

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

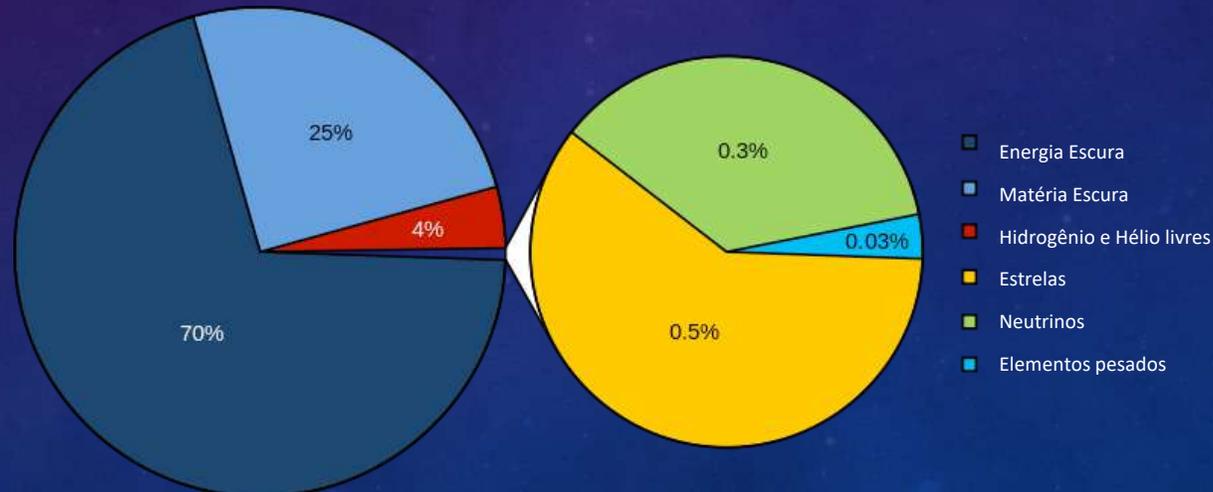
Antes de responder à questão da origem dos elementos é preciso perguntar:

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%:

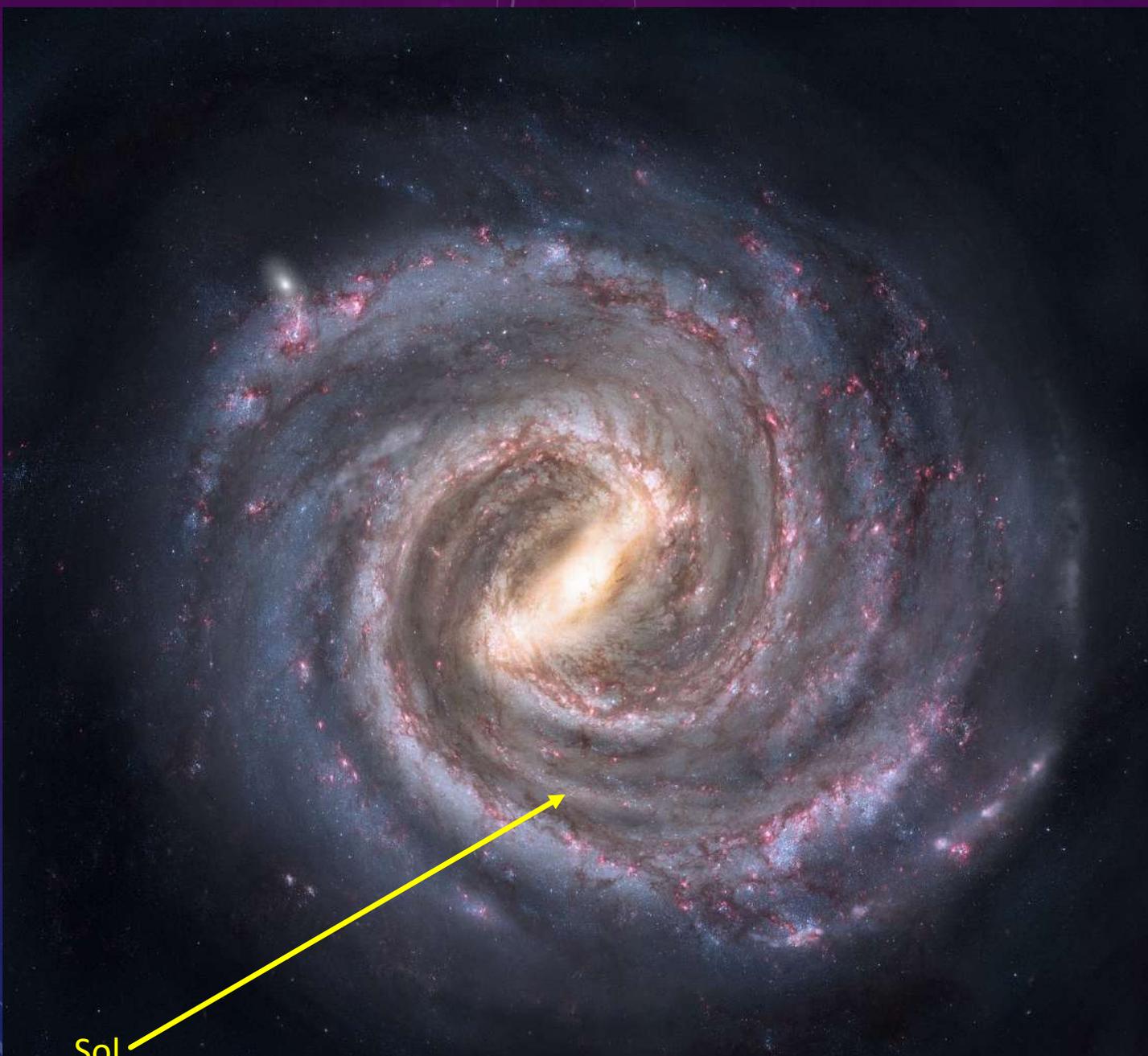




Onde moramos?

Na Via Láctea

Nossa casa no céu



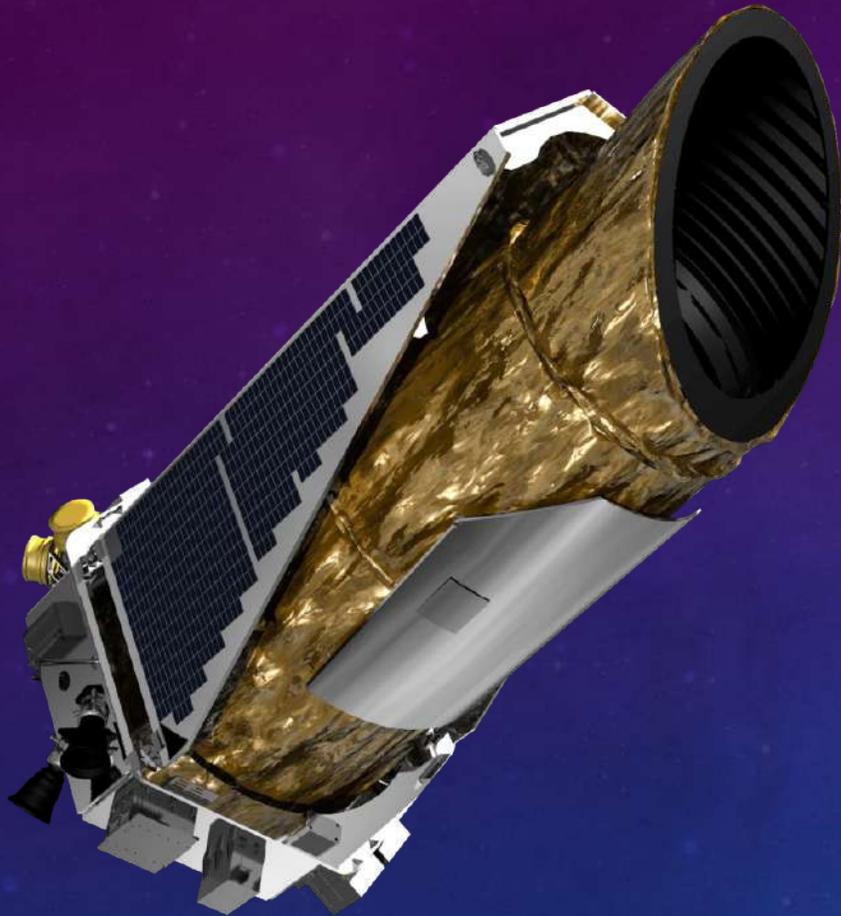
Sol

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: ~ 180.000 anos-luz
- Número de estrelas 200-400 bilhões
- Massa estelar: $\sim 10^{12}$ massas solares

1 ano-luz = 9.5×10^{12} km
Massa do Sol = 2×10^{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 (março de 2024) já existem em torno de 5600 exoplanetas catalogados e milhares de outros a confirmar

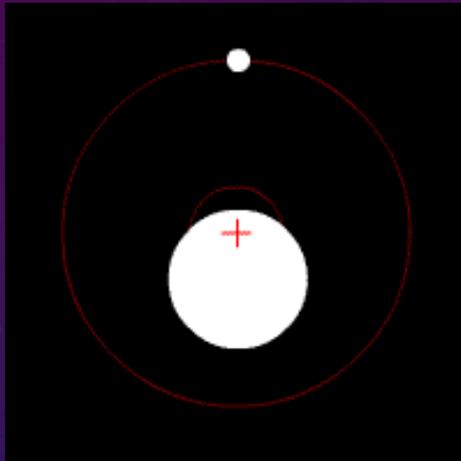
A busca por exoplanetas

Desde que o primeiro exoplaneta foi descoberto em 1992, já foram identificados diferentes tipos de planetas, como:

- **Terras** – planetas rochosos como o nosso
- **Superterras** (1,1 a $10 M_{\oplus}$) – planetas rochosos maiores do que o nosso.
- **Júpiters** – planetas da ordem de grandeza de júpiter
- **Júpiters quentes** – gigantes gasosos cujas órbitas situam-se muito próximas de sua estrela-mãe, o que torna suas atmosferas turbulentas e aquecidas.

Alguns desses tipos não existem no Sistema Solar. Sua existência em outros sistemas demonstra a enorme variedade de tipos de planetas que devem existir. Nosso conhecimento sobre eles está apenas no começo.

Os métodos de detecção de exoplanetas



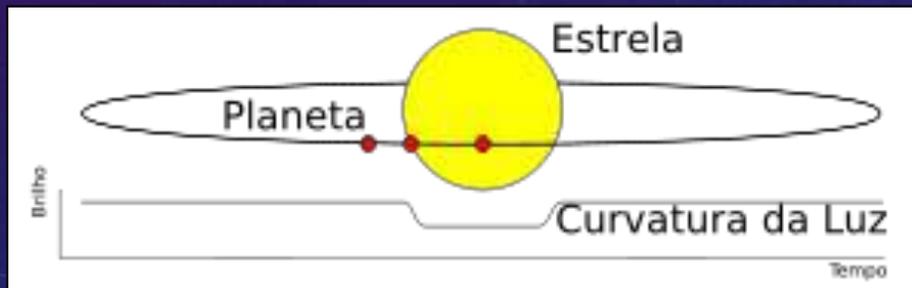
Variações na velocidade radial de estrelas

Quando um planeta massivo se move em torno de sua estrela (como Júpiter e o Sol), o que ocorre na verdade é que ambos os corpos se movem em torno de um centro de massa comum. O método consiste em medir variações periódicas na velocidade radial de uma estrela, provocadas pela órbita de um planeta. O método é mais eficiente para detectar planetas massivos.

Trânsitos

O método consiste em detectar a sombra do planeta quando este transita diante da estrela hospedeira.

Este método funciona apenas com uma pequena porcentagem de planetas cujos planos orbitais estejam quase perfeitamente alinhados com nossa linha de visada. Sua vantagem é que pode ser aplicado mesmo a estrelas muito distantes



Quantas galáxias existem no Universo?

