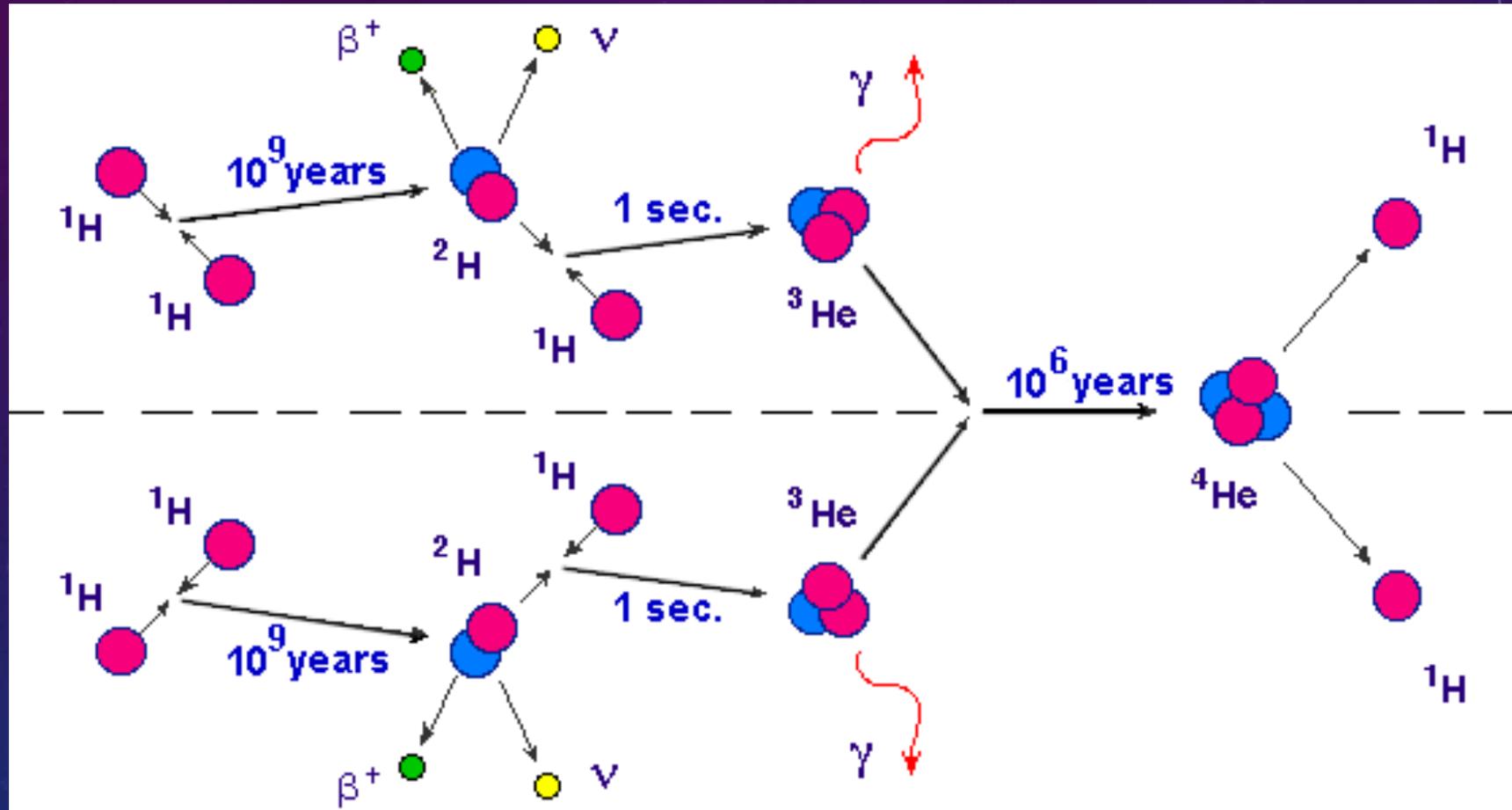


Um dêuteron colide com um próton formando um He-3 e emitindo um raio gama



Dois He-3 colidem formando um He-4 mais dois prótons

# Esquemáticamente:



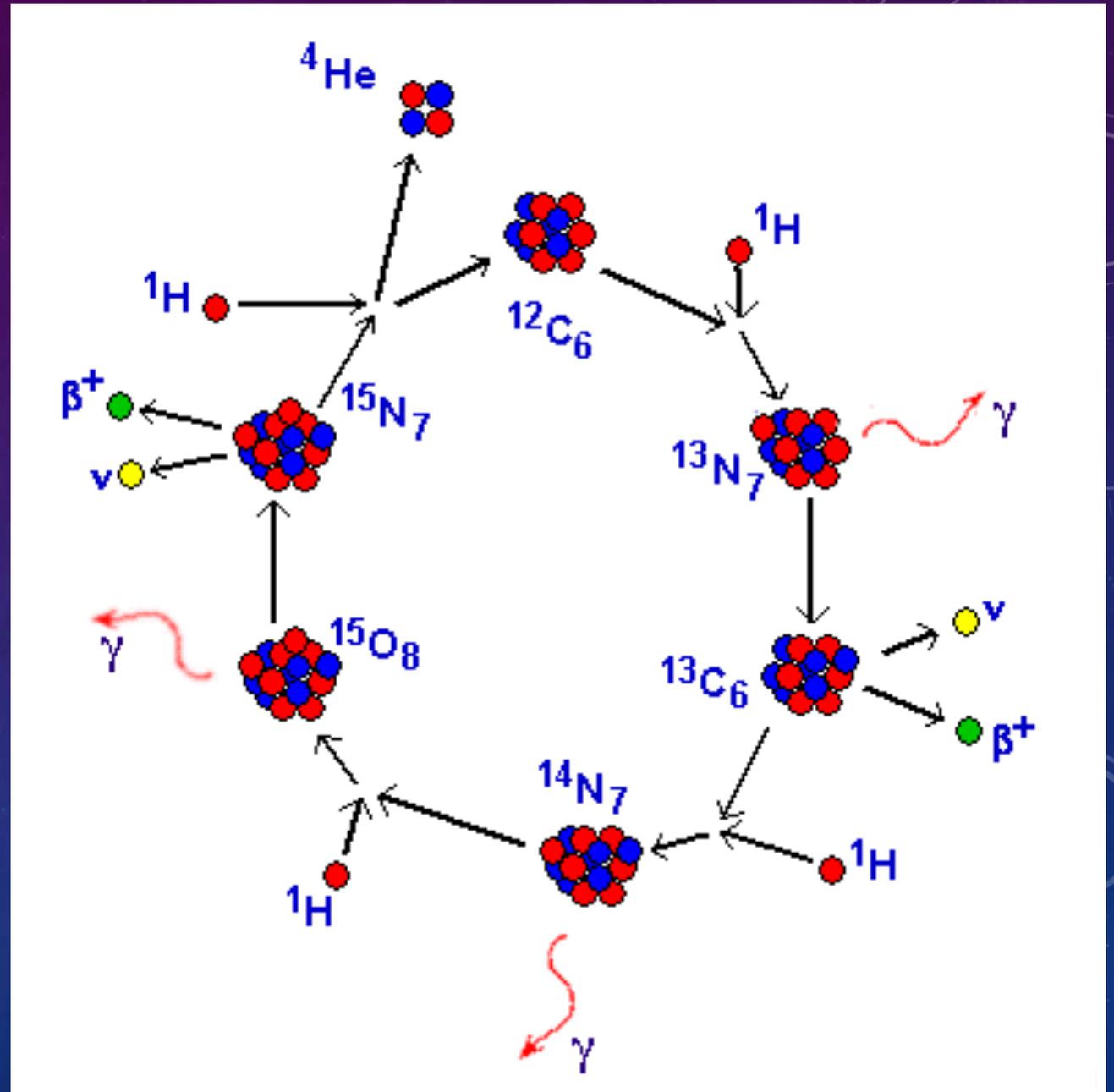
# QUAL O BALANÇO ENERGÉTICO DESTA REAÇÃO?

- $H^1$ : 1.007852  $\Rightarrow 4 H^1 = 4.031408$
- $He^4$ : 4.002603
  - $\rightarrow$  diferença: 0.028805 (0.7 % da massa)
  - $\rightarrow$  usando  $E=mc^2 \Rightarrow 26.73 \text{ MeV}$
- O caso do Sol:
  - $\rightarrow$  Luminosidade:  $4 \times 10^{33} \text{ erg/s}$
  - $\rightarrow$  Massa total:  $2 \times 10^{33} \text{ g} \Rightarrow 1.8 \times 10^{54} \text{ ergs}$
  - $\rightarrow$  Assumindo conversão de 0.7 % da massa:  $1.52 \times 10^{52} \text{ ergs}$
  - $\rightarrow$  Tempo de vida:  $T = \frac{1.52 \times 10^{52}}{4 \times 10^{33}} = 3 \times 10^{18} \text{ s} = 10^{11} \text{ anos}$

OUTRA POSSIBILIDADE:  
O CICLO CNO



Ocorre em estrelas mais massivas, cujo núcleo é mais quente. É mais eficiente que o ciclo p-p para estrelas com mais de 1.4 Msol



# Lítio, Berílio e Boro (LiBeB) : um caso particular

Estes elementos são **destruídos** nos interiores estelares por captura de prótons:



