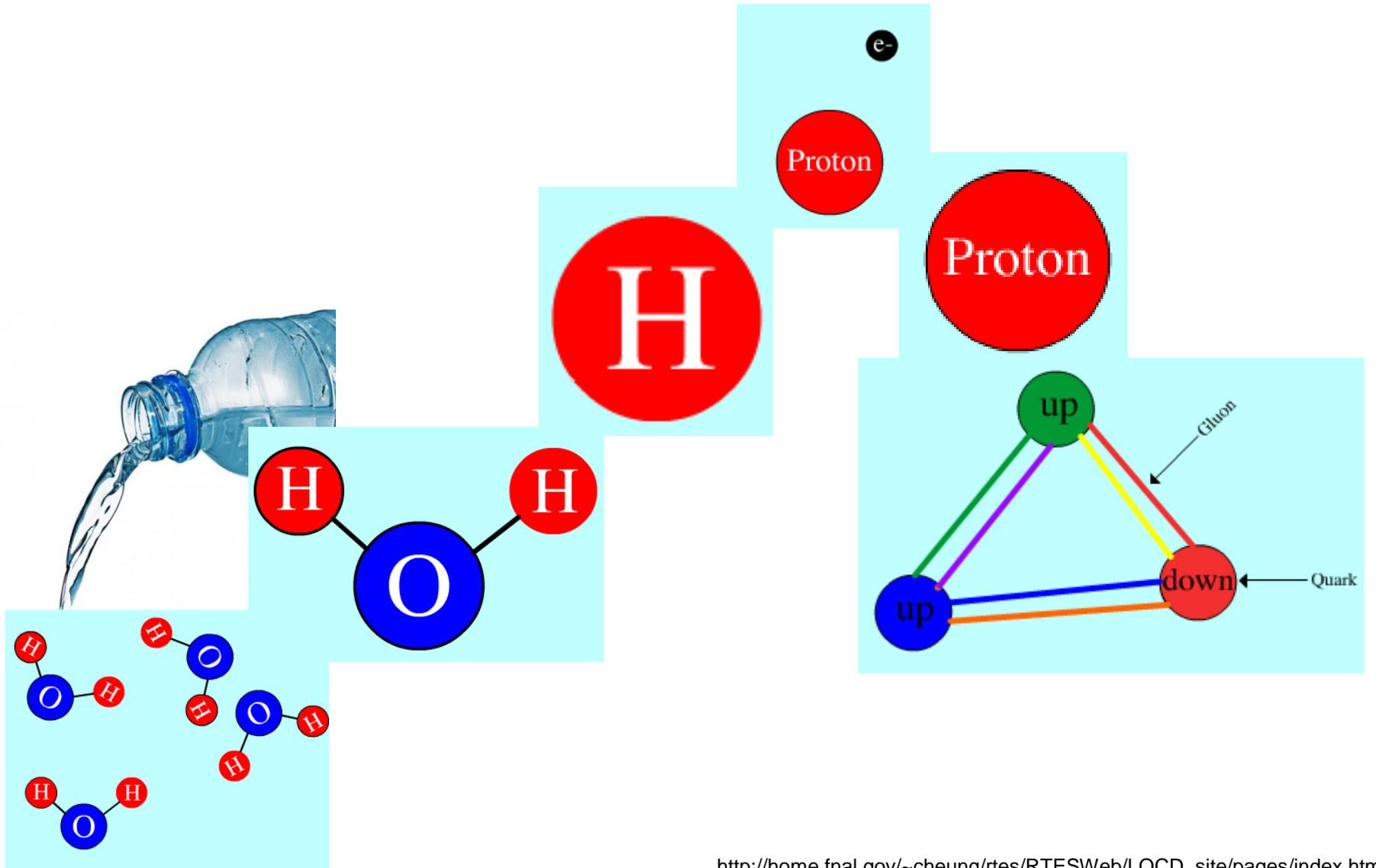


Fissão e Fusão *Nucleares*

3ª série FSC/FIS Ensino Médio Integrado

André Cipoli
Rogério Burgugi

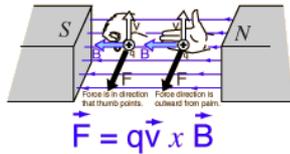
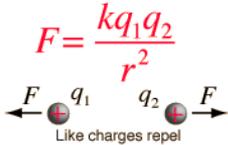
Do Macro ao Micro - O Modelo Padrão



Forças Fundamentais na Natureza

Electric

Magnetic



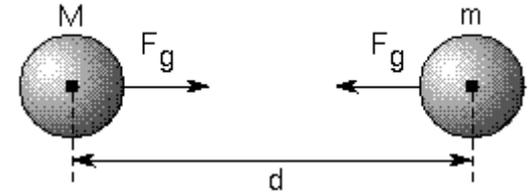
Força gravitacional

Força eletromagnética

Força nuclear forte

Força nuclear fraca

$$\vec{F}_{\text{eletromagnética}} = \vec{F}_{\text{elétrica}} + \vec{F}_{\text{magnética}}$$



$$F_g = \frac{GMm}{d^2}$$

$$G = 6,67384 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$$

Comparações

$$F_{\text{forte}} \approx 100 \times F_{\text{eletromag}}$$

$$F_{\text{fraca}} \approx 10^{-11} \times F_{\text{eletromag}}$$

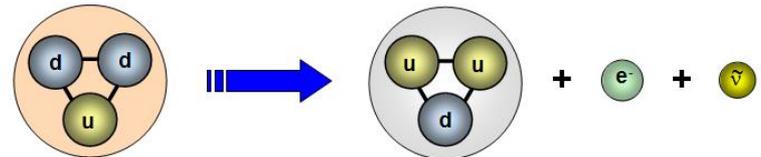
Alcance $\approx 1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$