Imagem “ultra profunda” feita com o Telescópio Hubble:

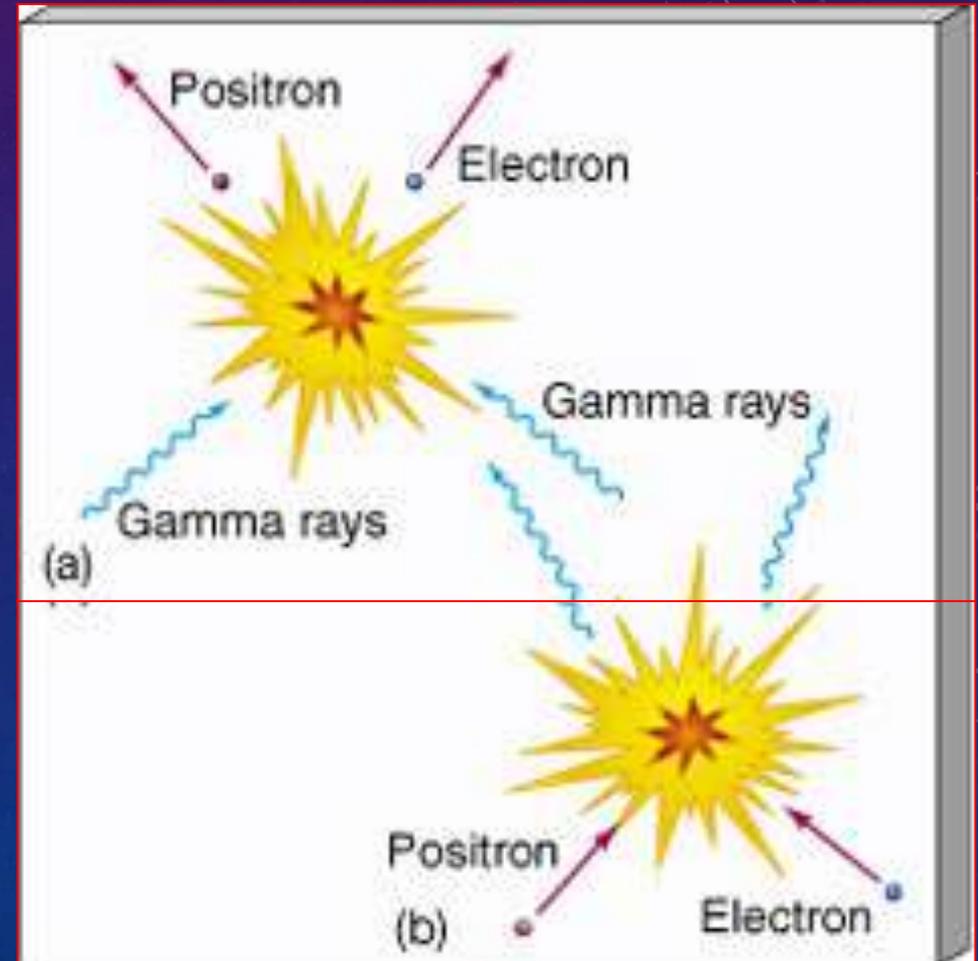
- O tempo de exposição foi equivalente a 11.3 dias de exposição contínua
- O lado do quadrado equivale a 1/10 do diâmetro da Lua cheia
- A área equivale a 0,000013 do total da área do céu (treze milionésimos)
- A imagem contém ~10.000 galáxias
- Extrapolando os limites de visibilidade do telescópio e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

Os elementos primordiais (H, He)

Esses elementos foram formados no universo primitivo, logo após o Big Bang, por isso mesmo sua formação é chamada de **nucleossíntese primordial**

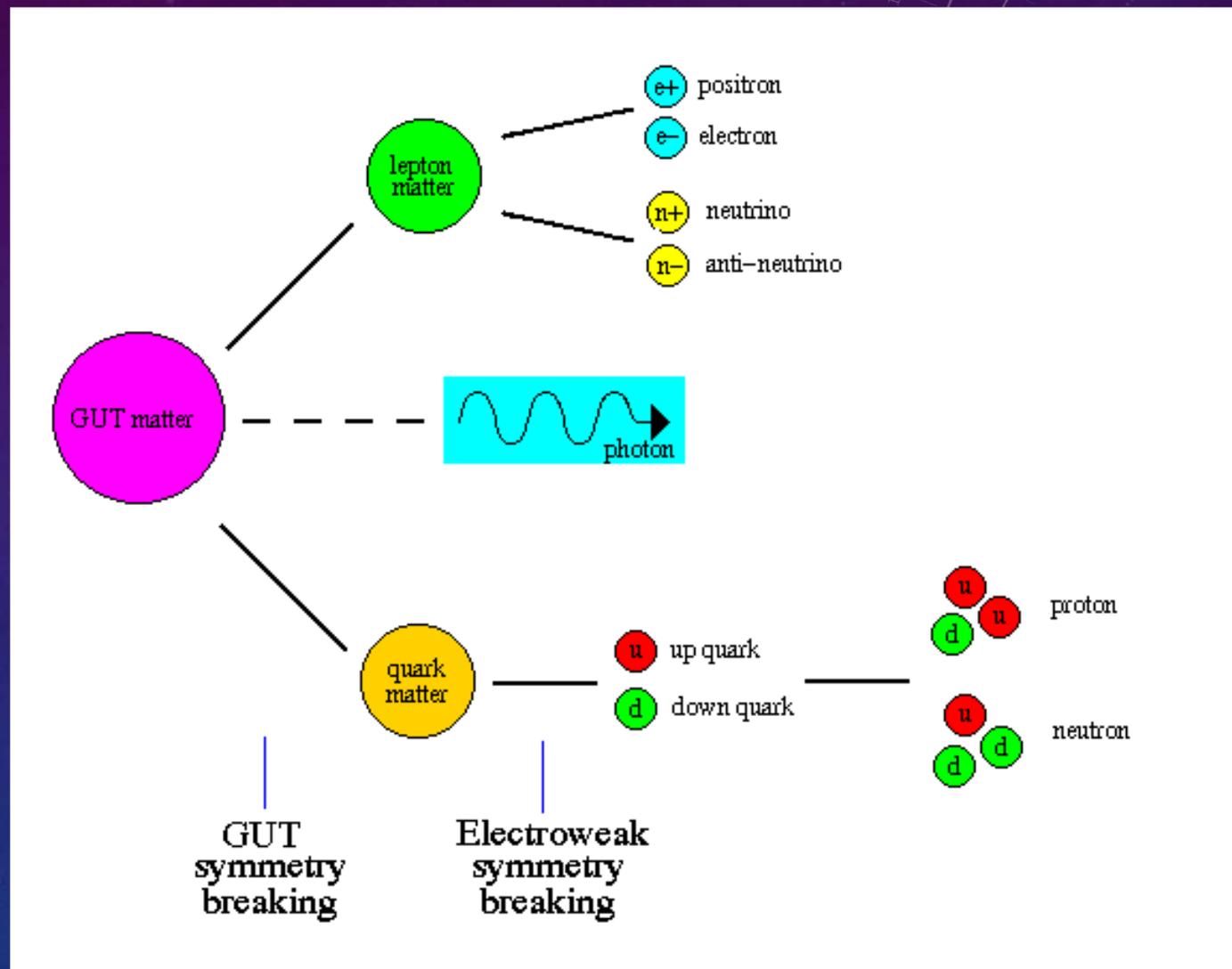
O Básico: Toda a matéria é constituída de **LÉPTONS** (elétrons, neutrinos) e **QUARKS** (formam os prótons, nêutrons, etc..). De onde eles se originam?

A origem: produção e aniquilação de pares:



A evolução primitiva:

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 ³)	Temperatura (K)	Característica principal
Planck	0 - 10 ⁻⁴³ s	∞ - 10 ⁹⁵	∞ - 10 ³²	Física desconhecida Gravitação quântica 4 forças unificadas
GUT	10 ⁻⁴³ – 10 ⁻³⁵ s	10 ⁹⁵ - 10 ⁷⁵	10 ³² - 10 ¹⁷	Separação da força gravitacional 3 forças unificadas Matéria GUT Final da era GUT: separação da força forte da eletrofraca
Hadrônica	10 ⁻³⁵ – 10 ⁻⁴ s	10 ⁷⁵ - 10 ¹⁶	10 ¹⁷ - 10 ¹⁰	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.
Leptônica	10 ⁻⁴ - 10 ² s	10 ¹⁶ - 10 ⁴	10 ¹⁰ - 10 ⁴	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, lembrando a grande discussão sobre este tema no início do século 20:

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?

Como foi possível para o Sol emitir luz e calor sem exaurir sua fonte não apenas durante os milhares de séculos em que a humanidade existe, mas também durante o tempo imensamente longo necessário para que todos os seres vivos que necessitam do Sol tenham se desenvolvido e florescido graças à mesma fonte.

- **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 B²FH (Burbidge, Burbidge, Fowler, Hoyle), explicando as principais cadeias de nucleossíntese estelar

Os nomes principais

Alpher, Bethe & Gamow ("α β γ")

Phys. Rev. 73 (1948) 803



Nucleossíntese do Big Bang



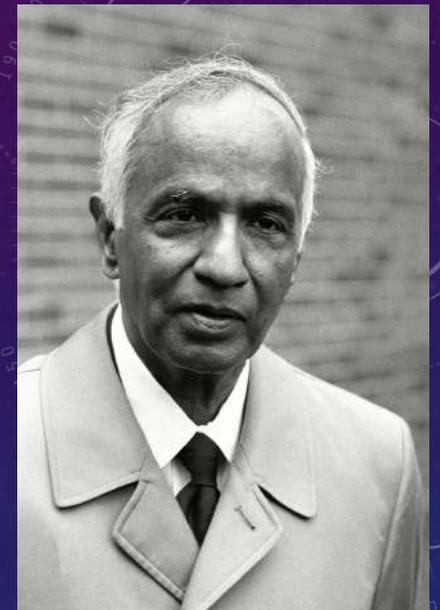
Cecilia Payne-Gaposhkin

A composição química das estrelas



Arthur Eddington

As equações dos interiores estelares



S. Chandrasekhar

Burbidge, Burbidge, Fowler & Hoyle (B²FH)