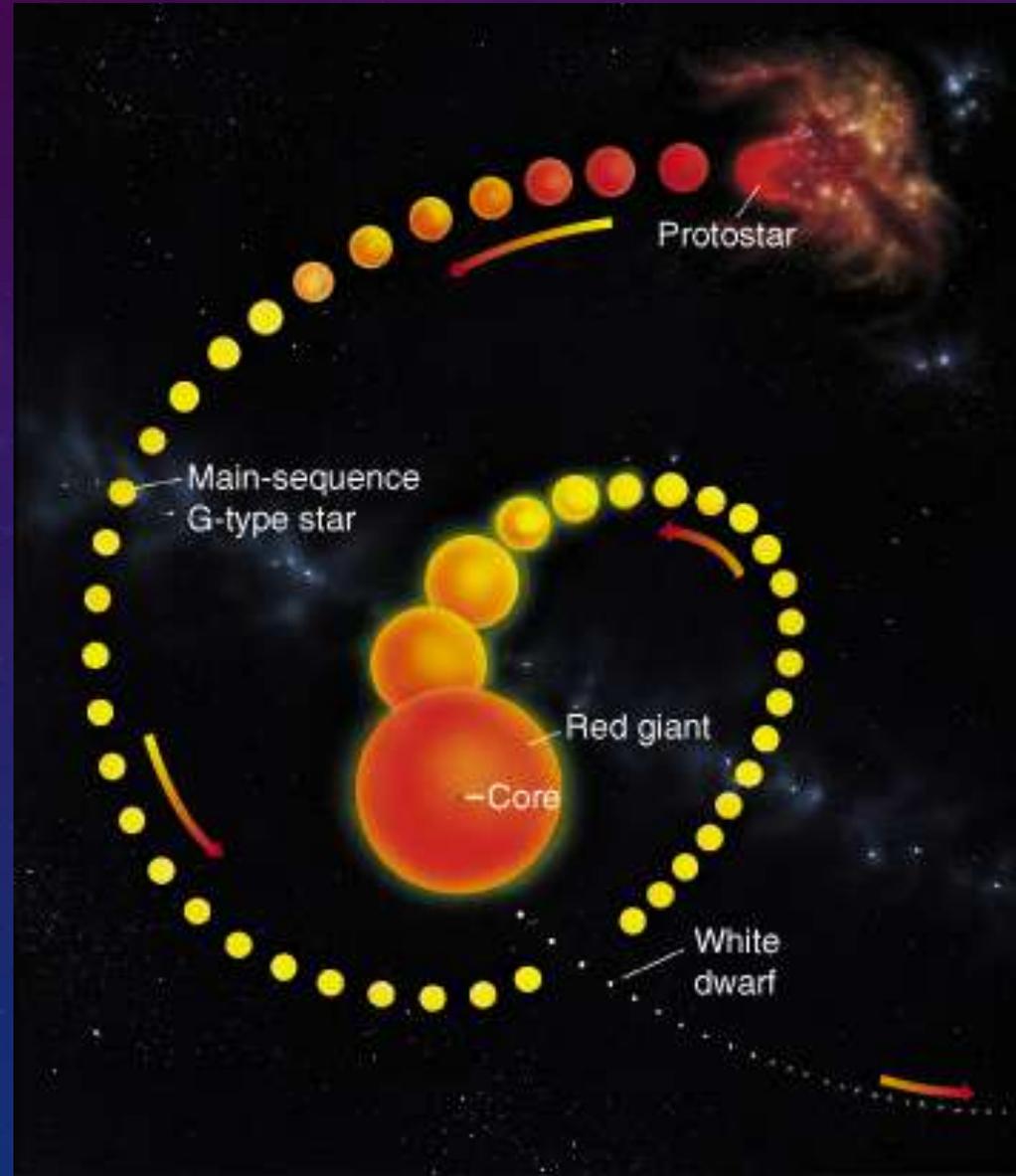
Origem: processos de **espalação** ocorridos no meio interestelar:

fragmentação de núcleos pesados que compõem os raios cósmicos pelas colisões com átomos do gás interestelar ou, inversamente, a fragmentação de átomos pesados interestelares pelas colisões com raios cósmicos leves

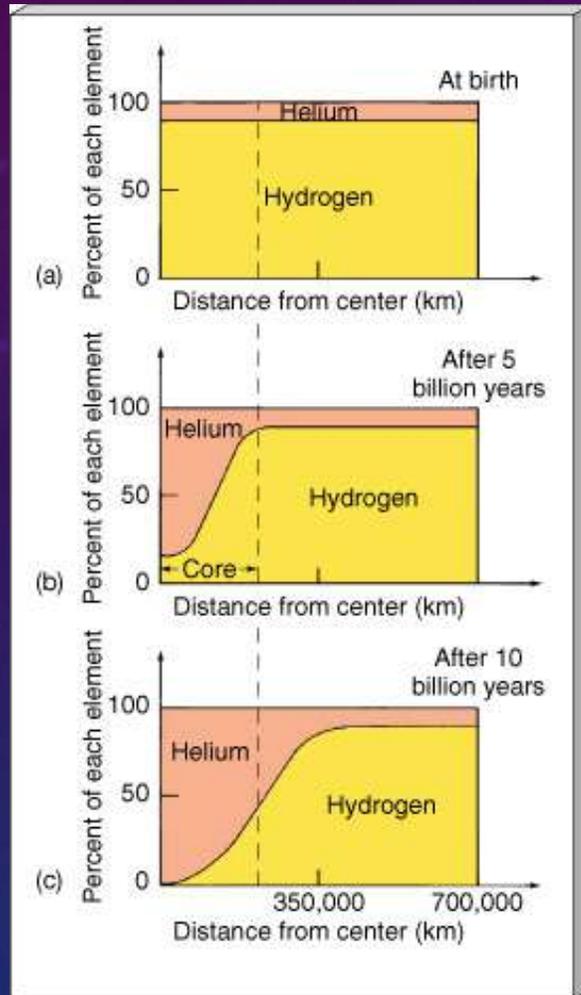
Obs: “raios cósmicos” são *matéria* e não *radiação*!

Estes elementos são  $10^5$  a  $10^6$  vezes menos abundantes que outros de massas atômicas próximas como C, N, O