Alcance $\approx 1\text{am} = 10^{-18}\text{m}$

- entre núcleons \rightarrow 1 a 3fm
- interior dos núcleons \rightarrow < 0,8fm

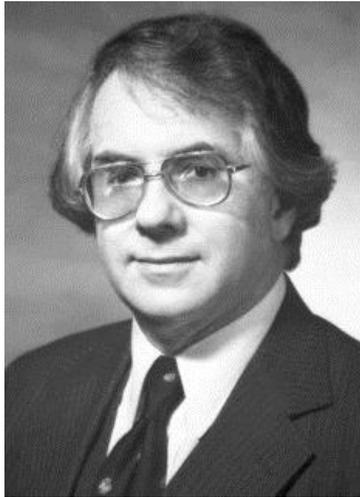
Beta⁻ decay: $n \rightarrow p + \beta^- + \tilde{\nu}$

Meia vida $\approx 10,3$ min

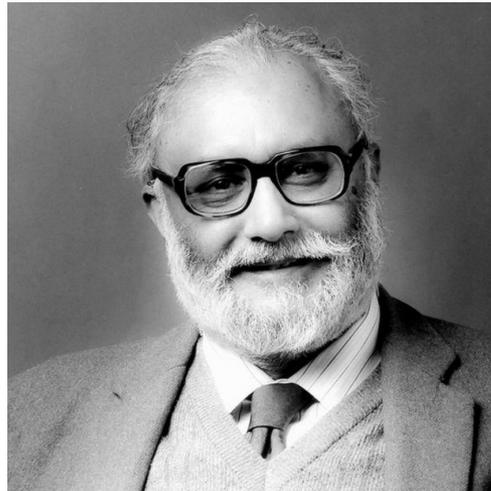


Unificação das Forças Eletromagnética e Nuclear Fraca

“Teoria Eletrofraca”



Sheldon L. Glashow
1932
1963



Abdus Salam
1926 - 1996
1967



Steven Weinberg
1933
1967

Prêmio Nobel de 1979

"for their contributions to the theory of the unified weak and electromagnetic interaction between elementary particles, including, inter alia, the prediction of the weak neutral current."

Apoio experimental à Teoria Eletrofraca



Carlo Rubbia
1934
1983



Simon van der Meer
1925 - 2011
1983

Prêmio Nobel de 1984

"for their decisive contributions to the large project, which led to the discovery of the field particles W and Z, communicators of weak interaction."

Teoria do Campo Unificado

Relatividade Geral → Gravidade

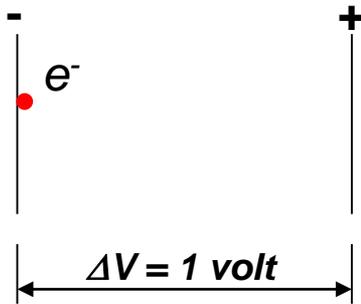
+

Mecânica Quântica

Teoria das Cordas

???

- Conhecendo outra unidade de energia:



$$U = q \times \Delta V$$

$$q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} = e$$

$$U = 1\text{V} \times 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} = 1,602 \times 10^{-19} [\text{C} \times \text{V}] \rightarrow \text{J}$$

$$\therefore, 1\text{eV} \rightarrow 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- **1 u.m.a. = u** → **1/12 da massa do átomo C¹² = $1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$**

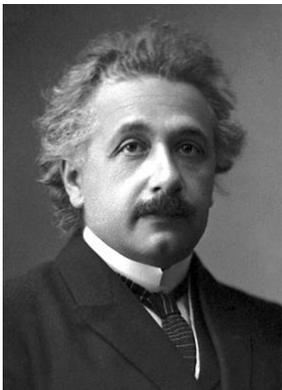
$m_{\text{H}} = 1,00794 \text{ u} \pm 0,00001 \text{ u}$
 $m_{\text{p}} = 1,007276466879(91) \text{ u}$
 $m_{\text{N}} = 1,00866491588(49) \text{ u}$

$m_{\text{e}} = 5,4857991 \times 10^{-4} \text{ u (Da)}$
 $m_{\text{p}} = 1,007825 \text{ u}$
 $m_{\text{H}} = 1,007825 \text{ u}$
 $m_{\text{He}} = 4,002602 \text{ u}$

- Conhecendo a equação de Einstein:

$$E = m \times c^2, \text{ onde } c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

1905



Albert Einstein
1879 - 1955

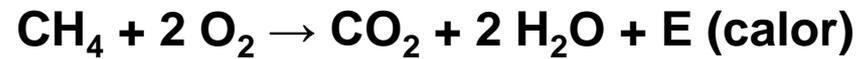
"A inércia de um corpo depende de seu conteúdo de energia?"

1905

- se um dado sistema **ganha** uma quantidade de energia E , sua massa **aumenta** de uma quantidade dada por E/c^2 .
- se um dado sistema **perde** uma quantidade de energia E , sua massa **diminui** de uma quantidade dada por E/c^2 .