Rev. Mod. Phys. 29 (1957) 547



Nucleossíntese estelar

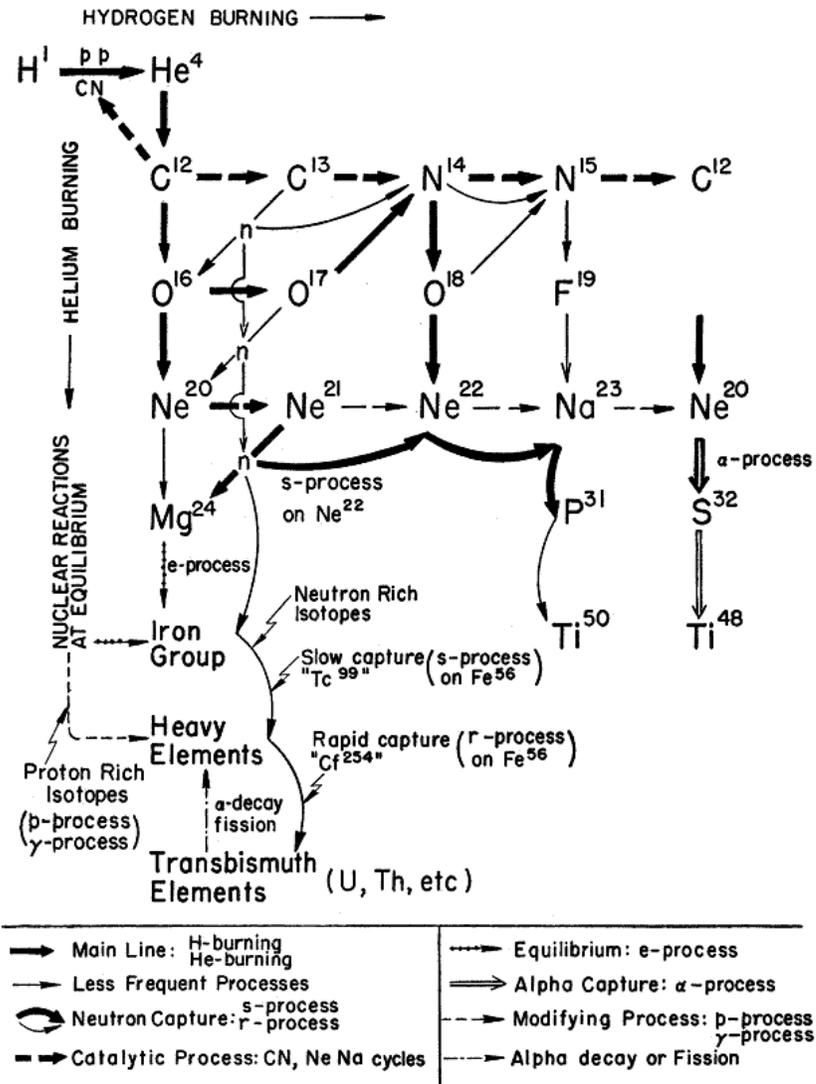
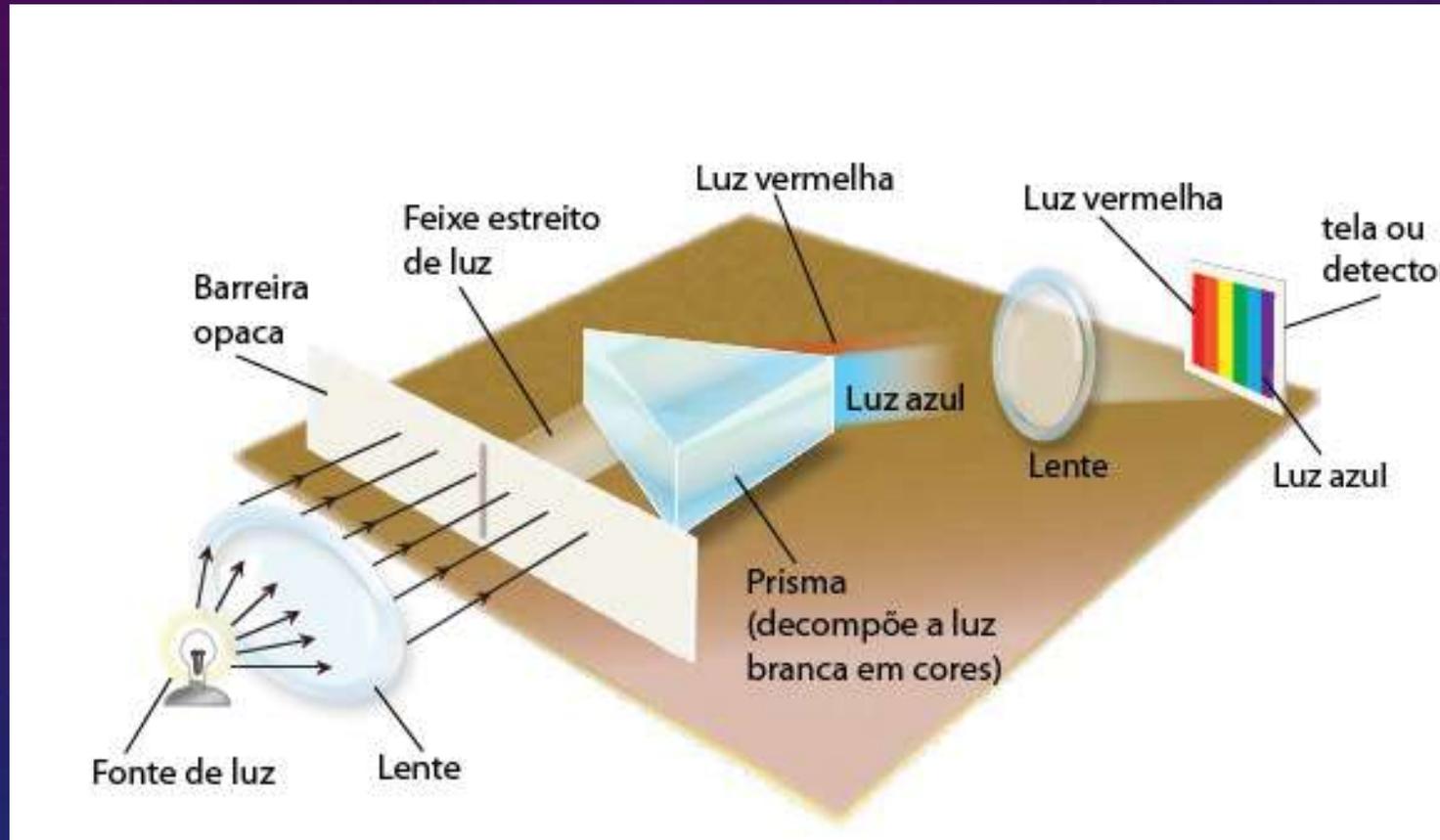


FIG. 1,2. A schematic diagram of the nuclear processes by which the synthesis of the elements in stars takes place. Elements synthesized by interactions with protons (hydrogen burning) are listed horizontally. Elements synthesized by interactions with alpha particles (helium burning) and by still more 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 B²FH publicado em 1957, descrevendo as cadeias de nucleossíntese

COMO OBTER ESSAS RESPOSTAS? PELA ESPECTROSCOPIA!

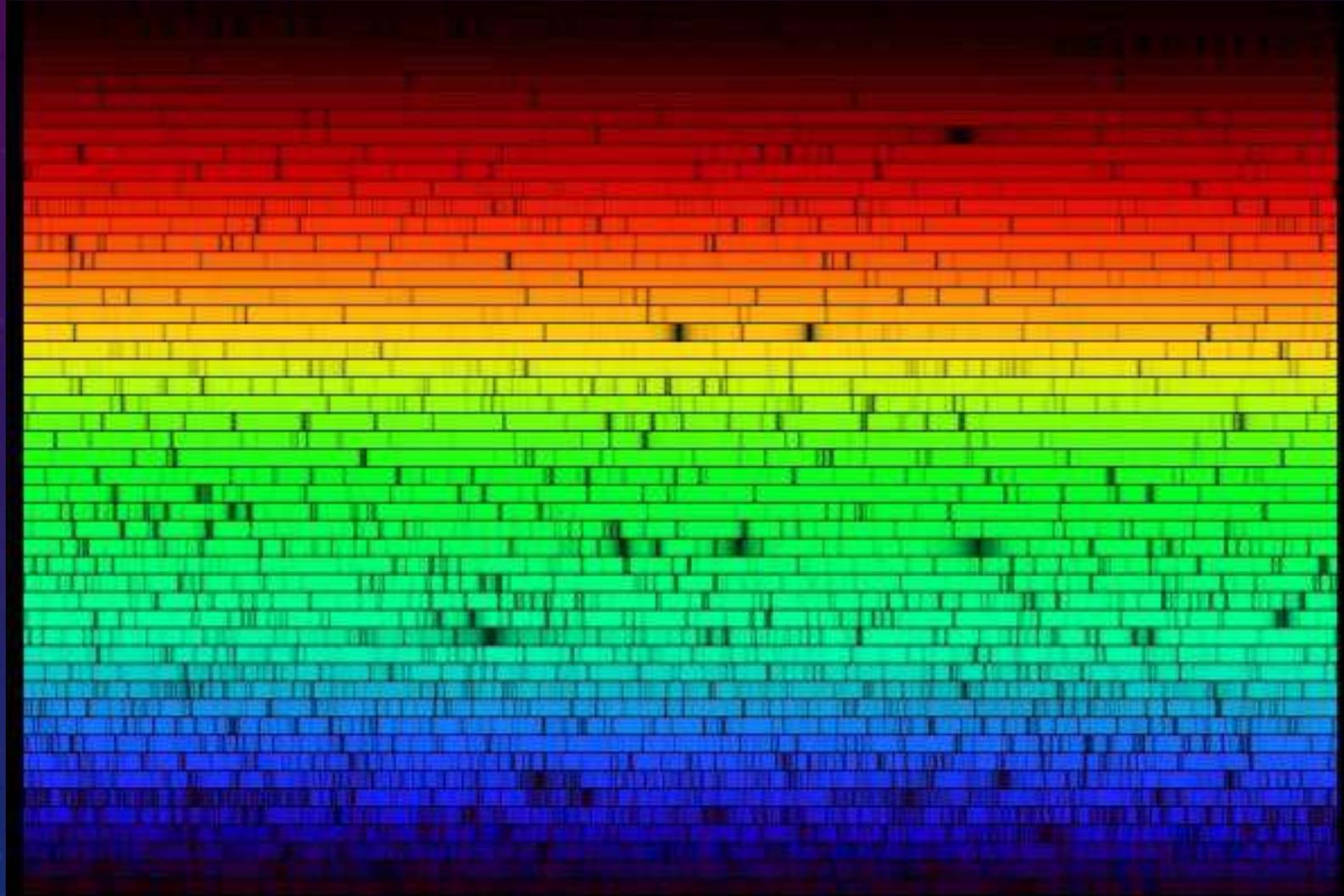
(OU, EM OUTRAS PALAVRAS, COMO DEMONSTRAR QUE BLAISE PASCAL ESTAVA ERRADO?)



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 revela milhares de linhas, resultantes de todos os elementos químicos existentes na sua atmosfera. É assim que a composição química do Sol pode ser estudada.