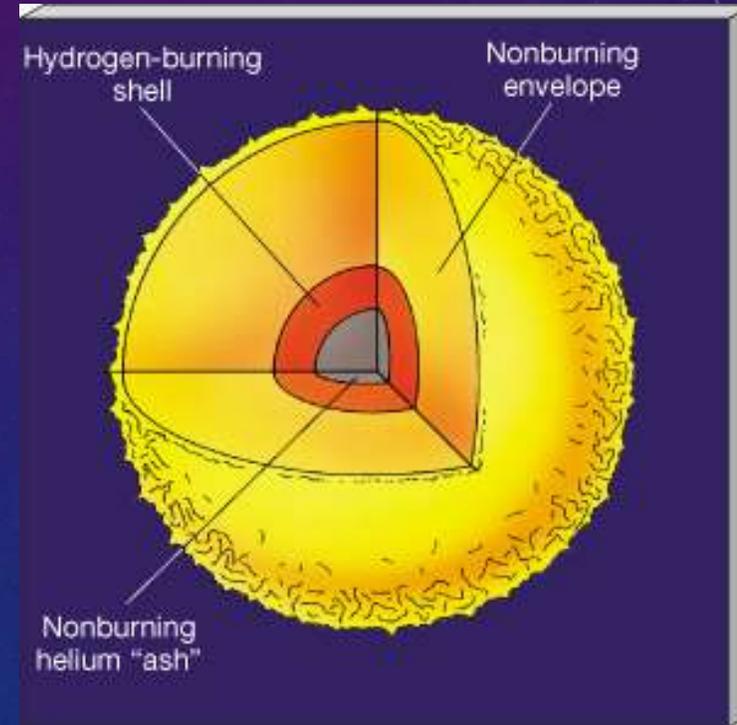
# A evolução de uma estrela como o Sol



# O CICLO EVOLUTIVO DE UMA ESTRELA

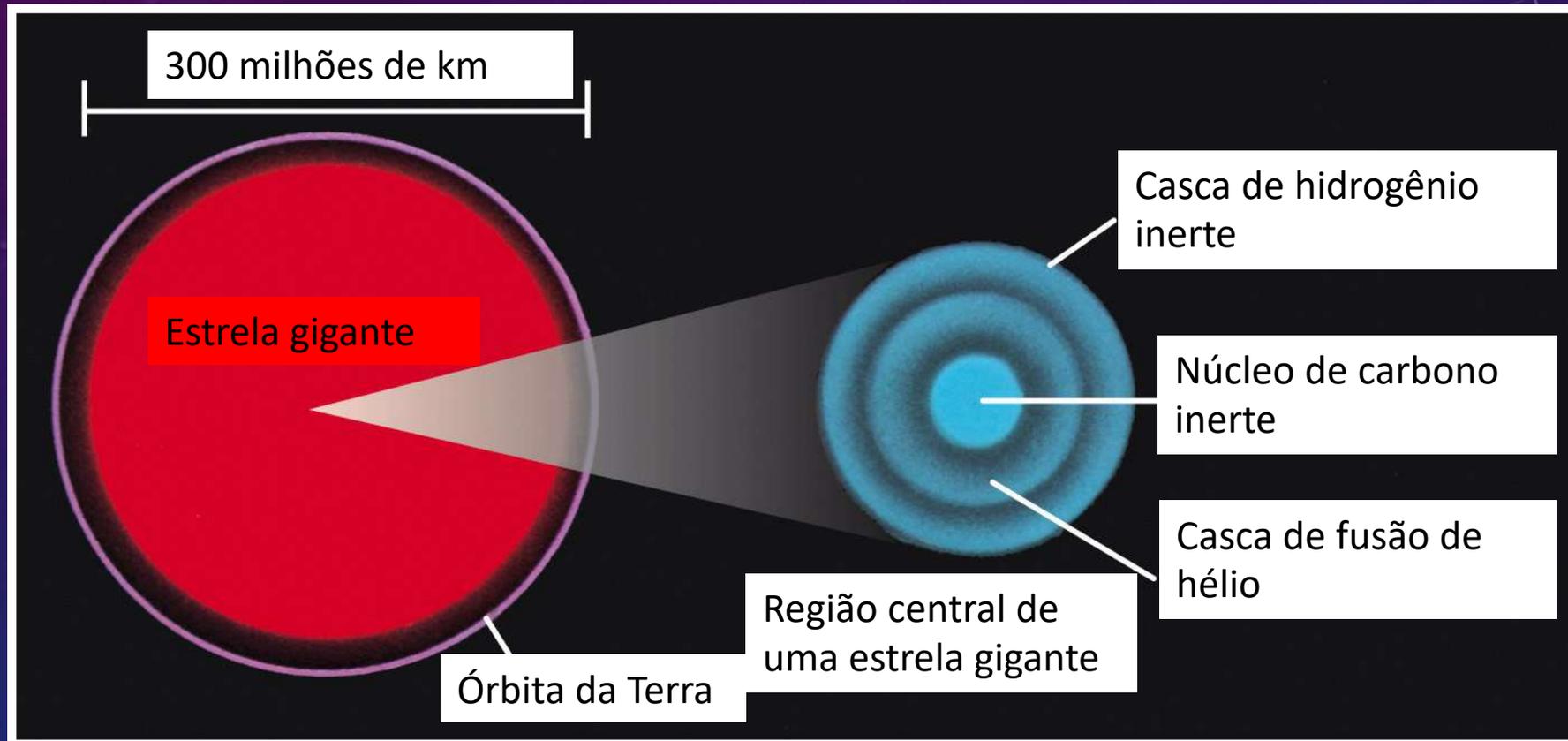


A evolução da abundância de He num núcleo estelar

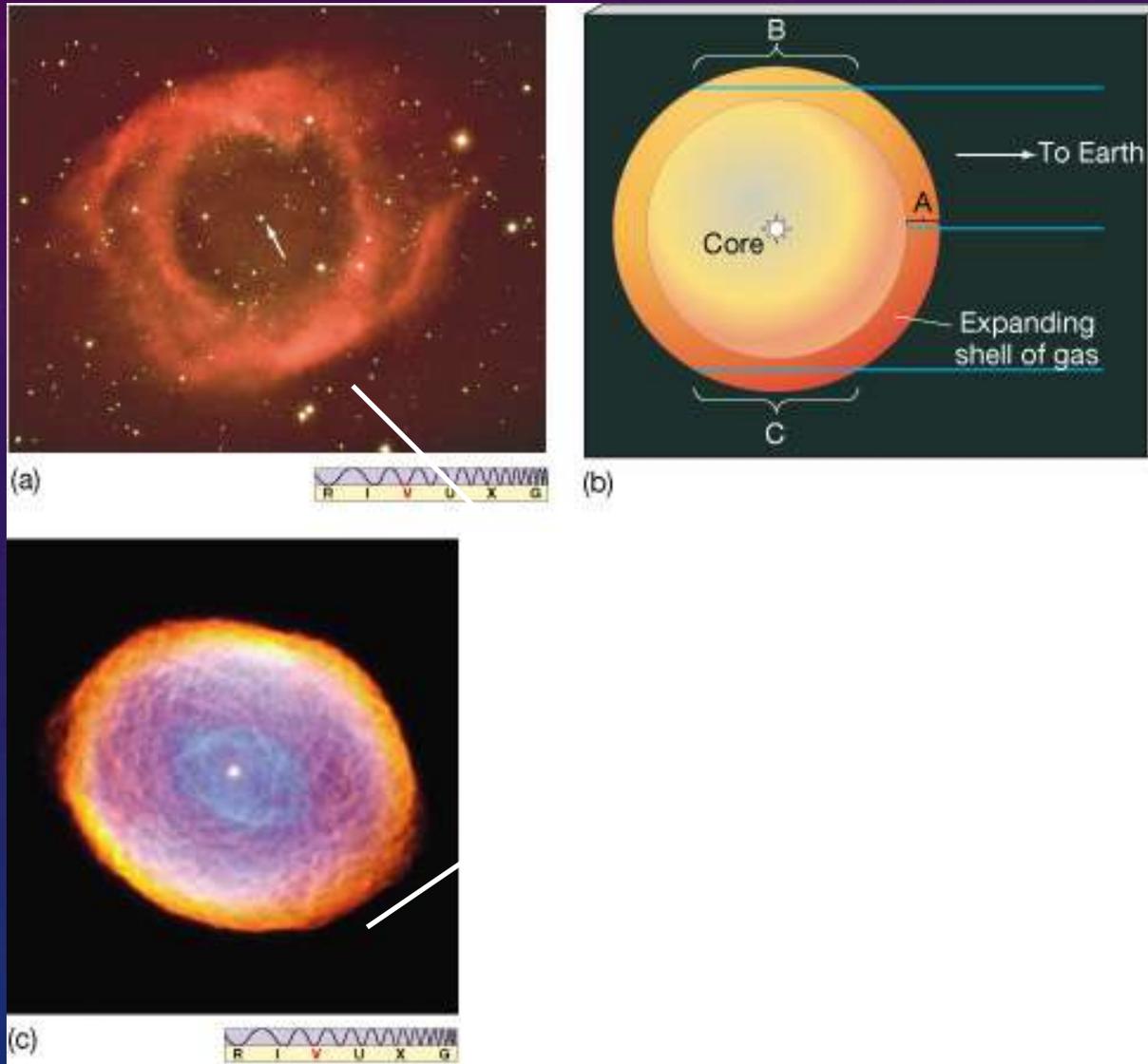


O interior da estrela ao final de seu ciclo evolutivo

# Os estágios avançados de evolução estelar: uma estrela gigante

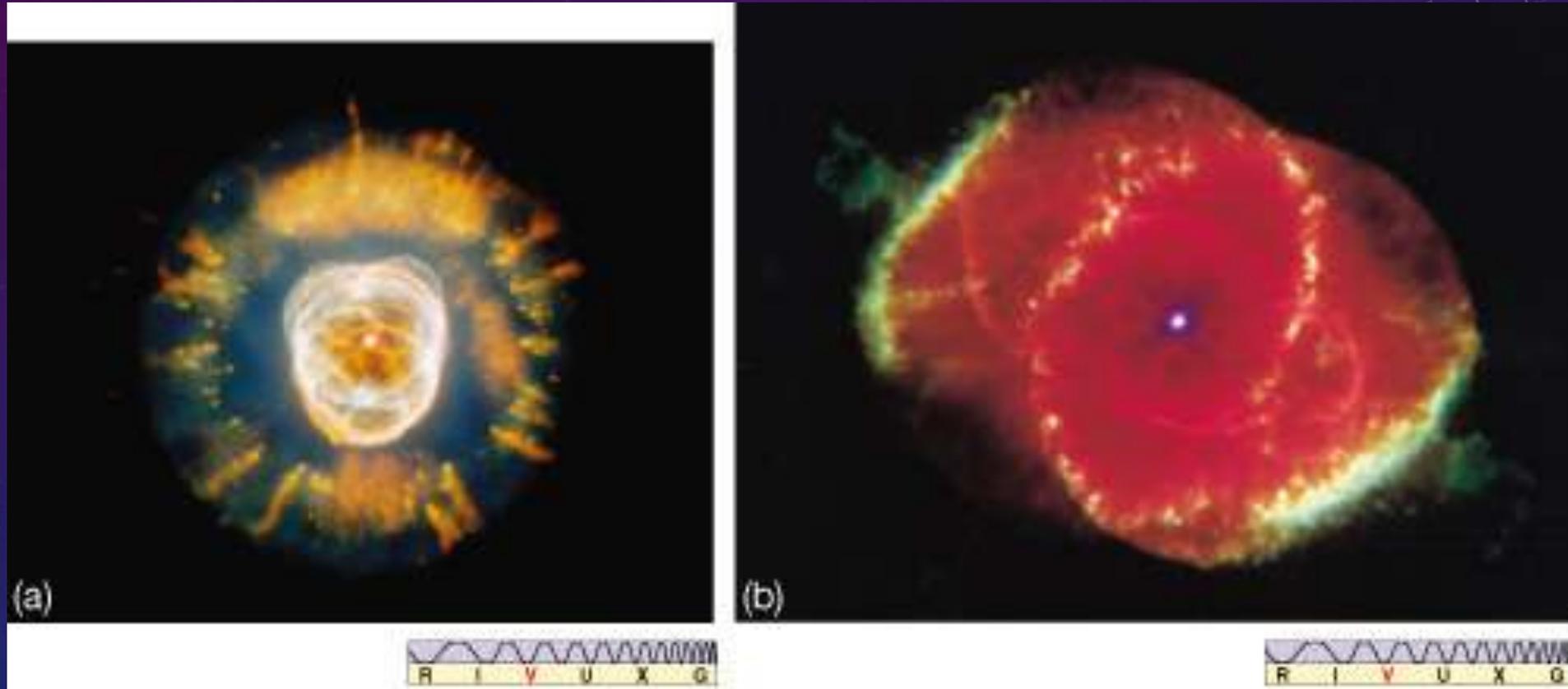


# O FINAL DE UMA ESTRELA DE BAIXA MASSA COMO O SOL

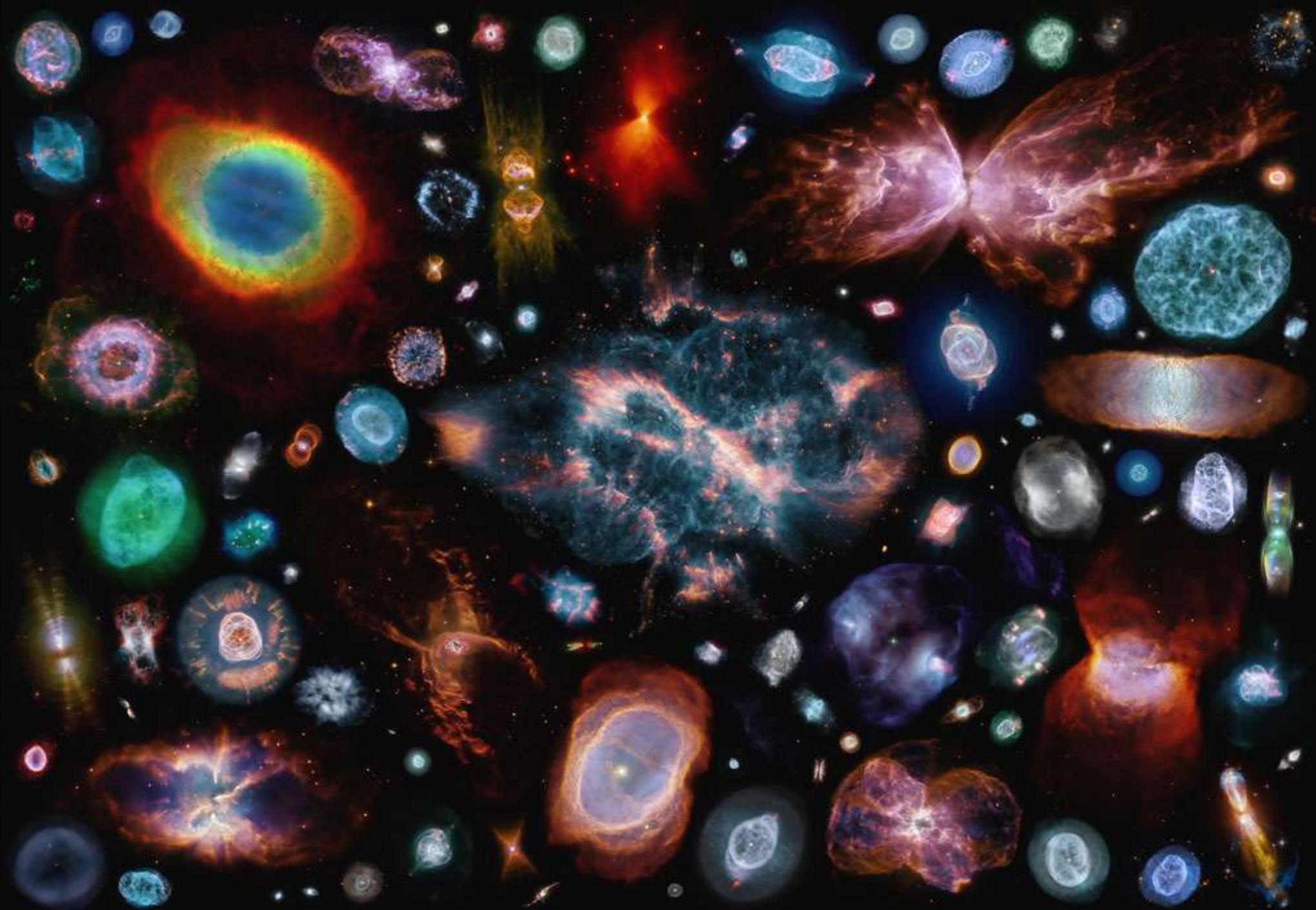


# Nebulosas planetárias

Através da ejeção das nebulosas planetárias, o material processado no interior das estrelas de massas intermediárias (0.8 a 8  $M_{\text{sol}}$ ) é dispersado no meio interestelar, vindo a enriquecer futuras gerações de estrelas



Atenção, o nome “**nebulosa planetária**” nada tem a ver com planetas. Ele se deve ao fato de que, vistas com os antigos telescópios do século 19 quando foram descobertas, essas nebulosas lembravam os planetas Urano e Netuno (esferíodes de aparência difusa)