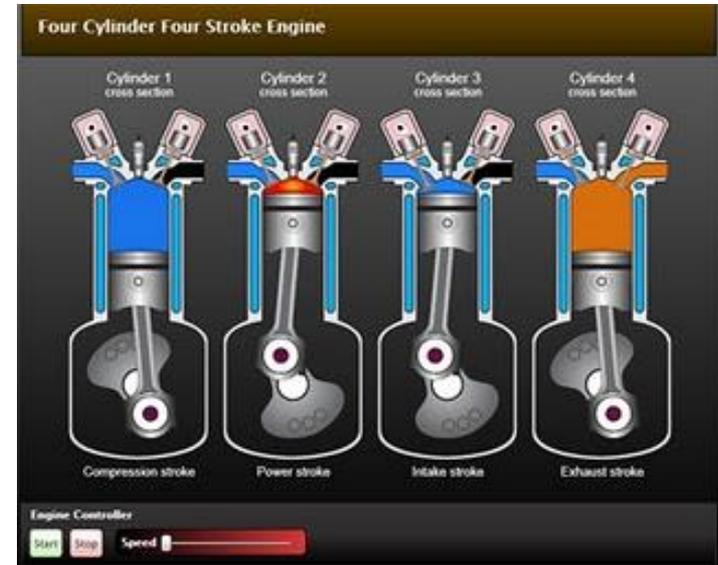
Processos de obtenção de energia

Combustão



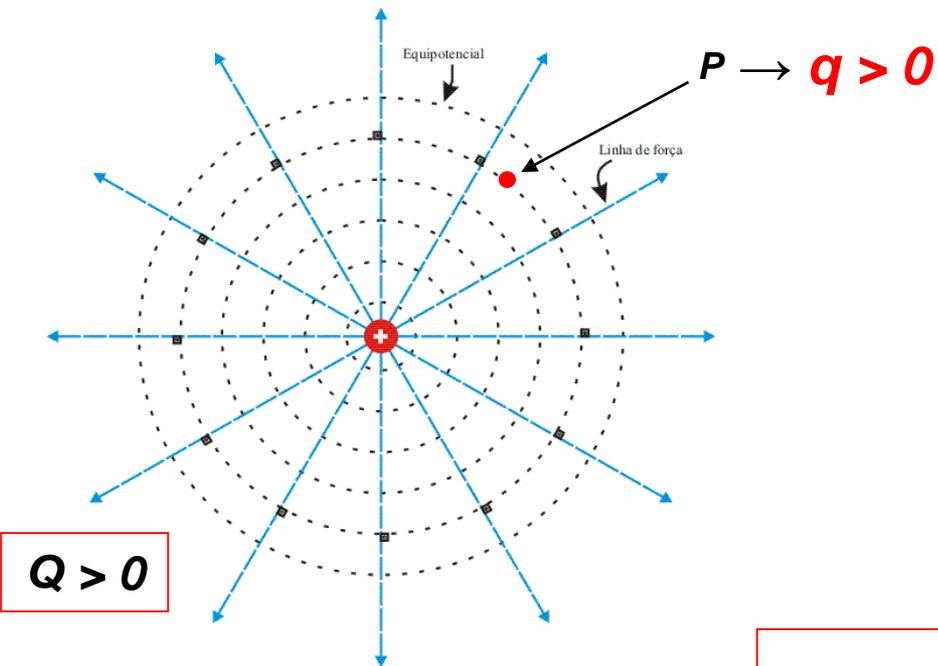
Poder calorífico Metano = 8.500 kcal/m³

Densidade do Metano = 0,66 kg/m³



Energia Potencial Eletrostática

- Para o caso de um próton e o referencial de V nulo no infinito:



$$V_{p_\infty} = k \times \frac{Q}{d} > 0$$

onde

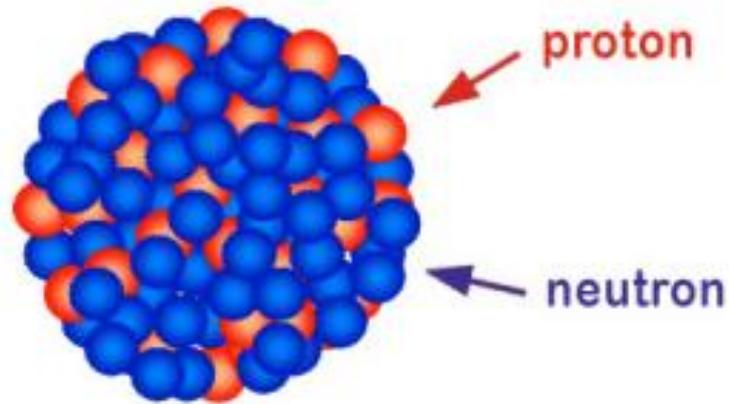
$$k \approx 9 \times 10^{+9} \frac{N \times m^2}{C^2}$$

- Para o caso de dois prótons:

$$E_{pot.eletr.} = k \times \frac{q \times Q}{d} > 0 \text{ (repulsão)}$$

Energia Potencial Nuclear

Próton ou nêutron → núcleon



Para manter os núcleons unidos, a energia potencial nuclear deve ser **< 0 (atração)**

Como

$$E_{Lig.Nuclear} = E_{Pot.Eletr.} + E_{Pot.Nuclear}$$

a **energia de ligação nuclear** deve ser, necessariamente, **< 0 (atração) !!**

Energia de Ligação Nuclear

É a energia liberada quando da formação de um núcleo qualquer, a partir de seus prótons ● , elétrons ● e nêutrons ● , separados de uma distância infinita.

$$\underbrace{Z \times m_P + Z \times m_e + (A - Z) \times m_N}_{\text{Massa inicial}} > \underbrace{M(Z, A)}_{\text{Massa final}}$$

Átomo
Neutro

$$Z \times m_P + Z \times m_e + (A - Z) \times m_N = M(Z, A) + \frac{E}{c^2}$$

onde,

≈ 0

• Cálculo da Energia de Ligação Nuclear

Z → número atômico (prótons)

A → número de massa (prótons + nêutrons)