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

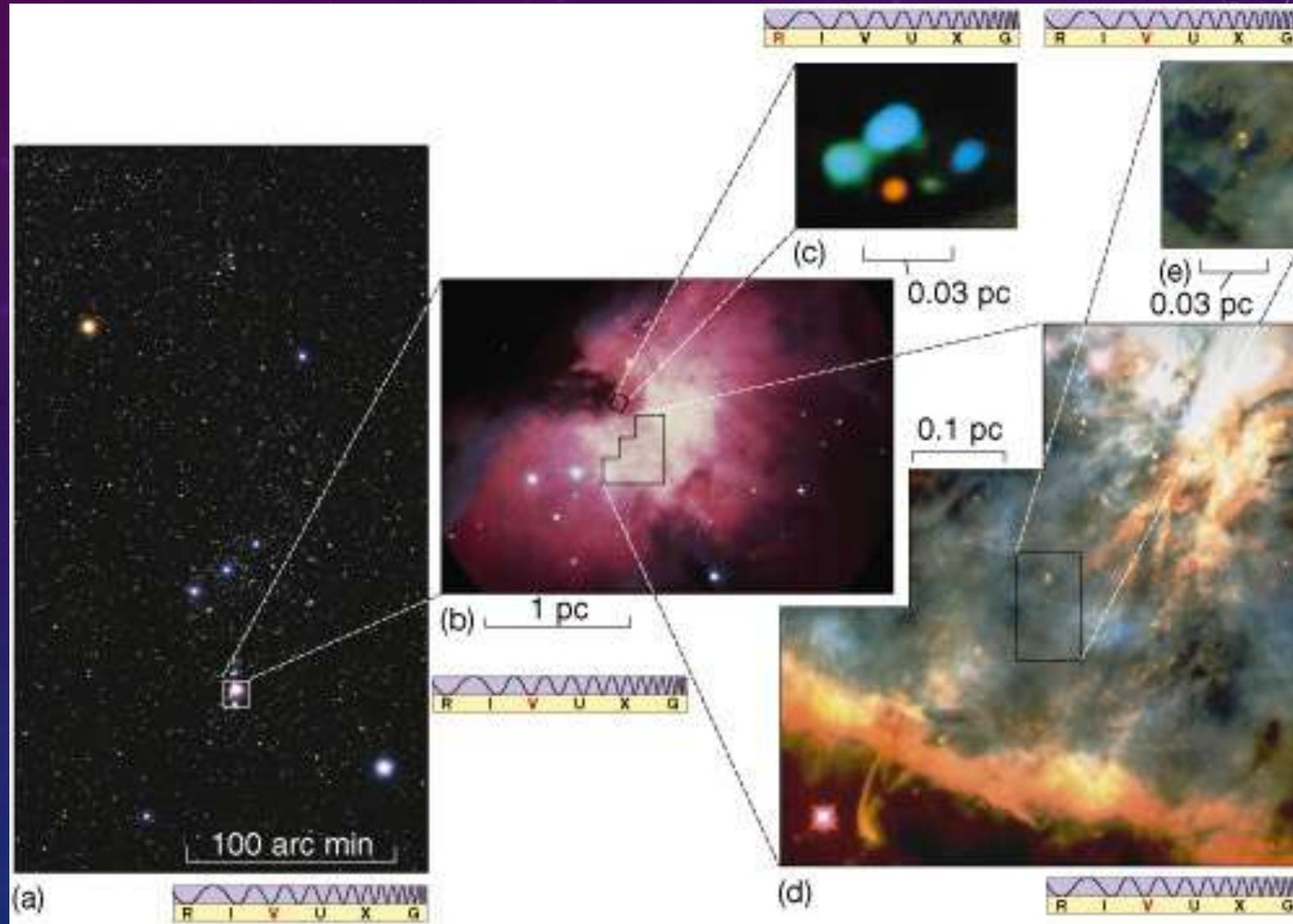


He



Descoberto por Joseph
Lockyer em 1868

O COMEÇO: AS ESTRELAS SE FORMAM NAS NUVENS INTERESTELARES

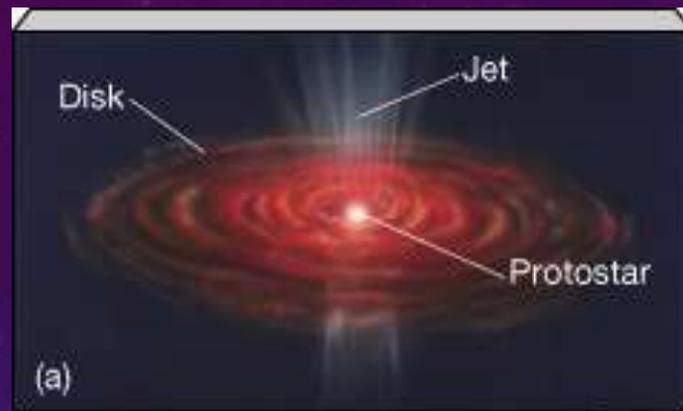


UMA PROTO-ESTRELA



Como se forma uma estrela ?

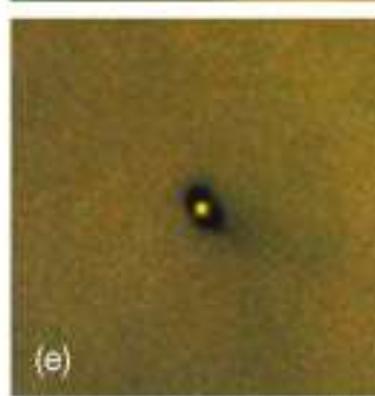
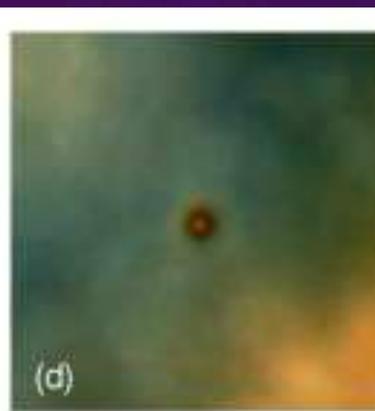
A protoestrela e seu disco



A ignição da estrela

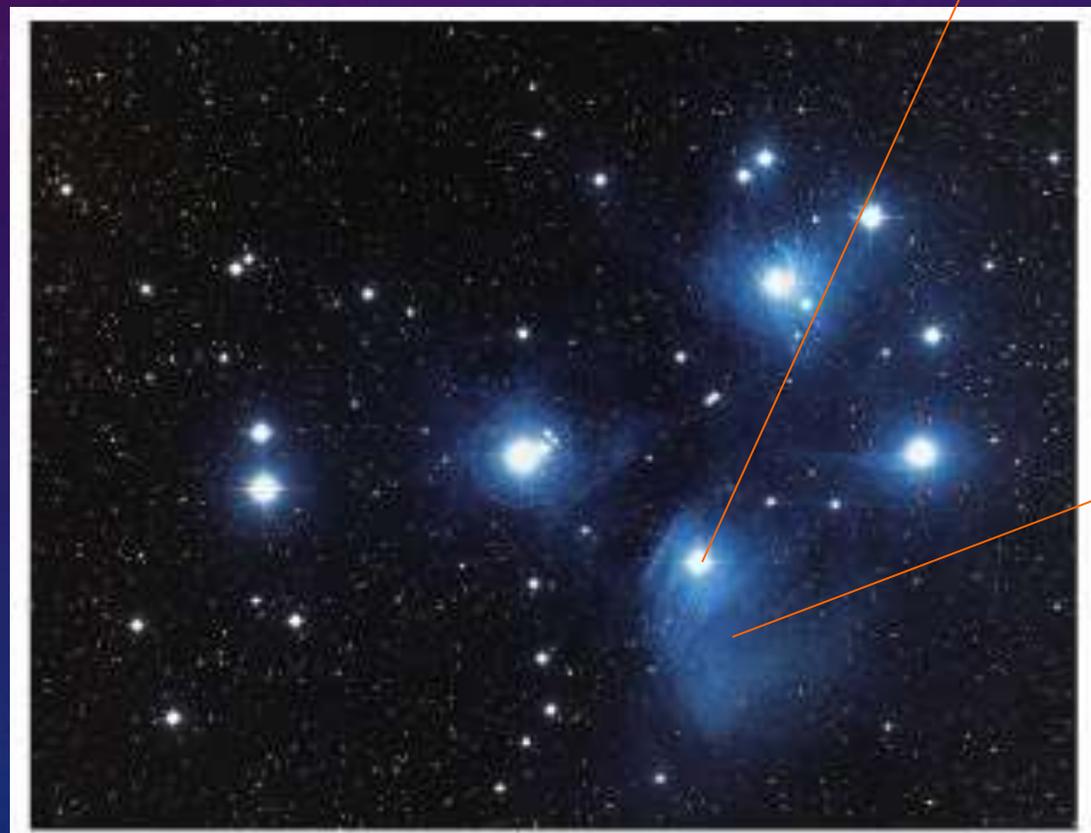


Vento estelar varre o disco



Concepção artística

UM EXEMPLO DE ESTRELAS NO “BERÇÁRIO”: AS PLÊIADES

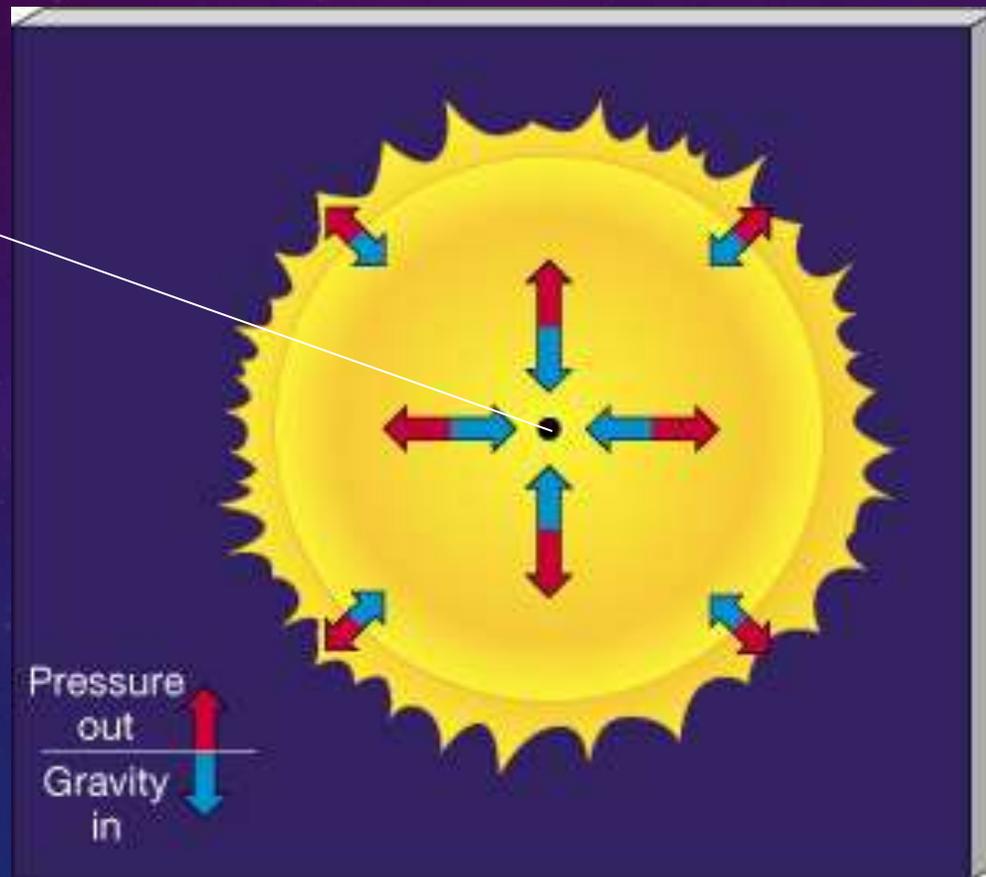


O bebê

A placenta

COMO FUNCIONAM AS ESTRELAS?

Fusão termonuclear
de hidrogênio



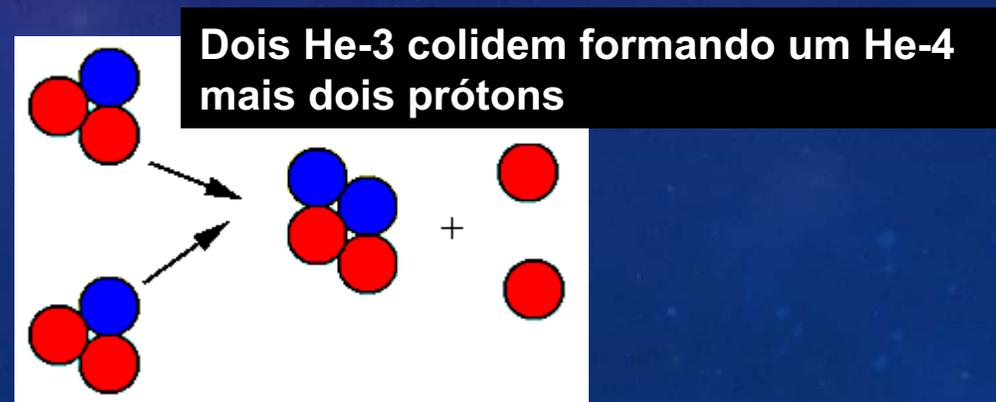
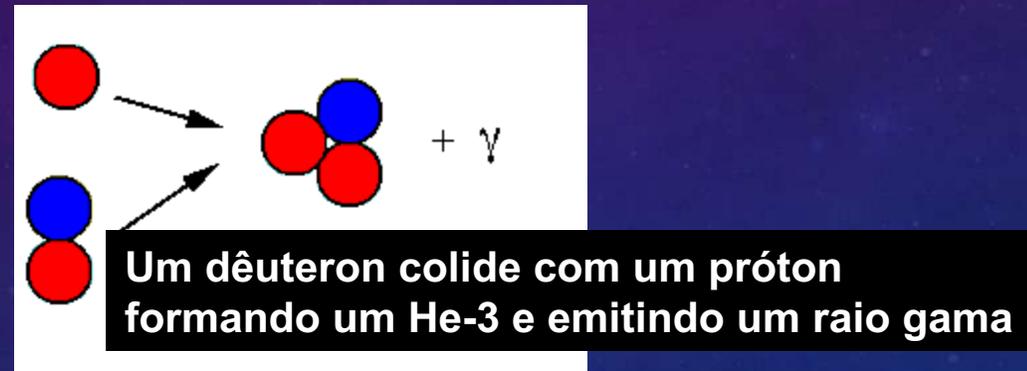
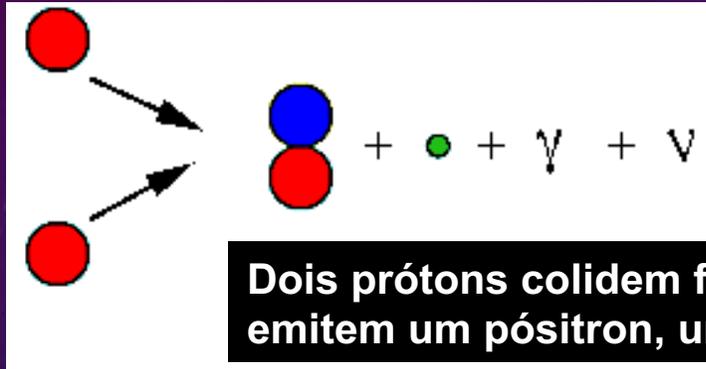
Num estado estacionário de “queima” de material nuclear, o equilíbrio Pressão de Radiação X Gravidade em toda a estrutura interna garante a estabilidade da estrutura