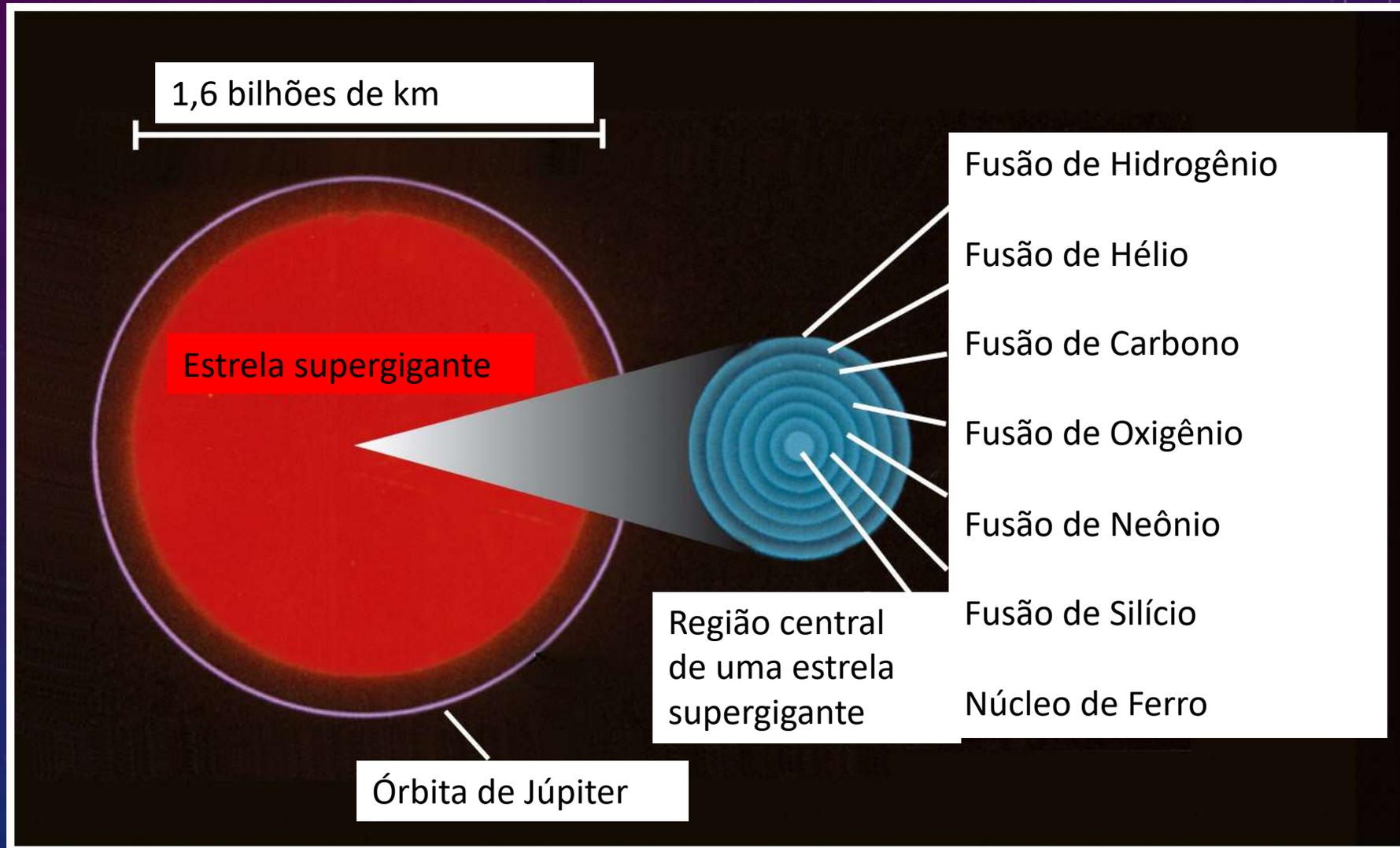
**Nebulosas planetárias**

As formas estão associadas aos processos de formação

Os tamanhos estão relacionados às idades

As cores indicam a presença de distintos elementos químicos

# Uma supergigante: a evolução das estrelas massivas



## ESQUEMATIZANDO:

**Fusão de H**



**He**

**Fusão de He**



**C, O**

**Fusão de C, O, Ne**



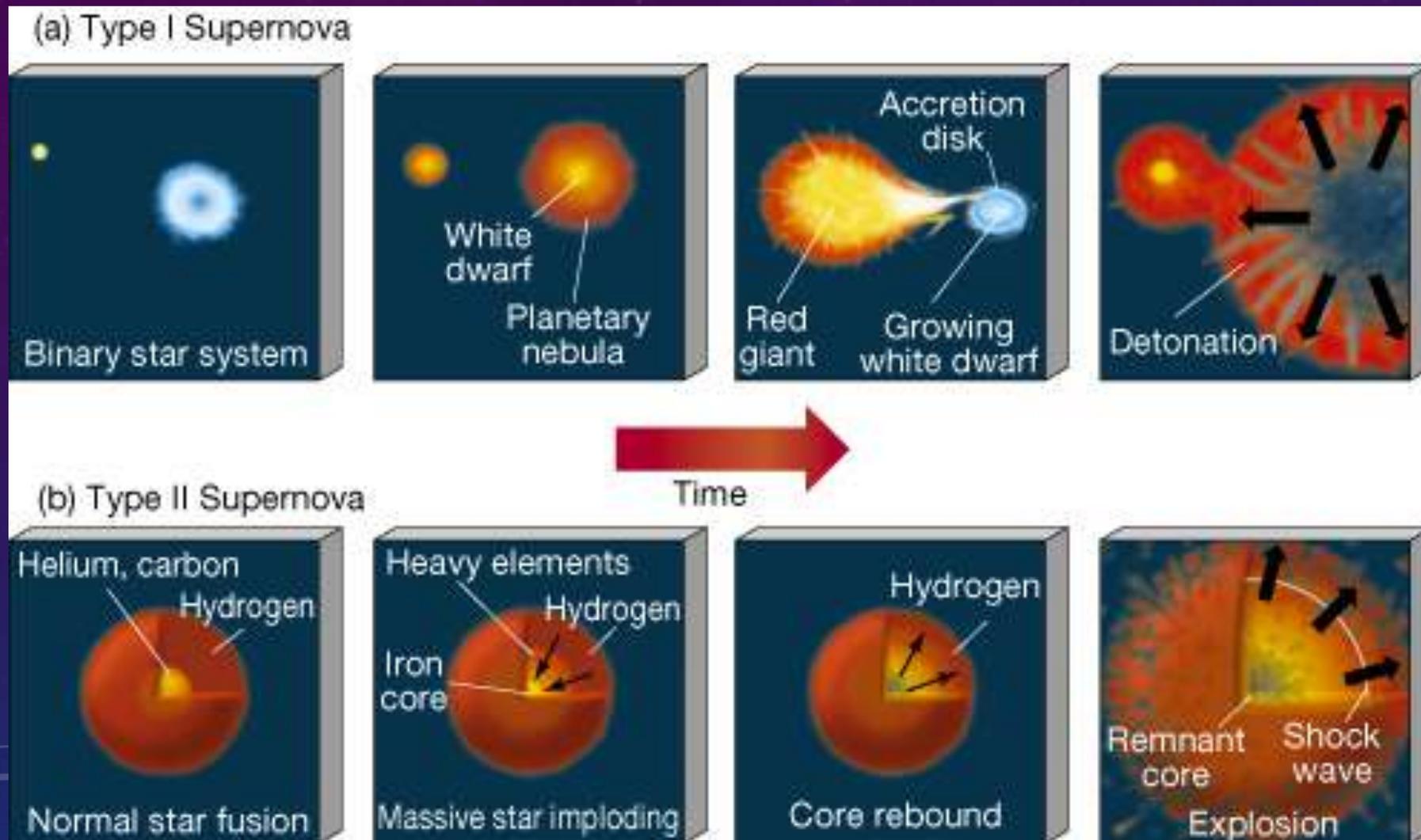
**$16 < A < 28$  (Oxigênio → Silício)**

**Fusão de Si**



**$28 < A < 60$  (Silício → Cobalto)**

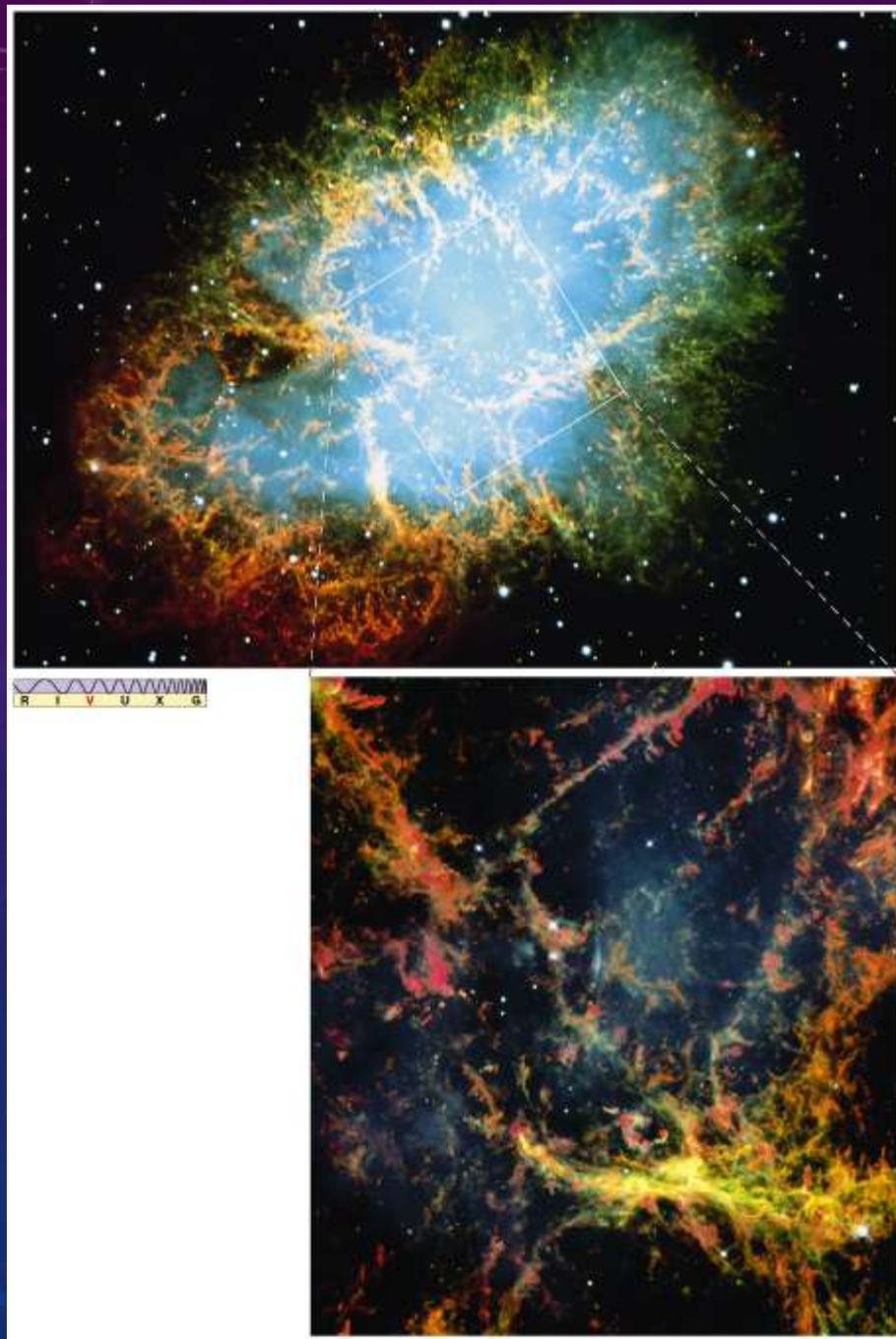
# O final da vida de uma estrela massiva: As Supernovas e a síntese dos elementos mais pesados que o Fe



Tipo Ia: evolução de um sistema binário

Tipo II: evolução de uma estrela massiva isolada

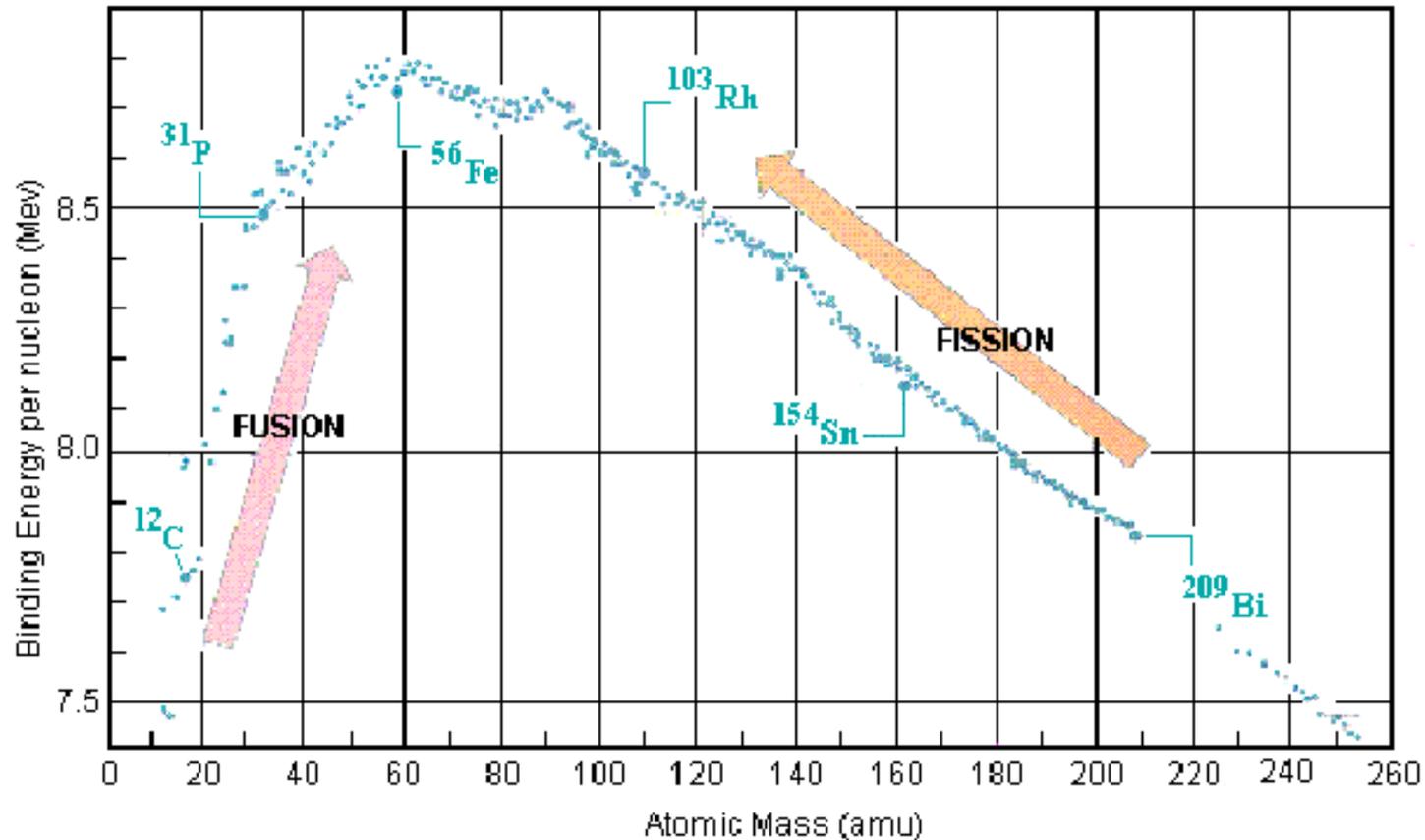
**Nebulosa do Caranguejo, um remanescente de supernova**



A explosão da supernova ocorreu no ano de 1054 e foi descrita por astrônomos chineses

## Como são produzidos os elementos mais pesados que o Fe ?

A energia de ligação por núcleon (elemento do núcleo atômico), que é a fonte da energia nuclear, passa a diminuir e a fusão deixa de ser exotérmica



# Fabricando os elementos além do Fe : a captura de nêutrons

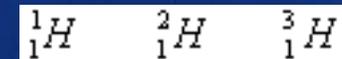
O processo-s (nos núcleos das estrelas supermassivas):