M(Z,A) → massa do núcleo formado



Átomo de H

Átomo de He

$$E = [Z \times m_P + (A - Z) \times m_N - M(Z, A)] \times c^2$$

Energia de Ligação Nuclear

Exercícios

Determinar a **energia de ligação nuclear** para os seguintes elementos químicos [Abundância Natural (%)]:

$$m_e = 5,4857991 \times 10^{-4} u$$

$$m_p = 1,007276467 u$$

$$m_H = 1,007825 u (99,985\%)$$

$$m_{He} = 4,002602 u (100\%)$$

$$m_n = 1,008664916 u$$

$$u = 1,660539067 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\bullet \text{}^7\text{Li}_3 (92,5\%) \longrightarrow 7,016003 u$$

$$\bullet \text{}^9\text{Be}_4 (100\%) \longrightarrow 9,012182 u$$

$$\bullet \text{}^{23}\text{Na}_{11} (100\%) \longrightarrow 22,989767 u$$

$$\bullet \text{}^{24}\text{Mg}_{12} (78,99\%) \longrightarrow 23,985042 u$$

$$\bullet \text{}^{39}\text{K}_{19} (93,2581\%) \longrightarrow 38,963707 u$$

$$\bullet \text{}^{40}\text{Ca}_{20} (96,941\%) \longrightarrow 39,62591 u$$

$$\bullet \text{}^{85}\text{Rb}_{37} (72,17\%) \longrightarrow 84,911794 u$$

Tabela Periódica

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	1A	2A		3B	4B	5B	6B	7B	8B		1B	2B	3A	4A	5A	6A	7A	8A
1	1 H Hidrogênio 1,00784																	2 He Hélio 4,002602
2	3 Li Lítio 6,941	4 Be Berílio 9,012182											5 B Boro 10,811	6 C Carbono 12,0107	7 N Nitrogênio 14,0067	8 O Oxigênio 15,9994	9 F Flúor 18,9984032	10 Ne Neônio 20,1797
3	11 Na Sódio 22,98976...	12 Mg Magnésio 24,305											13 Al Alumínio 26,9815386	14 Si Silício 28,0855	15 P Fósforo 30,973762	16 S Enxofre 32,065	17 Cl Cloro 35,453	18 Ar Argônio 39,948
4	19 K Potássio 39,0983	20 Ca Cálcio 40,078	21 Sc Escândio 44,955912	22 Ti Titânio 47,887	23 V Vanádio 50,9415	24 Cr Cromo 51,9961	25 Mn Manganês 54,938045	26 Fe Ferro 55,845	27 Co Cobalto 58,933195	28 Ni Níquel 58,6934	29 Cu Cobre 63,546	30 Zn Zinco 65,38	31 Ga Gálio 69,723	32 Ge Germânio 72,63	33 As Arsênio 74,9216	34 Se Selênio 78,96	35 Br Bromo 79,904	36 Kr Criptônio 83,798
5	37 Rb Rubídio 85,4678	38 Sr Estrôncio 87,62	39 Y Ítrio 88,90585	40 Zr Zircônio 91,224	41 Nb Níbio 92,90638	42 Mo Molibdênio 95,96	43 Tc Tecnécio (98)	44 Ru Rutênio 101,07	45 Rh Ródio 102,9055	46 Pd Paládio 106,42	47 Ag Prata 107,8682	48 Cd Cádmio 112,411	49 In Índio 114,818	50 Sn Estanho 118,71	51 Sb Antimônio 121,76	52 Te Telúrio 127,6	53 I Iodo 126,90447	54 Xe Xenônio 131,293
6	55 Cs Césio 132,9054...	56 Ba Bário 137,327	57-71 *	72 Hf Háfnio 178,49	73 Ta Tântalo 180,94788	74 W Tungstênio 183,84	75 Re Rênio 186,207	76 Os Ósmio 190,23	77 Ir Íridio 192,217	78 Pt Platina 195,084	79 Au Ouro 196,966569	80 Hg Mercúrio 200,59	81 Tl Tálio 204,3833	82 Pb Chumbo 207,2	83 Bi Bismuto 208,9804	84 Po Polônio (209)	85 At Astató (210)	86 Rn Radônio (222)
7	87 Fr Frâncio (223)	88 Ra Rádio (226)	89-103 **	104 Rf Rutherfordio (267)	105 Db Dübnió (268)	106 Sg Seabórgio (271)	107 Bh Bóhrio (272)	108 Hs Hássio (270)	109 Mt Meitnério (278)	110 Ds Darmstádio (281)	111 Rg Roentgênio (280)	112 Cn Copernício (285)	113 Uut Ununtrio (284)	114 Uuq Ununquádrío (289)	115 Uup Ununpentío (288)	116 Uuh Ununhécio (293)	117 Uus Ununseptío (294)	118 Uuo Ununoctío (294)
				57 La Lantânio 138,90547	58 Ce Cério 140,116	59 Pr Praseodímio 140,90768	60 Nd Neodímio 144,242	61 Pm Promécio (145)	62 Sm Samário 150,36	63 Eu Európio 151,964	64 Gd Gadolínio 157,25	65 Tb Térbio 158,92535	66 Dy Disprósio 162,5	67 Ho Hólmio 164,93032	68 Er Érbio 167,259	69 Tm Túlio 168,93421	70 Yb Ítérbio 173,054	71 Lu Lutécio 174,9668
				89 Ac Actínio (227)	90 Th Tório 232,03806	91 Pa Protactínio 231,03688	92 U Urânio 238,02891	93 Np Neptúnio (237)	94 Pu Plutónio (244)	95 Am Americio (243)	96 Cm Cúrio (247)	97 Bk Berquélio (247)	98 Cf Califórnio (251)	99 Es Einsténio (252)	100 Fm Férmio (257)	101 Md Mendeleívio (258)	102 No Nobélio (259)	103 Lr Lauréncio (262)