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: 1.57×10^7 K
- Densidade: 162 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

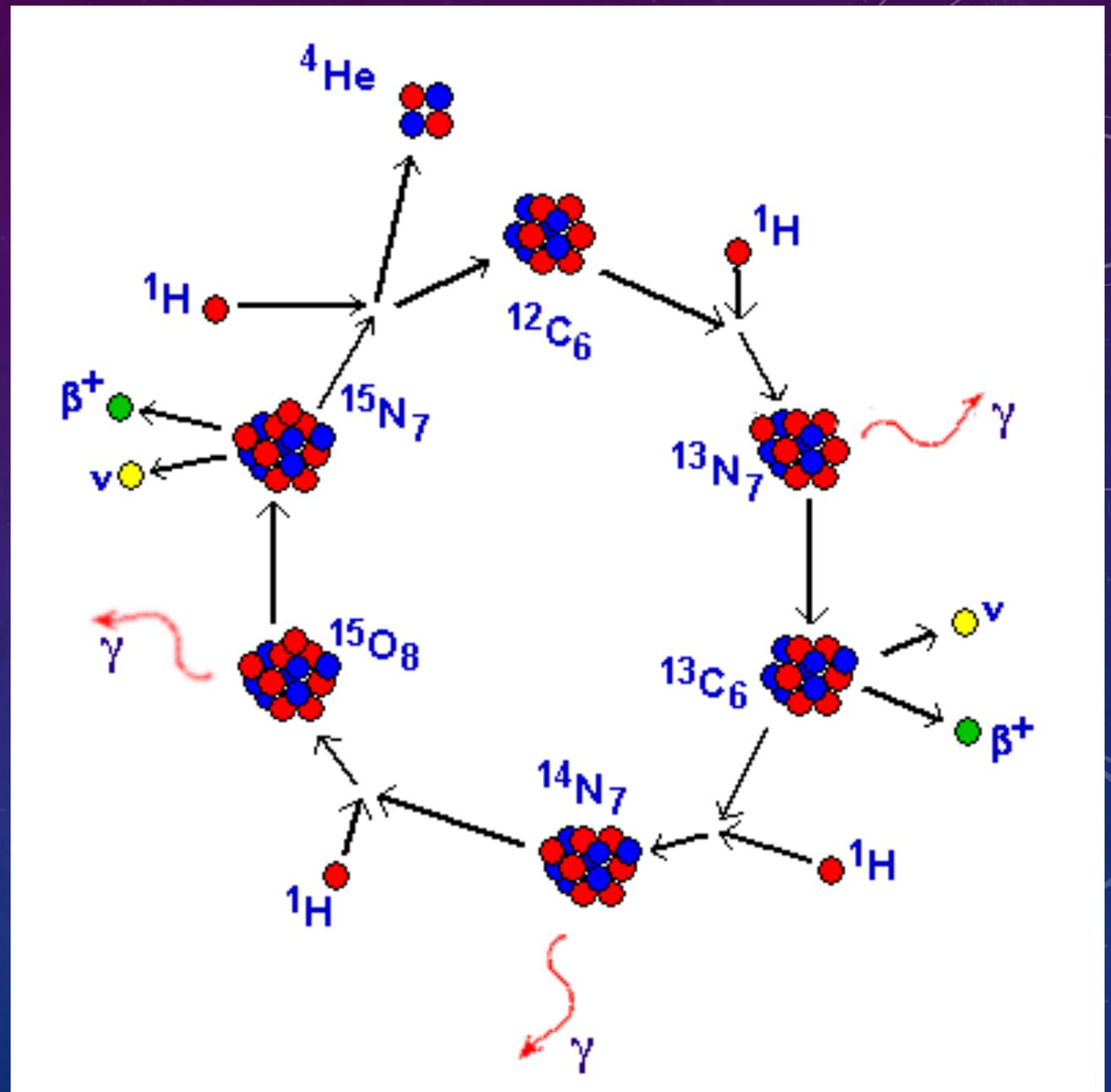


QUAL O BALANÇO ENERGÉTICO DESTA REAÇÃO?

- 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 M_{sol}



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

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



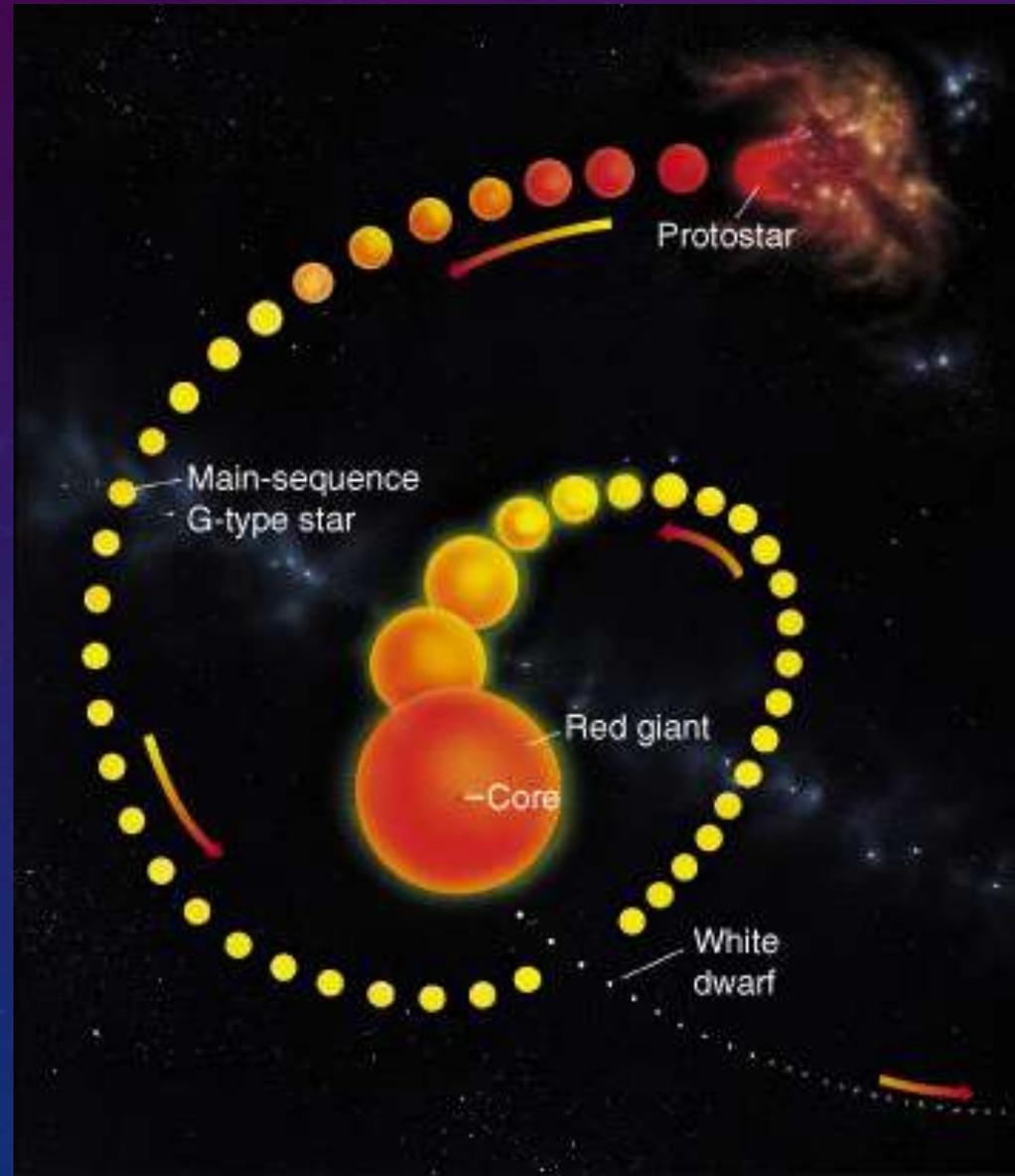
Origem: processos de **espalação** ocorridos no meio interestelar:

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

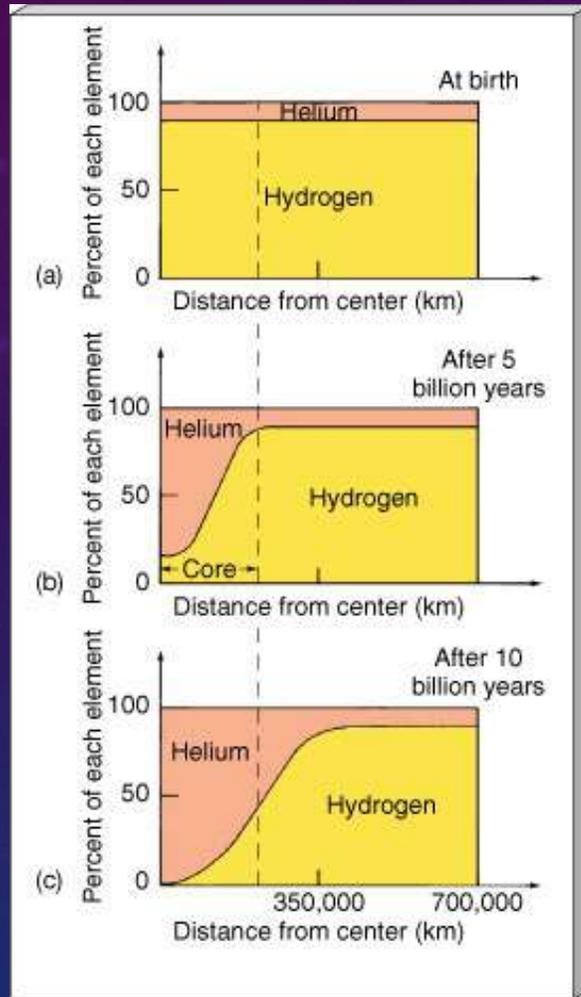
Obs: “raios cósmicos” são *matéria* e não *radiação*!