Slow: captura lenta de nêutrons

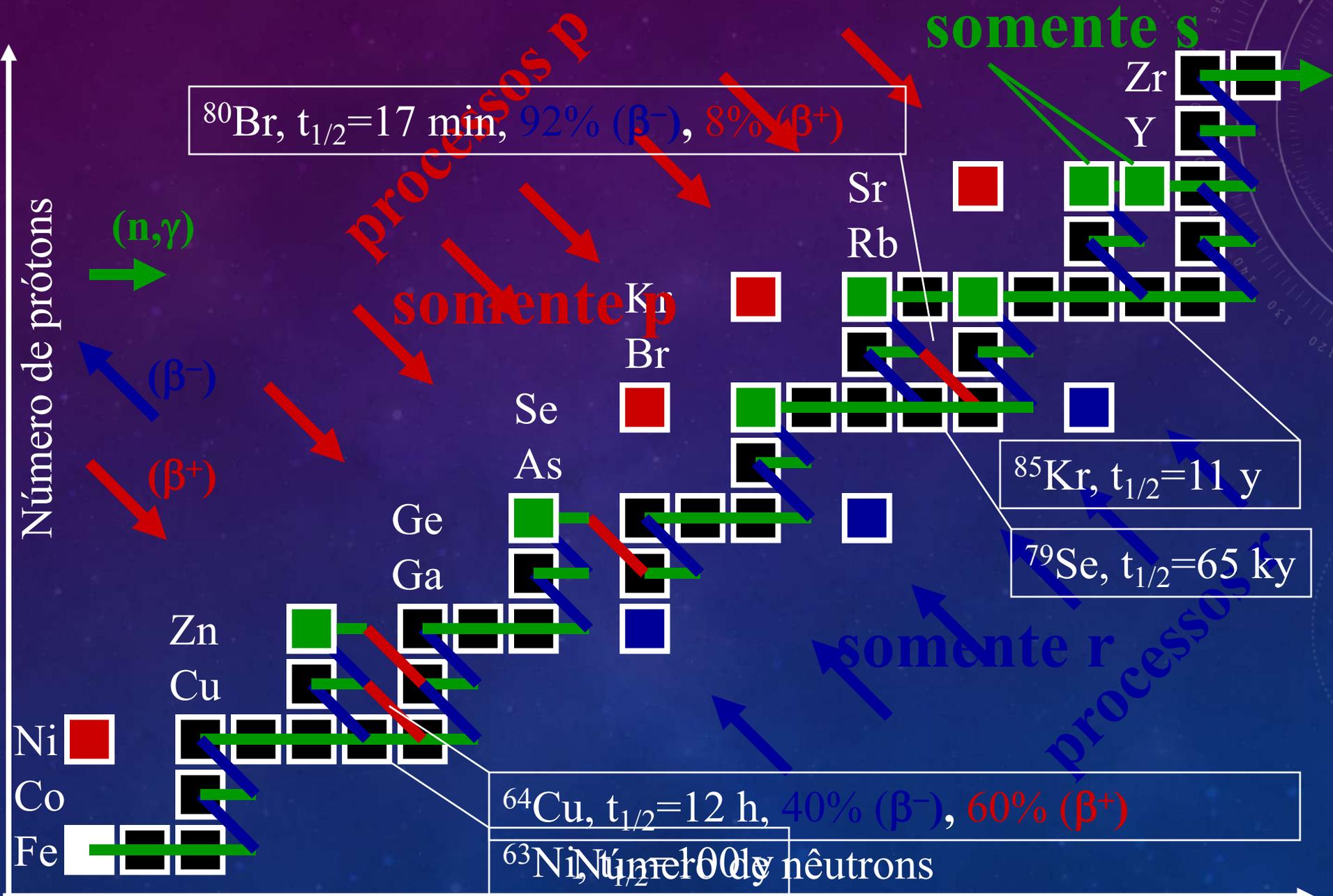


... e assim sucessivamente, até o  ${}^{209}\text{Bi}$ . Elementos mais pesados não podem ser fabricados assim porque decaem no  ${}^{209}\text{Bi}$  antes que outro nêutron seja capturado

Relembrando: isótopos de um mesmo elemento têm o mesmo número atômico, porém diferentes massas atômicas. Um exemplo simples é o hidrogênio, que tem 3 isótopos:



THE S-PROCESS (por Rene Reifarth)



## Como são fabricados os elementos mais massivos ?

O processo-r: captura rápida de nêutrons  
(ocorre durante a explosão das supernovas):

**Durante os 15 primeiros minutos** da explosão de uma supernova (colapso do núcleo de uma estrela com massa inicial maior que 10 Msol) a quantidade de nêutrons livres é tão grande que permite a formação de configurações nucleares estáveis mais pesadas.

→ assim são formados os elementos mais massivos da Tabela Periódica

# Uma visão diferente da Tabela Periódica: a origem de cada elemento

H 1		Big Bang										Cosmic Ray Spallation										He 2													
Li 3		Be 4		Low Mass Stars										Exploding Massive Stars																					
Na 11		Mg 12		Exploding White Dwarfs										Exploding Neutron Stars?																					
K 19		Ca 20		Nuclear Decay										Not Naturally Occuring																					
B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18	Kr 36	Se 34	As 33	Ge 32	Ga 31	Zn 30	Cu 29	Ni 28	Co 27	Fe 26	Mn 25	Cr 24	V 23	Ti 22	Sc 21	Ca 20	K 19							
Xe 54	I 53	Te 52	Sb 51	Sn 50	In 49	Cd 48	Ag 47	Pd 46	Rh 45	Ru 44	Tc 43	Mo 42	Nb 41	Zr 40	Y 39	Sr 38	Rb 37	Xe 54	I 53	Te 52	Sb 51	Sn 50	In 49	Cd 48	Ag 47	Pd 46	Rh 45	Ru 44	Tc 43	Mo 42	Nb 41	Zr 40	Y 39	Sr 38	Rb 37
Rn 86	At 85	Po 84	Bi 83	Pb 82	Tl 81	Hg 80	Au 79	Pt 78	Ir 77	Os 76	Re 75	W 74	Ta 73	Hf 72	Ba 56	Cs 55	Rn 86	At 85	Po 84	Bi 83	Pb 82	Tl 81	Hg 80	Au 79	Pt 78	Ir 77	Os 76	Re 75	W 74	Ta 73	Hf 72	Ba 56	Cs 55		
Og 118	Ts 117	Lv 116	Mc 115	Fl 114	Nh 113	Cn 112	Rg 111	Ds 110	Mt 109	Hs 108	Bh 107	Sg 106	Db 105	Rf 104	Ra 88	Fr 87	Og 118	Ts 117	Lv 116	Mc 115	Fl 114	Nh 113	Cn 112	Rg 111	Ds 110	Mt 109	Hs 108	Bh 107	Sg 106	Db 105	Rf 104	Ra 88	Fr 87		
Lu 71	Yb 70	Tm 69	Er 68	Ho 67	Dy 66	Tb 65	Gd 64	Eu 63	Sm 62	Pm 61	Nd 60	Pr 59	Ce 58	La 57	Lu 71	Yb 70	Tm 69	Er 68	Ho 67	Dy 66	Tb 65	Gd 64	Eu 63	Sm 62	Pm 61	Nd 60	Pr 59	Ce 58	La 57						
Lr 103	No 102	Md 101	Fm 100	Es 99	Cf 98	Bk 97	Cm 96	Am 95	Pu 94	Np 93	U 92	Pa 91	Th 90	Ac 89	Lr 103	No 102	Md 101	Fm 100	Es 99	Cf 98	Bk 97	Cm 96	Am 95	Pu 94	Np 93	U 92	Pa 91	Th 90	Ac 89						