- Metals alcalinos
- Metals alcalino-terrosos
- Metals de transição
- Lantanídeos
- Actinídeos

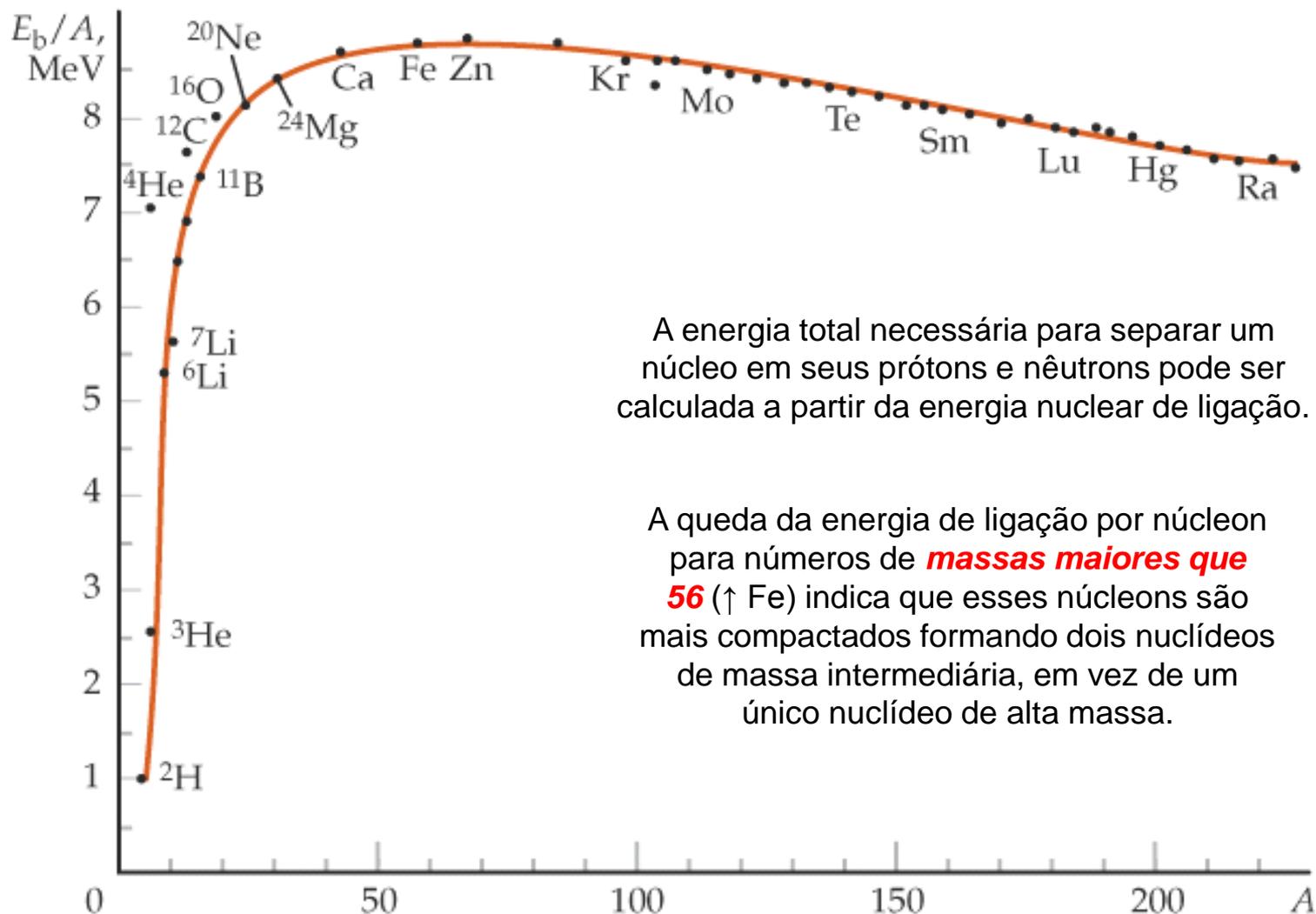
- Metals representativos
- Semi-metals
- Não-metals
- Halogênios
- Gases nobres

- C Sólido
- Hg Líquido
- H Gasoso
- Rf Desconhecido

www.tabelaperiodicacompleta.com

Nº Atômico
Simbolo
 Nome
 Massa Atômica

Curva Energia de Ligação por núcleon x Número de massa (A)