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

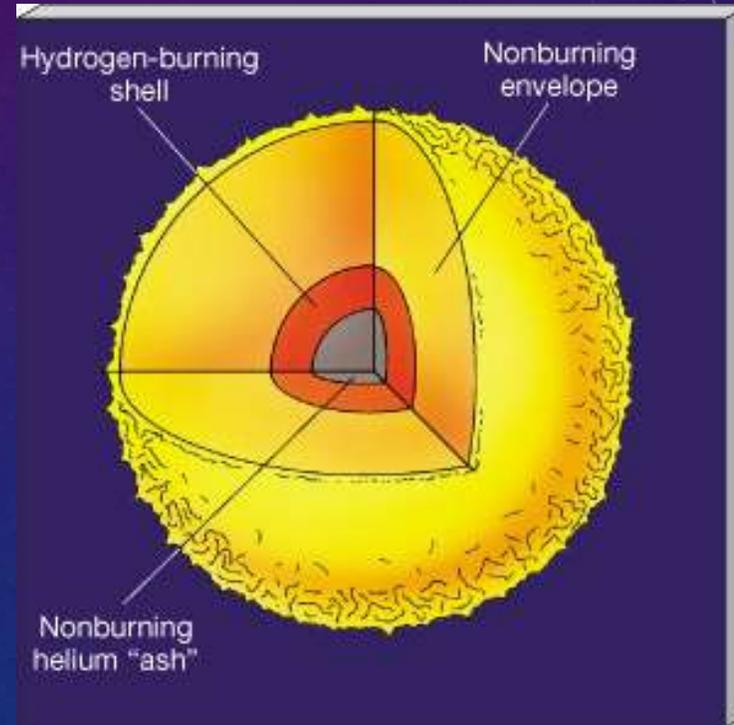
A evolução de uma estrela como o Sol



O CICLO EVOLUTIVO DE UMA ESTRELA COMO O SOL

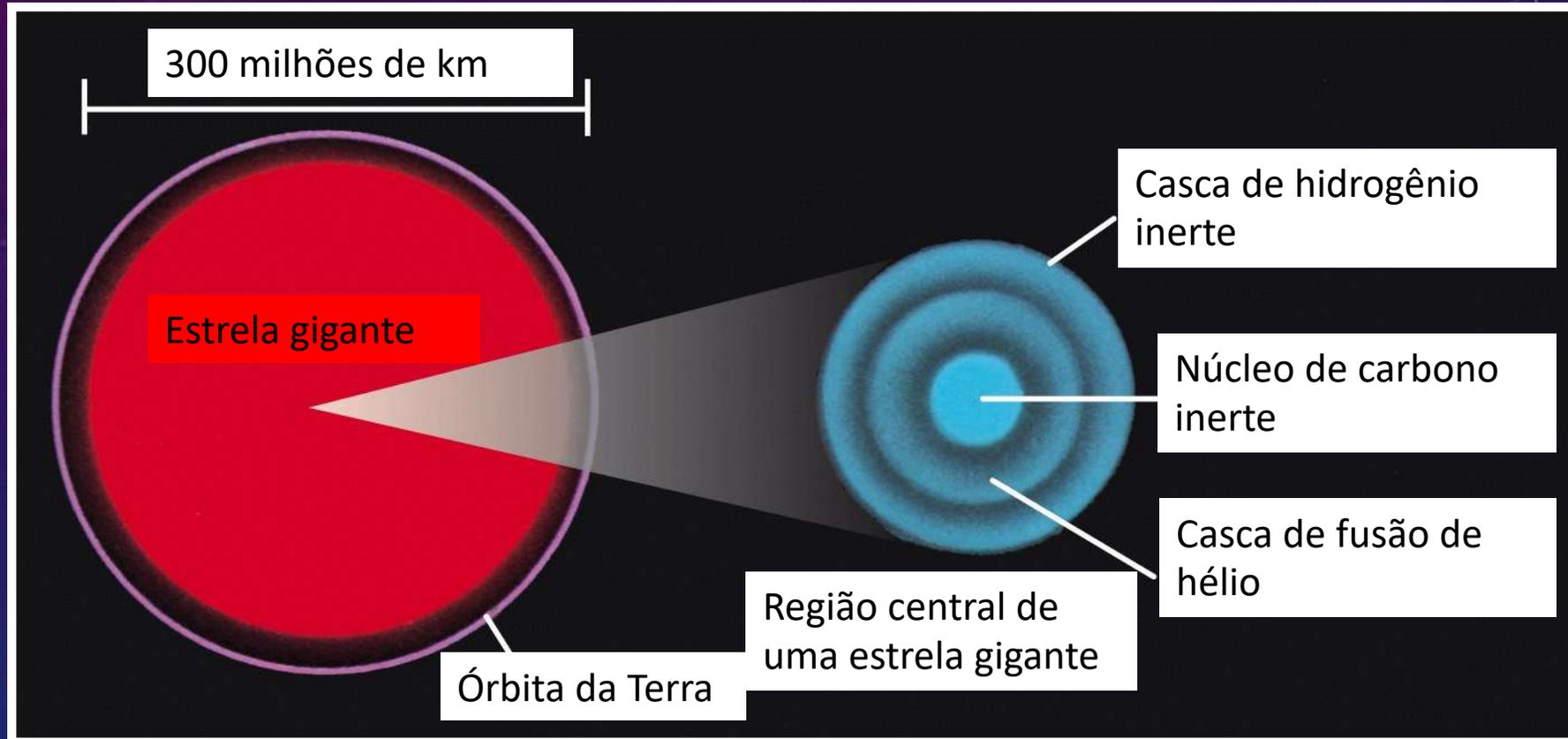


A evolução da abundância de He num núcleo estelar

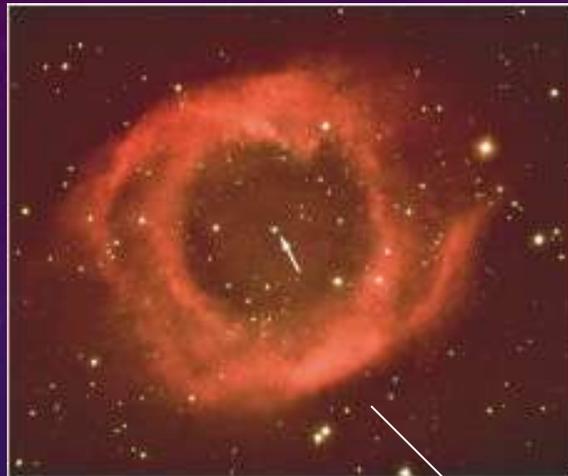


O interior da estrela ao final de seu ciclo evolutivo

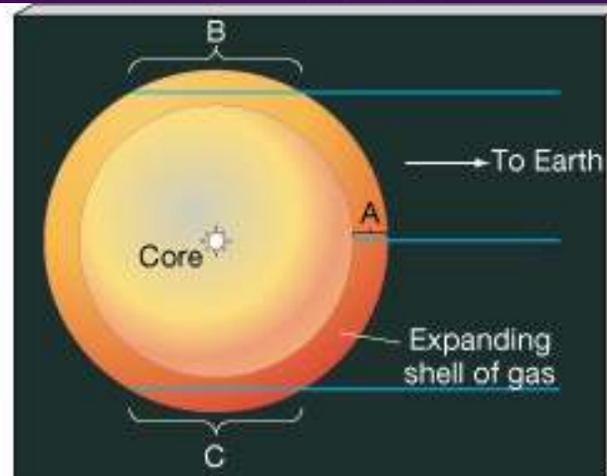
Os estágios avançados de evolução estelar: uma estrela gigante



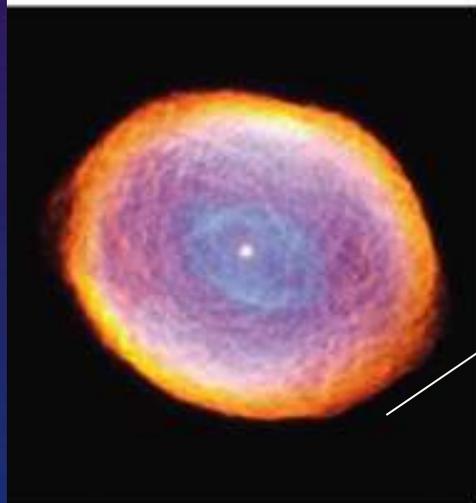
O FINAL DE UMA ESTRELA COMO O SOL



(a)



(b)

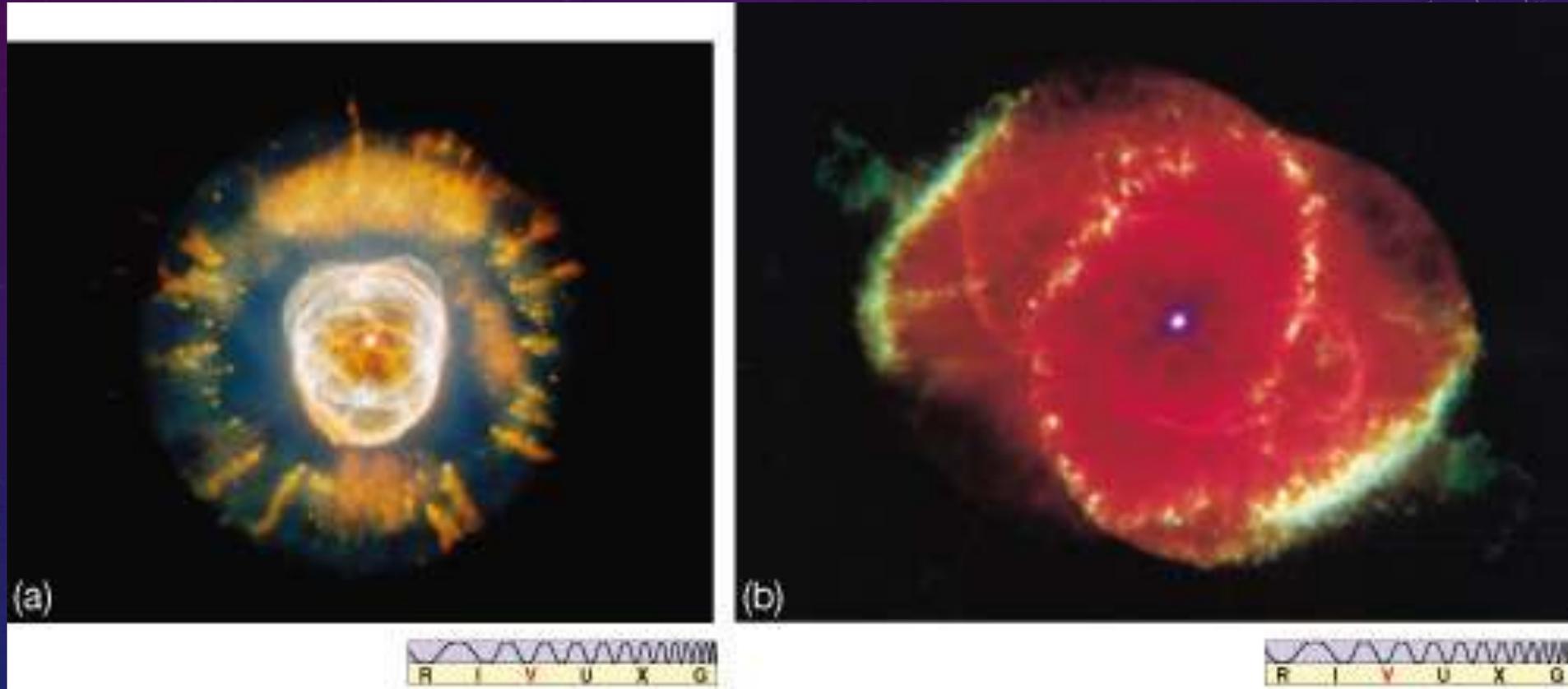


(c)



Nebulosas planetárias

Através da ejeção das nebulosas planetárias, o material processado no interior das estrelas de massas intermediárias (0.8 a 8 M_{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