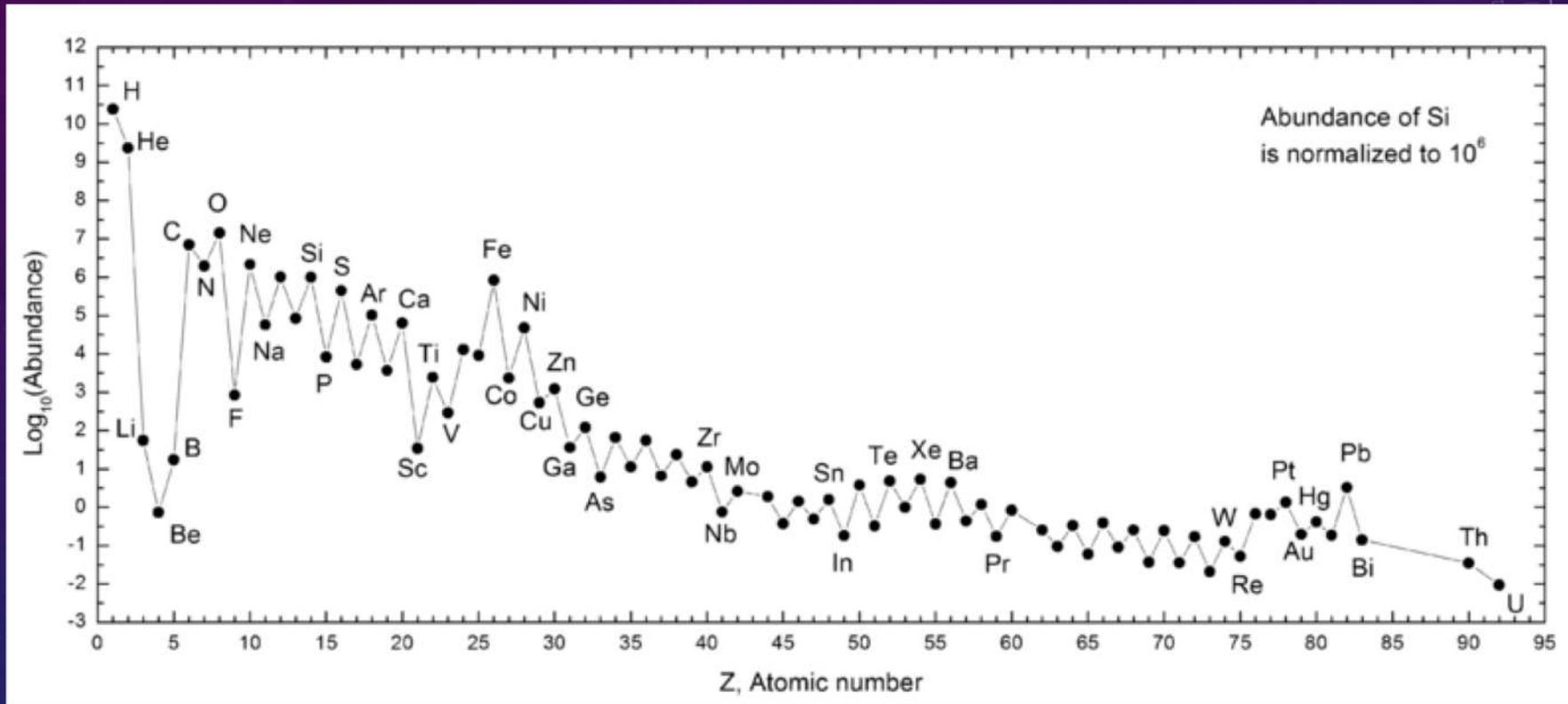
# Periodic Table of the Elements

*for Astronomers*



# Abundâncias relativas dos elementos.

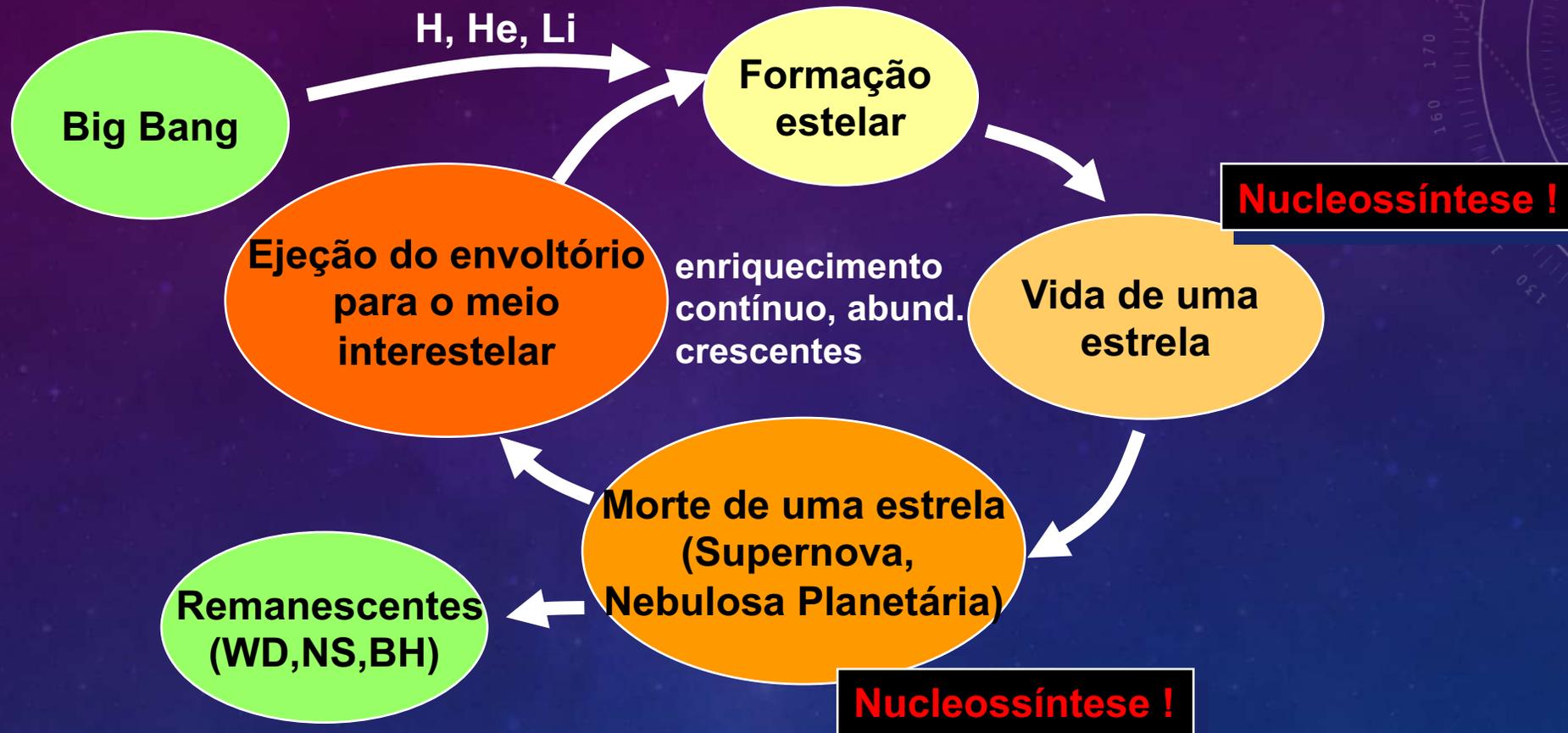
Atenção: a escala vertical é logarítmica!



Como é a distribuição dos elementos mais abundantes em diferentes estruturas, em fração da massa total

Ordem	Via Láctea		Sol		Terra		Corpo Humano	
	Elemento	Fração (%)	Elemento	Fração (%)	Elemento	Fração (%)	Elemento	Fração (%)
1º	H	73,9	H	70,6	Fe	31,9	O	65
2º	He	24,0	He	27,5	O	29,7	C	18
3º	O	1,04	O	0,59	Si	16,1	H	10
4º	C	0,46	C	0,30	Mg	15,4	N	3,0
5º	Ne	0,13	Ne	0,15	Ni	2,4	Ca	1,5
6º	Fe	0,11	Fe	0,12	S	1,9	P	1,2
7º	N	0,09	N	0,11	Ca	1,7	K	0,2
8º	Si	0,06	Si	0,06	Al	1,1	S	0,2
9º	Mg	0,06	Mg	0,05	Cr	0,6	Cl	0,2
10º	S	0,04	S	0,04	Mn	0,2	Na	0,1

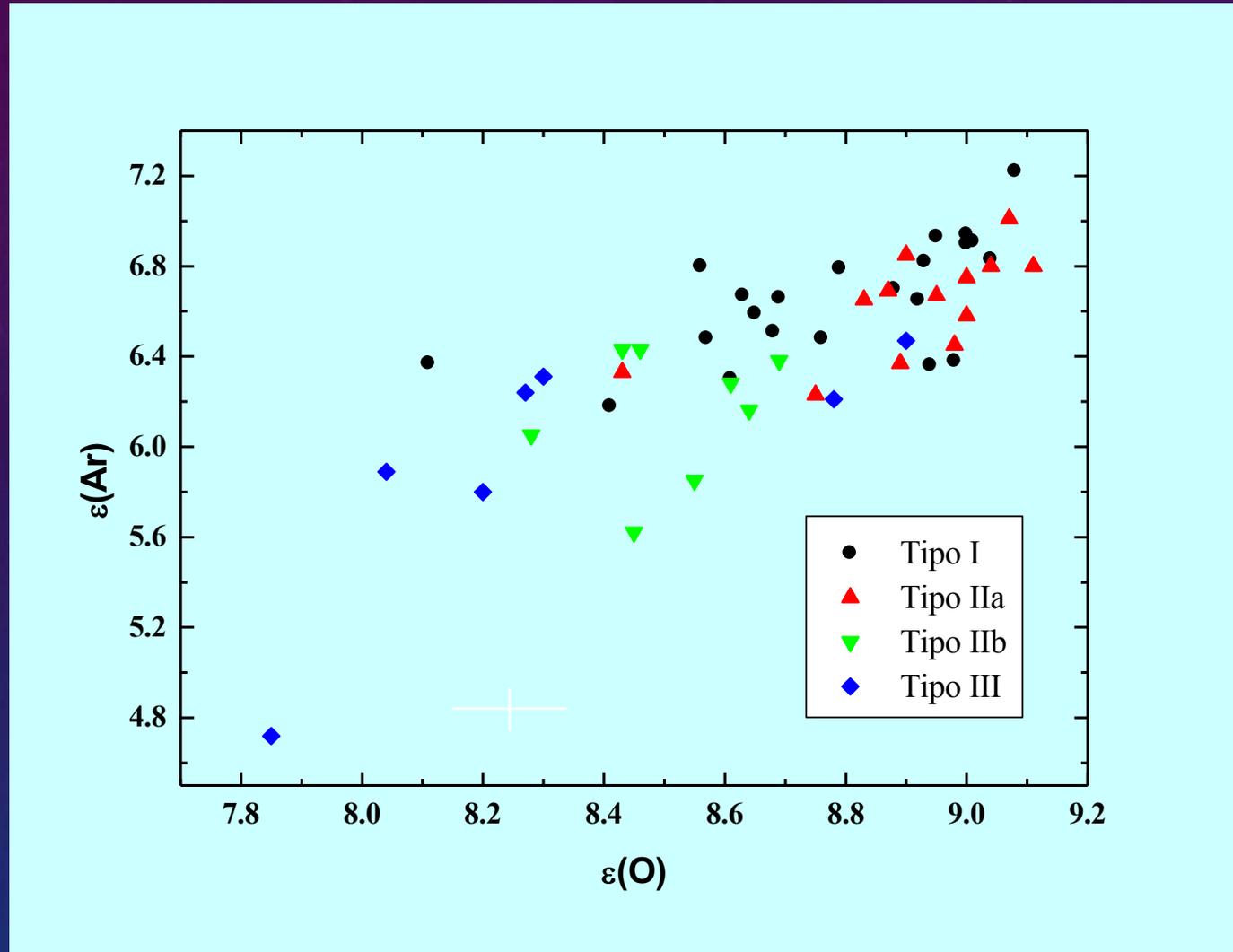
# Nucleossíntese é um ciclo contínuo e gradual