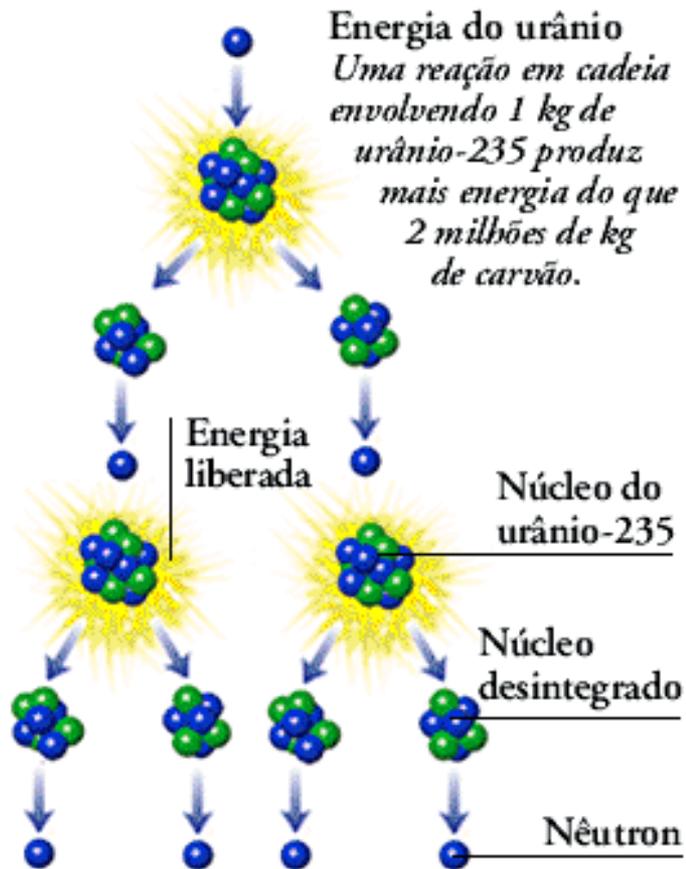


A energia total necessária para separar um núcleo em seus prótons e nêutrons pode ser calculada a partir da energia nuclear de ligação.

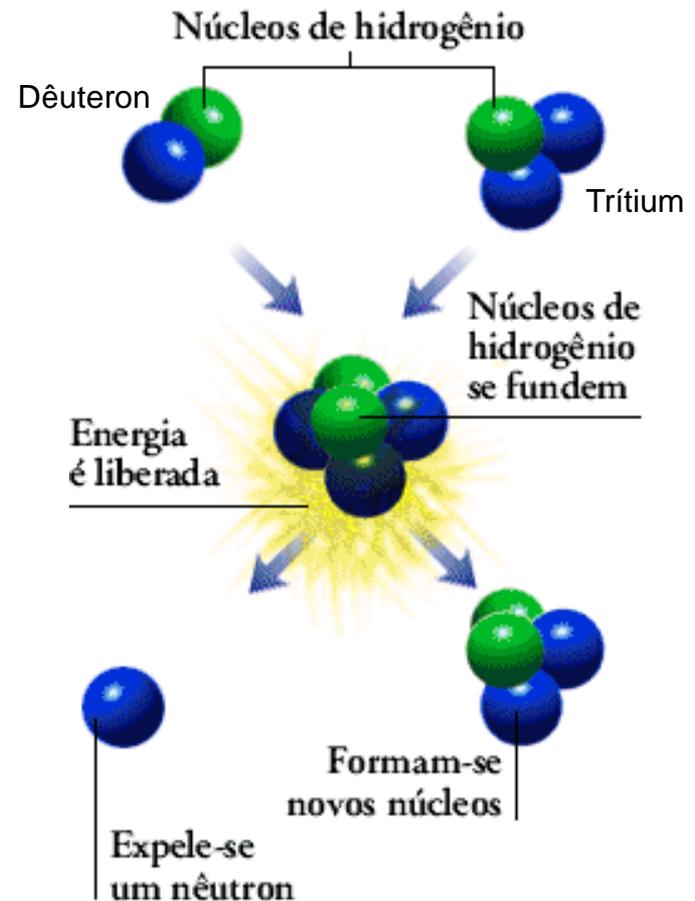
A queda da energia de ligação por núcleon para números de **massas maiores que 56** (\uparrow Fe) indica que esses núcleons são mais compactados formando dois núclídeos de massa intermediária, em vez de um único núclídeo de alta massa.

Processos de obtenção de energia

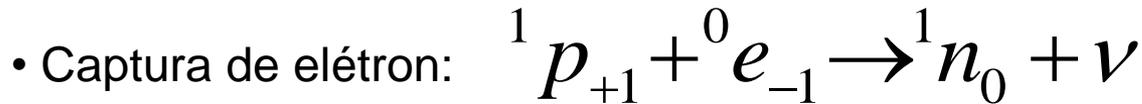
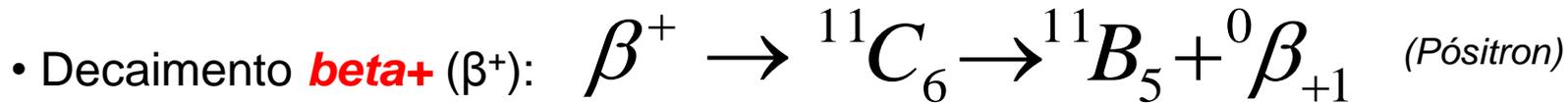
• Fissão Nuclear



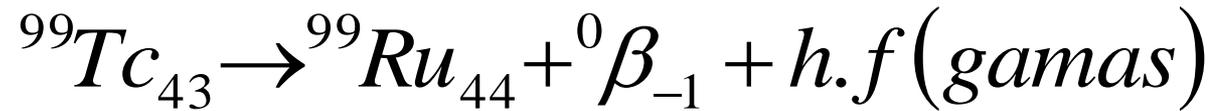
• Fusão Nuclear



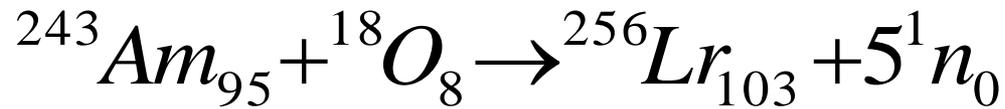
Produtos de algumas reações nucleares!!