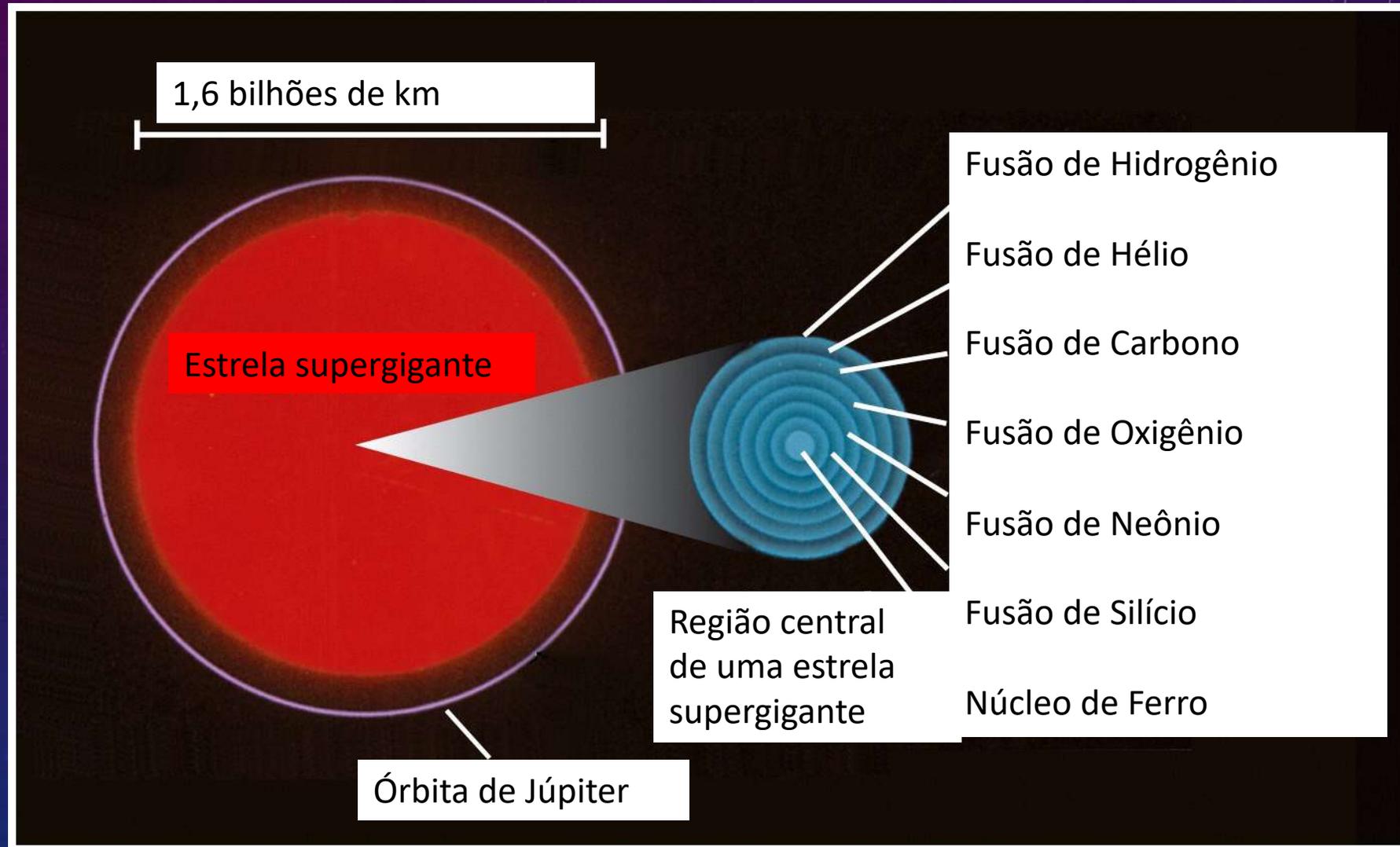


As formas estão associadas aos processos de formação

Os tamanhos estão relacionados às idades

As cores indicam a presença de distintos elementos químicos

O núcleo de 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



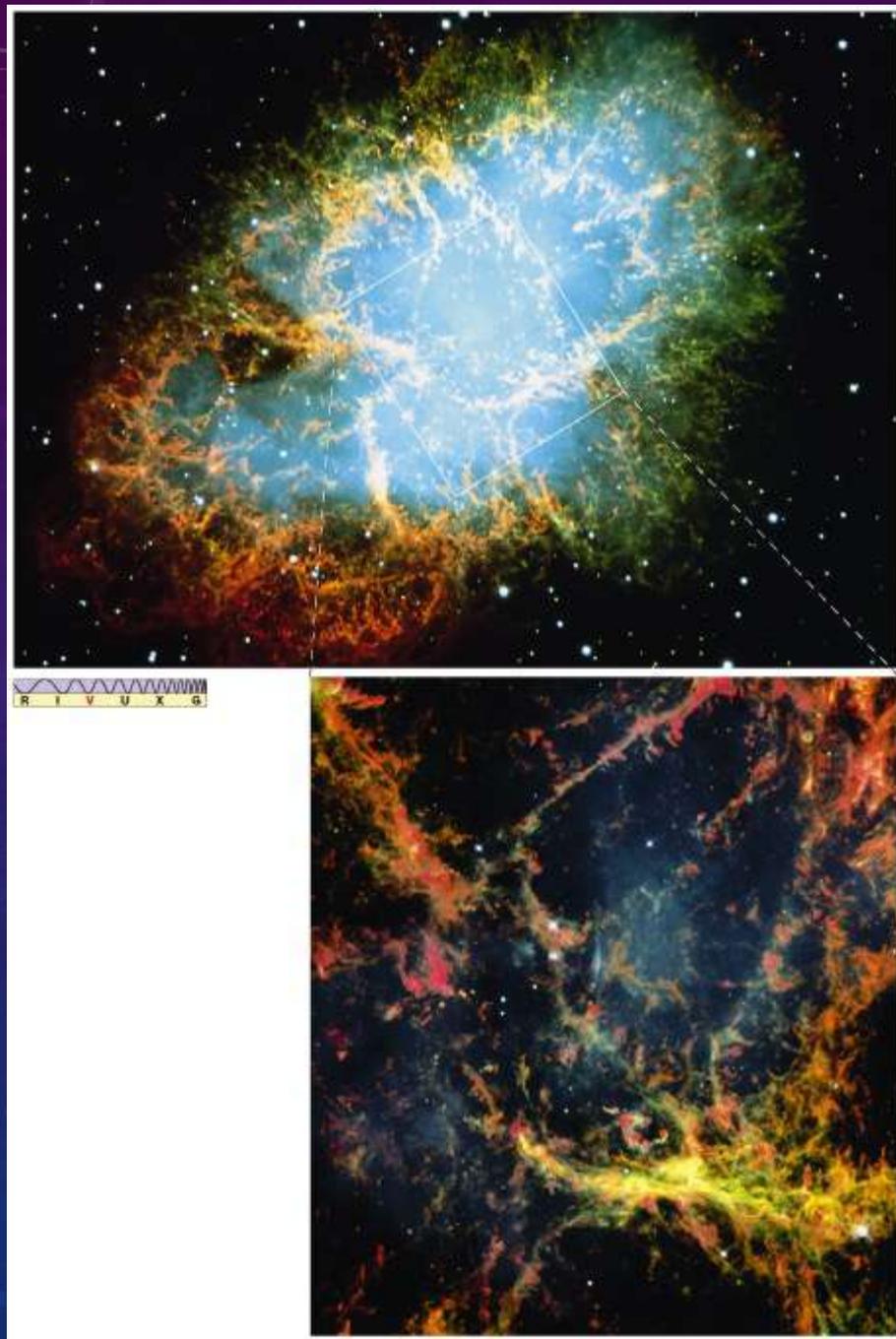
Uma estrela massiva isolada vai aumentando a massa do seu núcleo por fusão de elementos cada vez mais pesados

Quando o núcleo estelar atinge 1,44 Msol (o chamado limite de Chandrasekhar), ele colapsa sobre si mesmo, transformando-se numa estrela de nêutrons

O colapso do núcleo produz uma onda de choque para fora

A onda de choque ejeta toda a estrutura da estrela, produzindo fusão nuclear difusa. A estrela brilha mais que uma galáxia inteira por algumas semanas

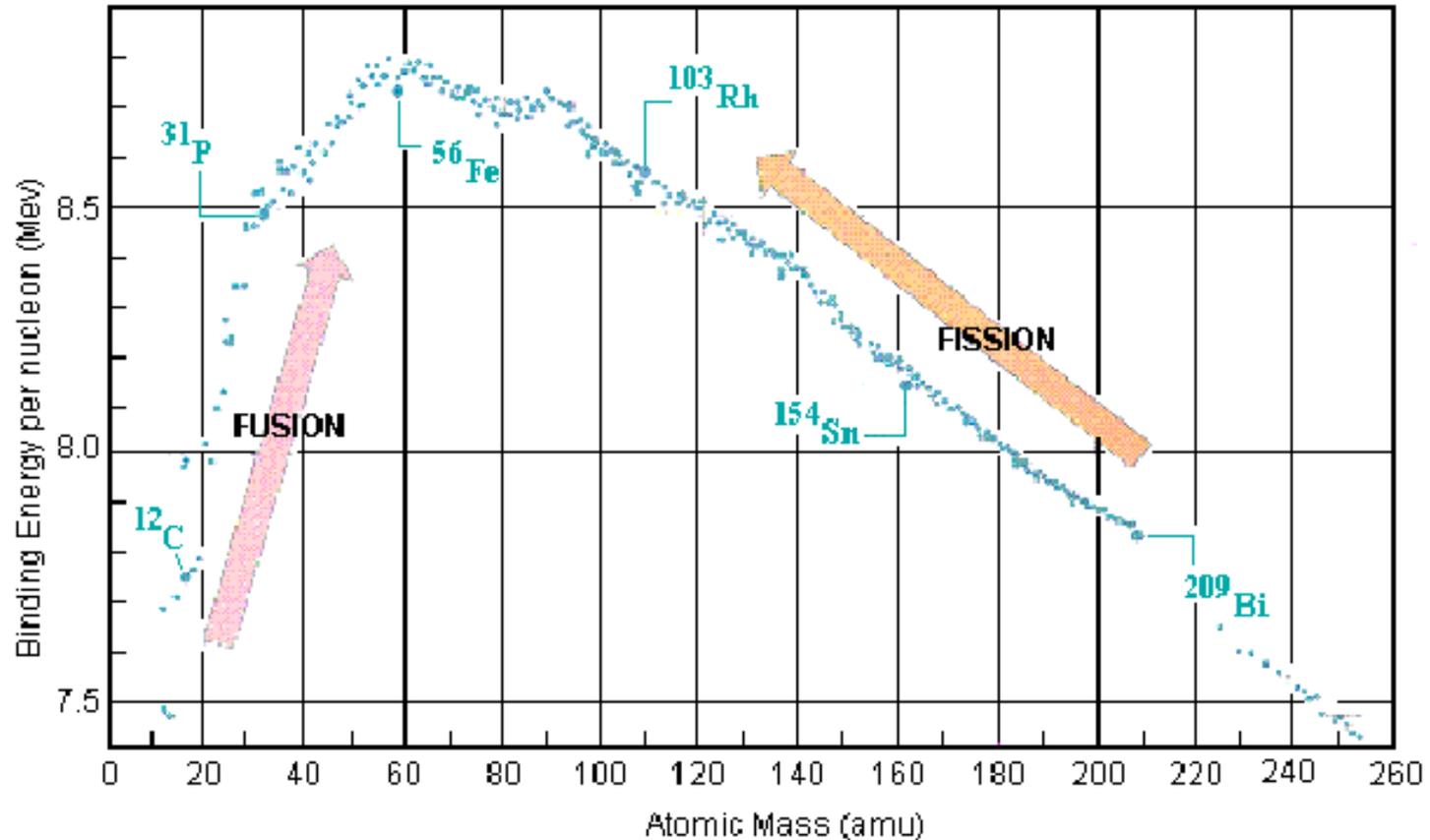
Nebulosa do Caranguejo, um remanescente de supernova



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

Como são produzidos os elementos mais massivos 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):