BH: Black Hole  
NS: Neutron Star  
WD: White Dwarf

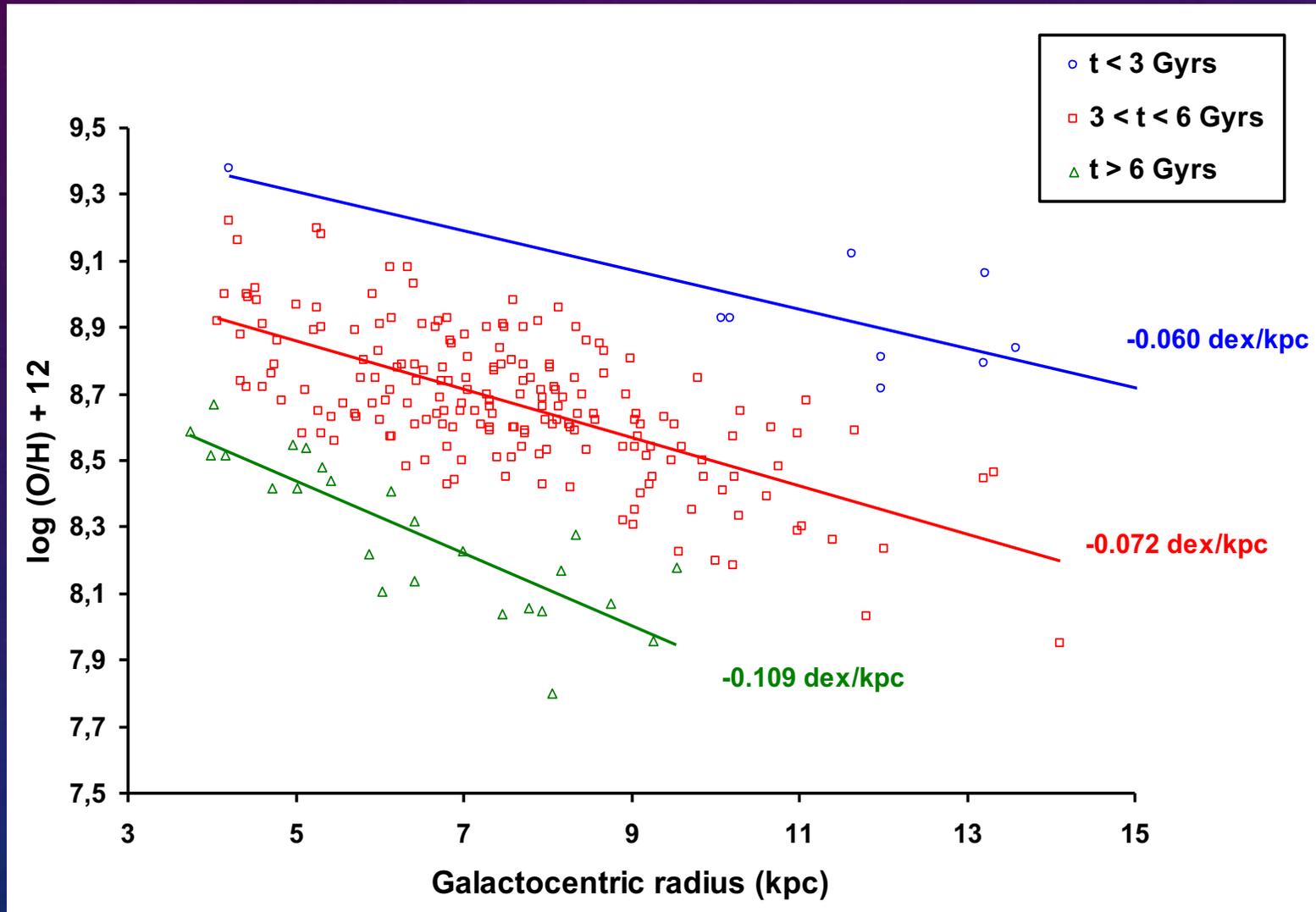


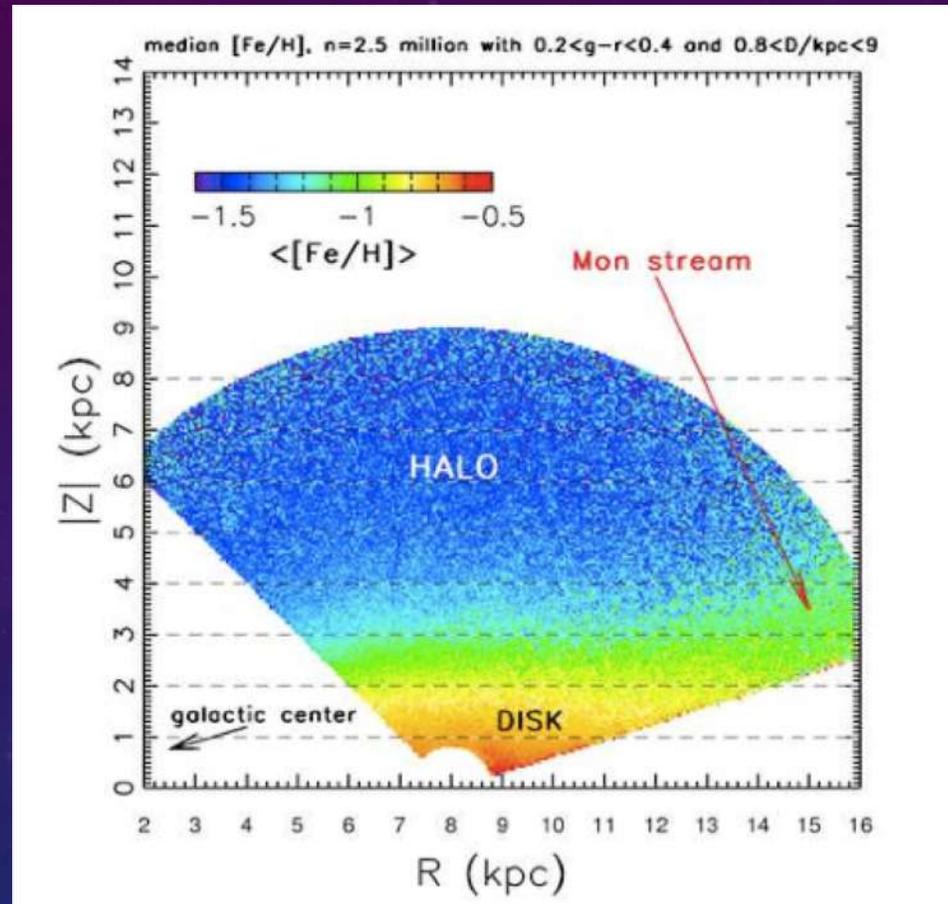
# A EVOLUÇÃO QUÍMICA DO DISCO GALÁCTICO: AR X O



→ Progenitoras menos massivas (tipos IIb e III), originadas de um meio interestelar mais pobre, refletem a abundância do disco em épocas passadas

# O MAPEAMENTO DO GRADIENTE DE ABUNDÂNCIAS DO DISCO GALÁCTICO E SUA EVOLUÇÃO TEMPORAL





A distribuição de abundâncias no disco e halo galácticos traçada a partir de 2.5 milhões de estrelas

# ONDE ESTÃO OS PROBLEMAS ?

- Como varia (ao longo do raio e no tempo) o gradiente radial de abundância da Via Láctea ?
- Como se dá a evolução química nas outras galáxias ?
- Juntando-se a evolução química com a evolução dinâmica é possível reproduzir a Galáxia tal como ela é hoje?

## **... e os problemas que estão na moda:**

- Qual a natureza da matéria escura fria e da energia escura ?
- Quantos exoplanetas de tipo terrestre existem nas zonas de habitabilidade de suas estrelas? O que tem lá?

## UM RACIOCÍNIO SIMPLES:

- Fração das estrelas que têm planetas: 100% (dados do satélite Kepler)
- Quantidade média de planetas por estrela:  $\sim 10$
- Número típico de estrelas por galáxia:  $\sim 100$  bilhões ( $10^{11}$ )
- Total estimado de galáxias no Universo:  $\sim 1$ -2 trilhões ( $10^{12}$ )

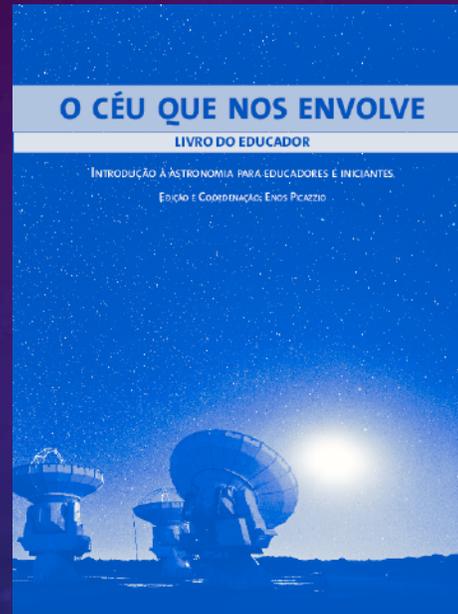
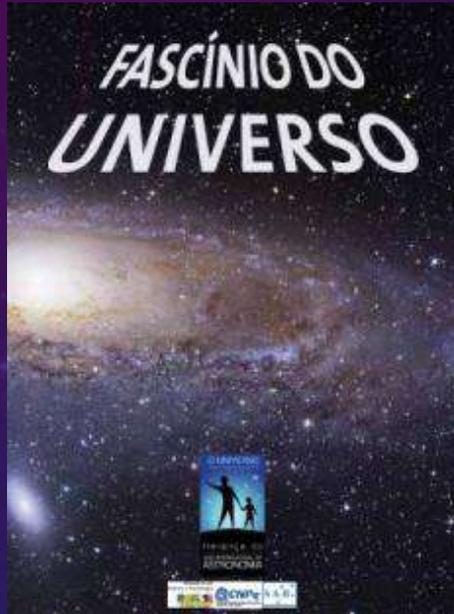
**A conclusão é simples:**

**Estamos apenas no começo do começo das grandes descobertas**

# Para concluir, vamos conversar sobre conexões

- A **biologia** nos conecta a todos os seres vivos do planeta: os mesmos 20 aminoácidos compõem as proteínas de todos os seres vivos, seja você mesmo, uma formiga, um pinheiro, uma bactéria ou um fungo.
- A **química** nos conecta ao planeta em que evoluímos: a água e as rochas, junto com as atividades atmosférica e sísmica, forneceram os ingredientes para a evolução pré-biótica.
- A **astrofísica** nos conecta ao universo: os elementos químicos que compõem nossos corpos foram sintetizados em estrelas há muito tempo desaparecidas, dispersados no disco da Via Láctea e posteriormente vieram a integrar a nebulosa protossolar, de onde o Sistema Solar se formou. Assim, nossos corpos refletem a evolução química da galáxia onde estamos.

# ALGUMAS SUGESTÕES DE LEITURA



Onde achá-los: <http://www.iag.usp.br/astrologia/livros-e-apostilas>