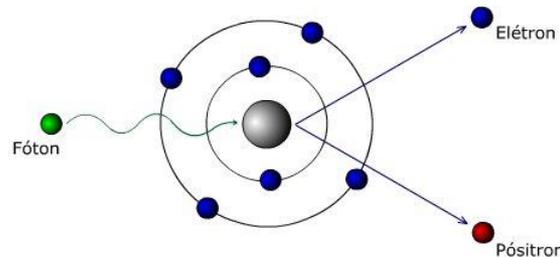
• Emissão **gama** (γ): $^{215}\text{Po}_{84} \rightarrow ^{211}\text{Pu}_{82} + ^4\alpha_2 + h.f(\text{gammas})$



• Transmutação nuclear: $^{14}\text{N}_7 + ^4\alpha_2 \rightarrow ^1\text{p}_1 + ^{17}\text{O}_8$

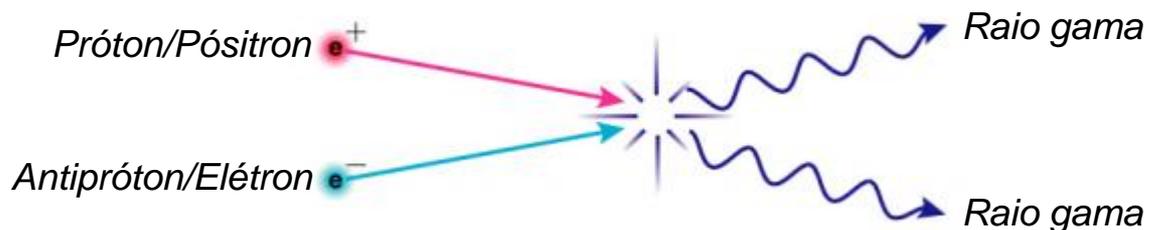


• Produção de pares:



$$E_{\text{fóton}} = (m_{e^-} + m_{e^+}) \cdot c^2$$

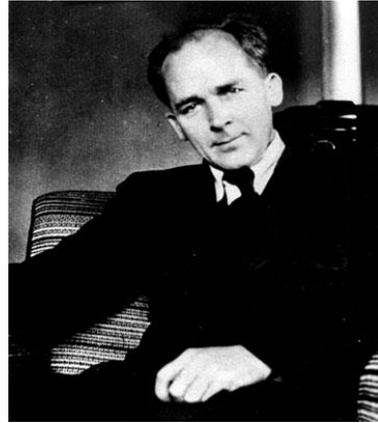
• Aniquilação de pares:



Fissão Nuclear



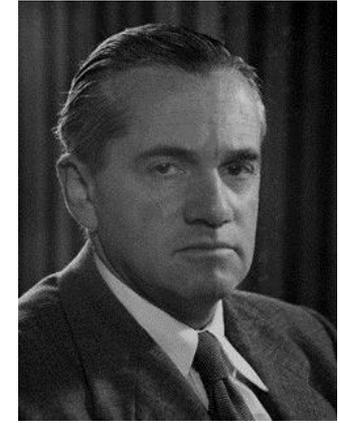
Otto Hahn
1879 - 1968
Nobel de
Química- **1944**



Fritz Strassmann
1902 - 1980



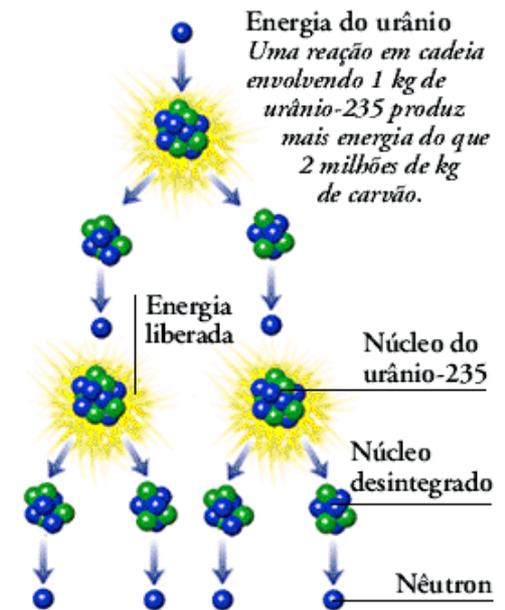
Lise Meitner
1878 - 1968



Otto R. Frisch
1904 - 1979



17/12/1938



Extração e Processo de enriquecimento de Urânio



Mina de Caetité - BA



■ Instalações / Production facilities
● Depósitos / Ore Deposits

ENRIQUECER URÂNIO

URÂNIO NATURAL



1

Extração: o mineral se encontra nas rochas que se extraem das minas de urânio



2

Concentração: é a etapa de trituração e dissolução química para extrair o urânio em forma de pó amarelo

PROCESSO DE ENRIQUECIMENTO

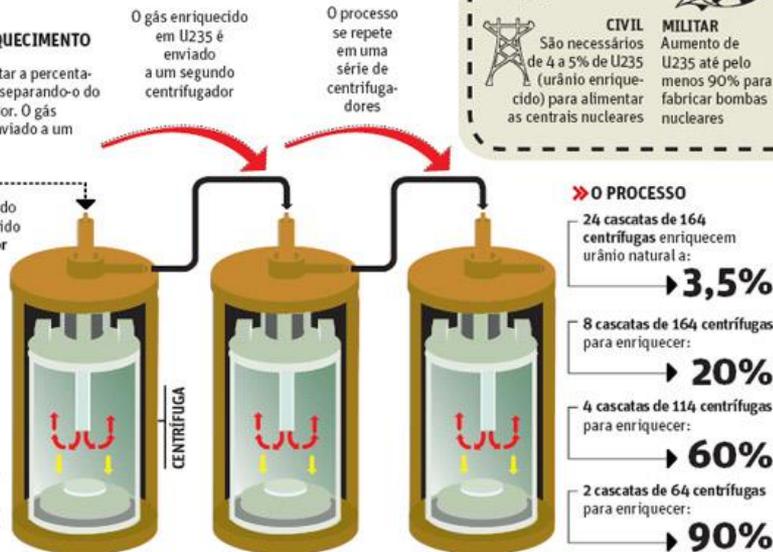
4 Consiste em aumentar a percentagem de urânio 235, separando-o do urânio 238 no centrífugador. O gás enriquecido em U235 é enviado a um segundo centrífugador