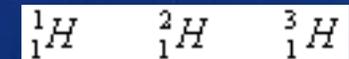


Slow: captura lenta de nêutrons

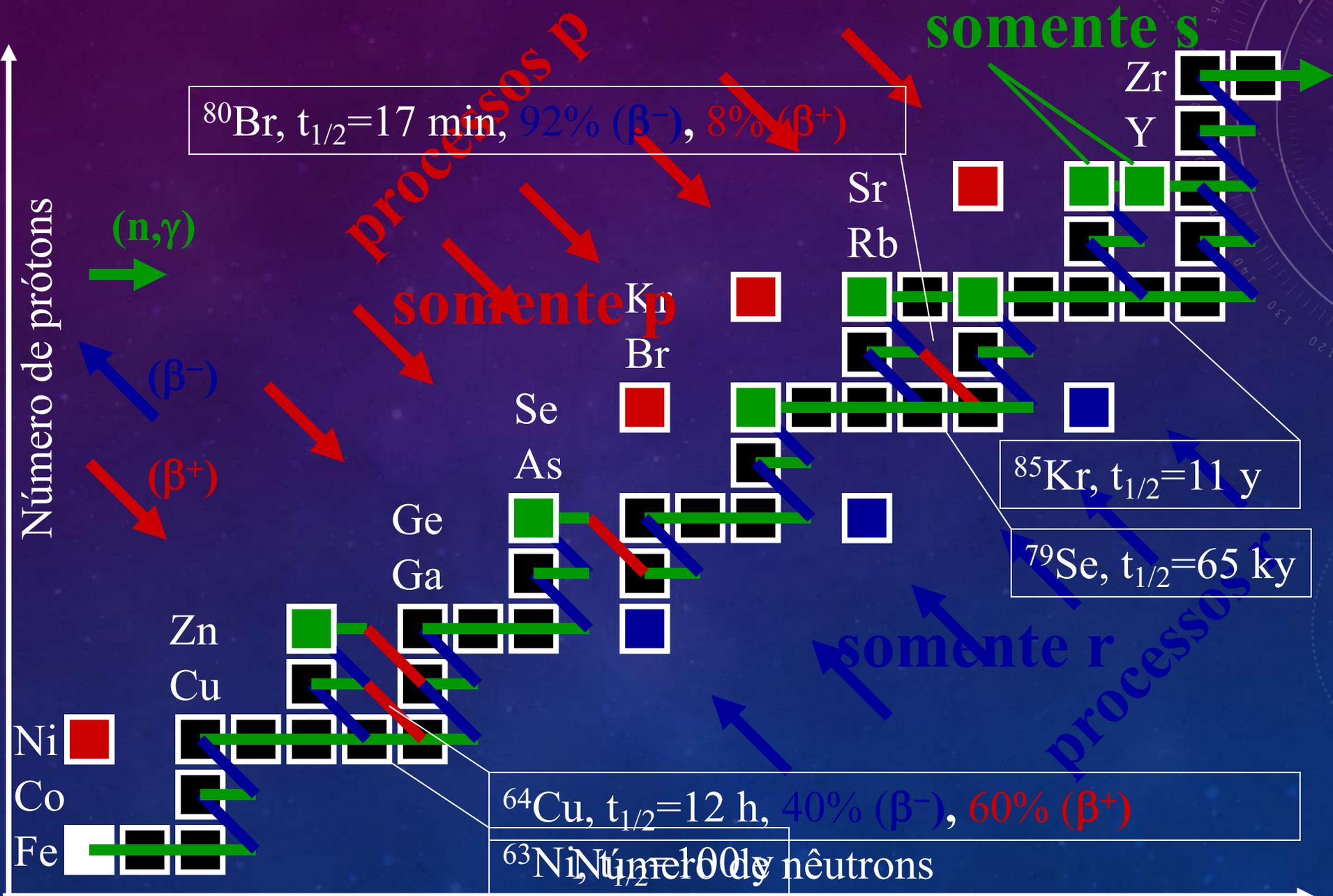


... e assim sucessivamente, até o ${}^{209}\text{Bi}$. Elementos mais pesados não podem ser fabricados assim porque decaem no ${}^{209}\text{Bi}$ antes que outro nêutron seja capturado

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 Reifarh)



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	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36		
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54		
Cs 55	Ba 56	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86			
Fr 87	Ra 88	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118			
La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71					
Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103					

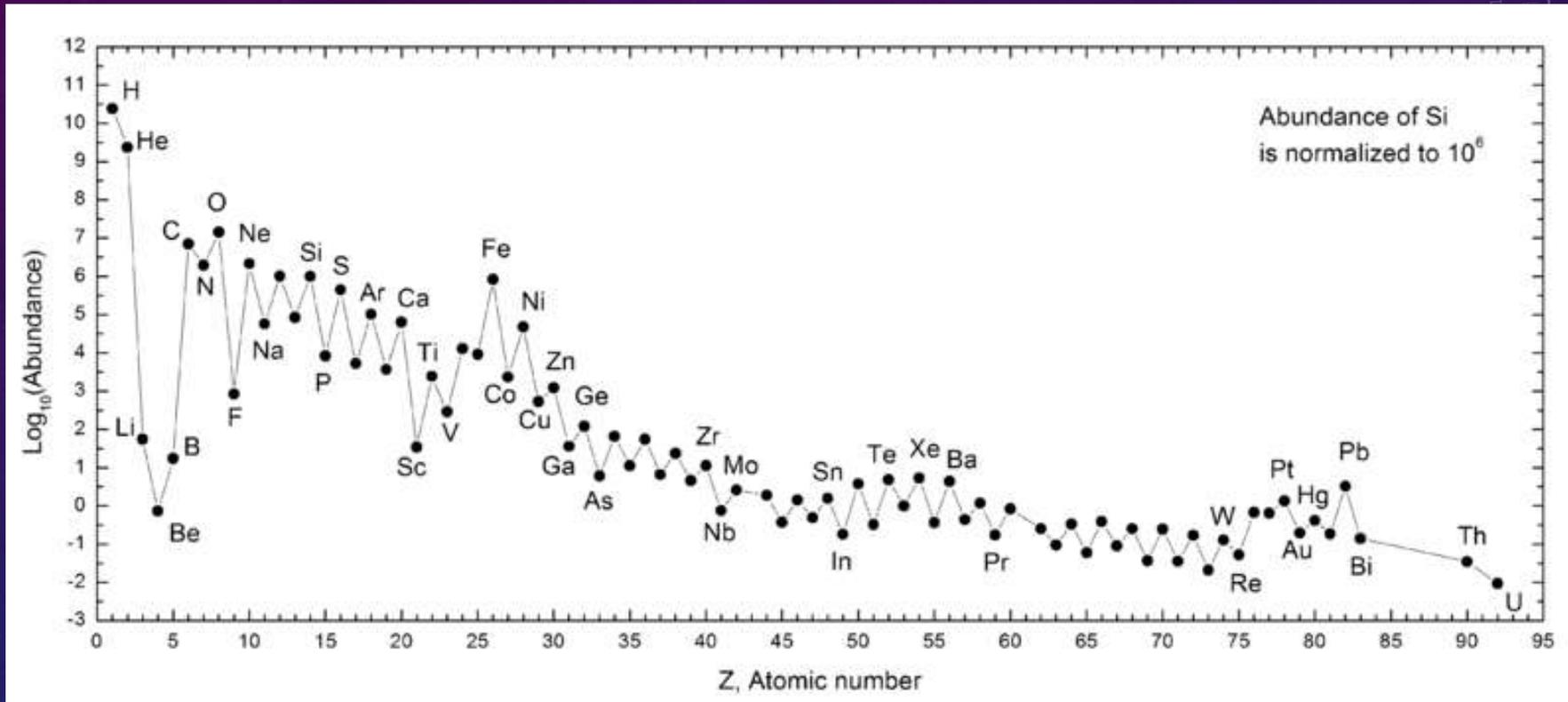
Periodic Table of the Elements

for Astronomers



Abundâncias relativas dos elementos.

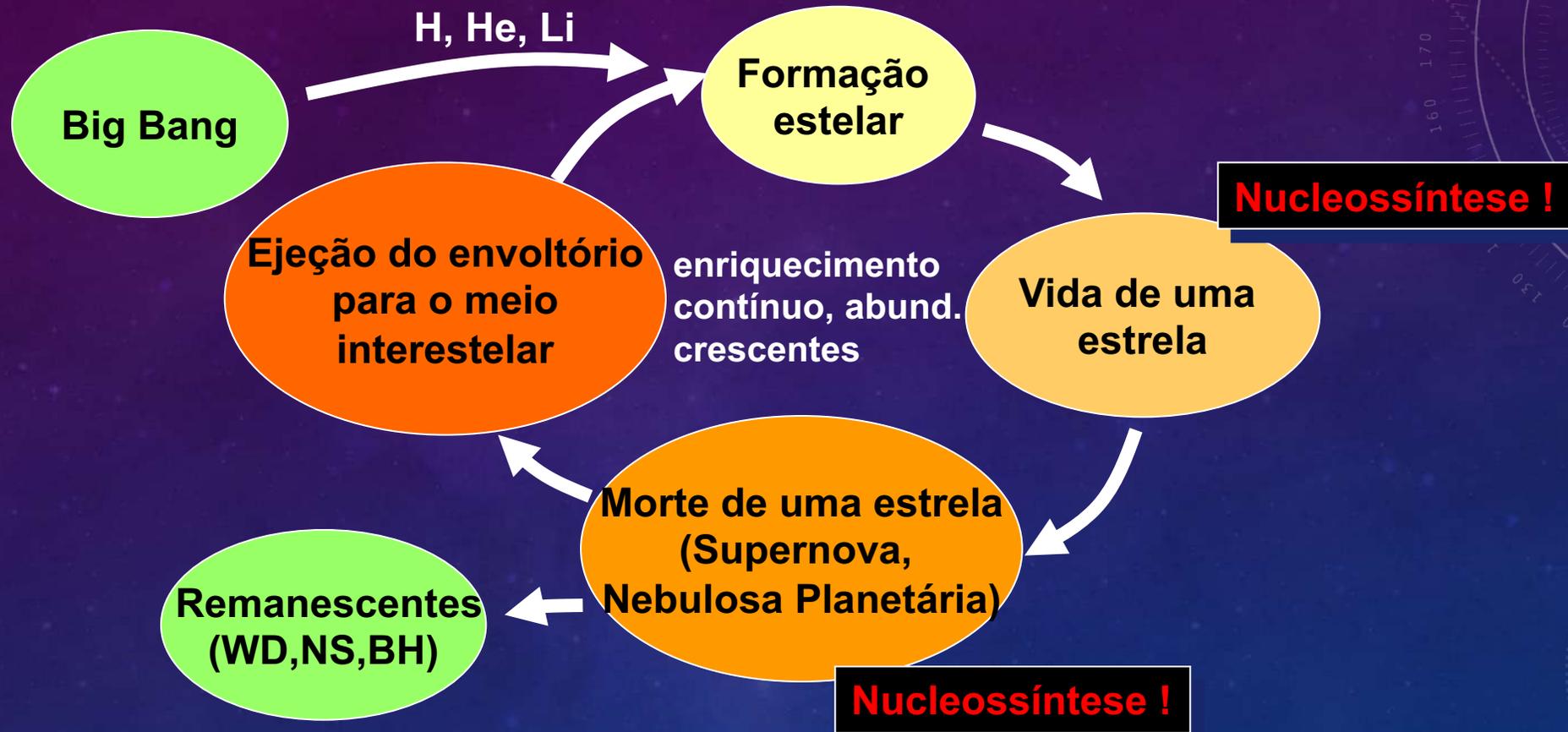
Atenção: a escala vertical é logarítmica!



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

ONDE ESTÃO OS PROBLEMAS ATUAIS NESSA ÁREA ?

- Como variam (ao longo do raio e no tempo) as abundâncias na 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 mais gerais 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?

A busca de bioassinaturas (biomarcadores)

Um problema atual, que é intimamente ligado às abundâncias químicas das estrelas

O que são **bioassinaturas**? São evidências de atividade biológica extraterrestre. **Nenhuma foi encontrada ainda**, mas este é um tema de vanguarda intimamente associado à procura de exoplanetas.

Em que consistem? Podem ser de distintas naturezas, tais como **compostos químicos que necessitam de atividade biológica para ser produzidos; matéria orgânica; fósseis**, etc.

Onde poderiam ser encontrados? Em **superfícies ou atmosferas** de planetas ou satélites.

Um exemplo: as quantidades de **oxigênio e metano** encontradas na atmosfera da Terra não podem ser explicadas apenas por processos geológicos, elas são consequência da atividade biológica na superfície de nosso planeta.

Atualmente existe uma busca ativa de bioassinaturas em diversos corpos do Sistema Solar, tais como Marte, Titã, Europa e Encélado. Com os novos telescópios da categoria de 30-40 m de diâmetro atualmente em construção será possível procurar **bioassinaturas nas atmosferas de exoplanetas próximos do Sol**. Alvos muito promissores seriam os planetas existentes em torno de Proxima Centauri, a estrela mais próxima do Sol.

Um caso ainda mais extremo: as **tecnoassinaturas**. Seriam evidências da existência de uma civilização tecnológica! Exemplos desse tipo seriam obras de astroengenharia, evidências de radiocomunicação, poluição atmosférica em planetas que seja de origem artificial, tal como CFC ou NO₂ na Terra, luz difusa na atmosfera que seja produzida por megalópoles, veículos com capacidade interestelar, etc.

UM RACIOCÍNIO SIMPLES:

- Fração das estrelas que têm planetas: 100% (dados do satélite Kepler)
- Quantidade média de planetas por estrela: ~ 10
- Número típico de estrelas por galáxia: ~ 100 bilhões (10^{11})
- Total estimado de galáxias no Universo: ~ 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.

QUER SABER MAIS SOBRE ASTRONOMIA?

- [Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP](#)



- [Departamento de Astronomia](#)



- [Atividades de Extensão: cursos, projetos, visitas, dúvidas, livros ...](#)



- [Um livro: O Céu que nos Envolve](#)