3 O urânio em estado gasoso é introduzido no centrífugador

3 **Conversão:** é a mistura com fluorina para obter um gás

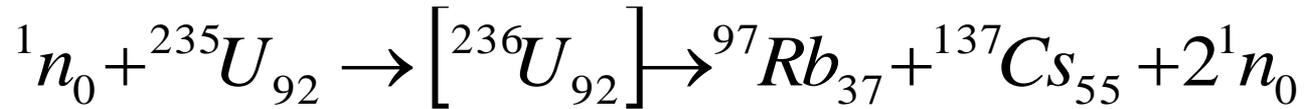
O U235, mais leve, sobe

O U238, mais pesado, vai para o fundo e é extraído



Fábrica de Combustível Nuclear - Resende (RJ) / Divulgação INB

Fazendo algumas contas para a fissão do urânio 235...



$$u \times c^2 = 1,660539067 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$u \times c^2 = 1,492418086 \times 10^{-10} \text{ J}$$

$$\left. \begin{array}{l} 1,602 \times 10^{-19} \text{ J} \rightarrow 1 \text{ eV} \\ 1,4919336 \times 10^{-10} \text{ J} \rightarrow x \end{array} \right\} \therefore u \times c^2 = 9,31597 \times 10^2 \frac{\text{MeV}}{u}$$

$${}^{235}\text{U} = 235,043924 \text{ u}$$

$${}^{97}\text{Rb} = 96,93744 \text{ u}$$

$$m_n = 1,008664 \text{ u}$$

$${}^{137}\text{Cs} = 136,907093 \text{ u}$$

$${}^{236}\text{U} = 236,045562 \text{ u}$$

Estime a energia liberada pela fissão do Urânio 235

<http://coral.ufsm.br/gef/Nuclear/nuclear04.pdf>

<http://coral.ufsm.br/gef/Nuclear/nuclear12.pdf>

<http://nautilus.fis.uc.pt/st2.5/index-pt.html>

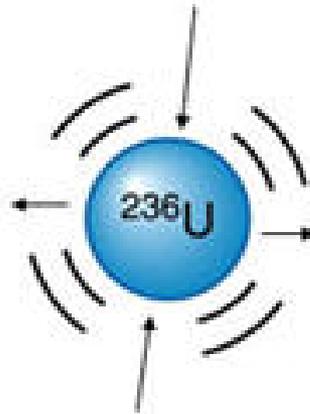
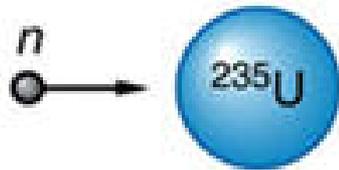
http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fission

<http://conhecerparadebater.blogspot.com.br/2011/04/fissao-nuclear-e-o-processo-pelo-qual.html>

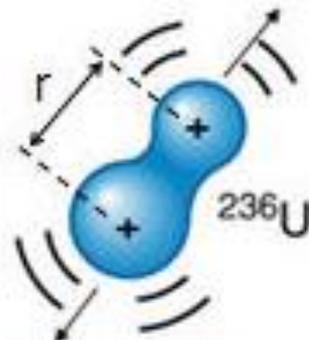
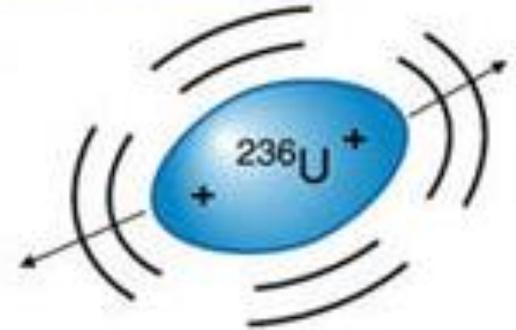
Modelo explicativo para a Fissão Nuclear

“Modelo da Gota Líquida” - *Gamow (1930)* e *Bohr e Wheeler (1939)*

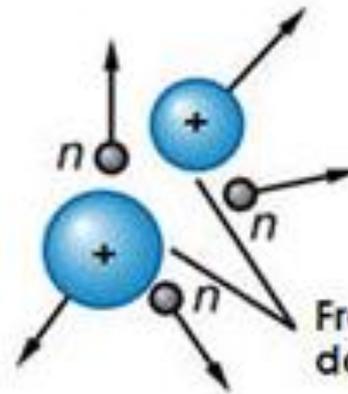
O urânio-235 absorve um neutron térmico



É formado um núcleo composto com excesso de energia que oscila violentamente.



A repulsão elétrica produz um estrangulamento ligando dois glóbulos



A fissão ocorre, os fragmentos se separam e neutros são ejetados

Fragmentos da fissão

Outras possibilidades para a fissão do urânio 235...

Exercícios



$$\text{Zr} = 96,91095 \text{ u}$$

$$\text{Te} = 136,92541 \text{ u}$$

$$\text{Sr} = 93,915367 \text{ u}$$

$$\text{Xe} = 139,92162 \text{ u}$$

$$\text{Br} = 86,92069 \text{ u}$$

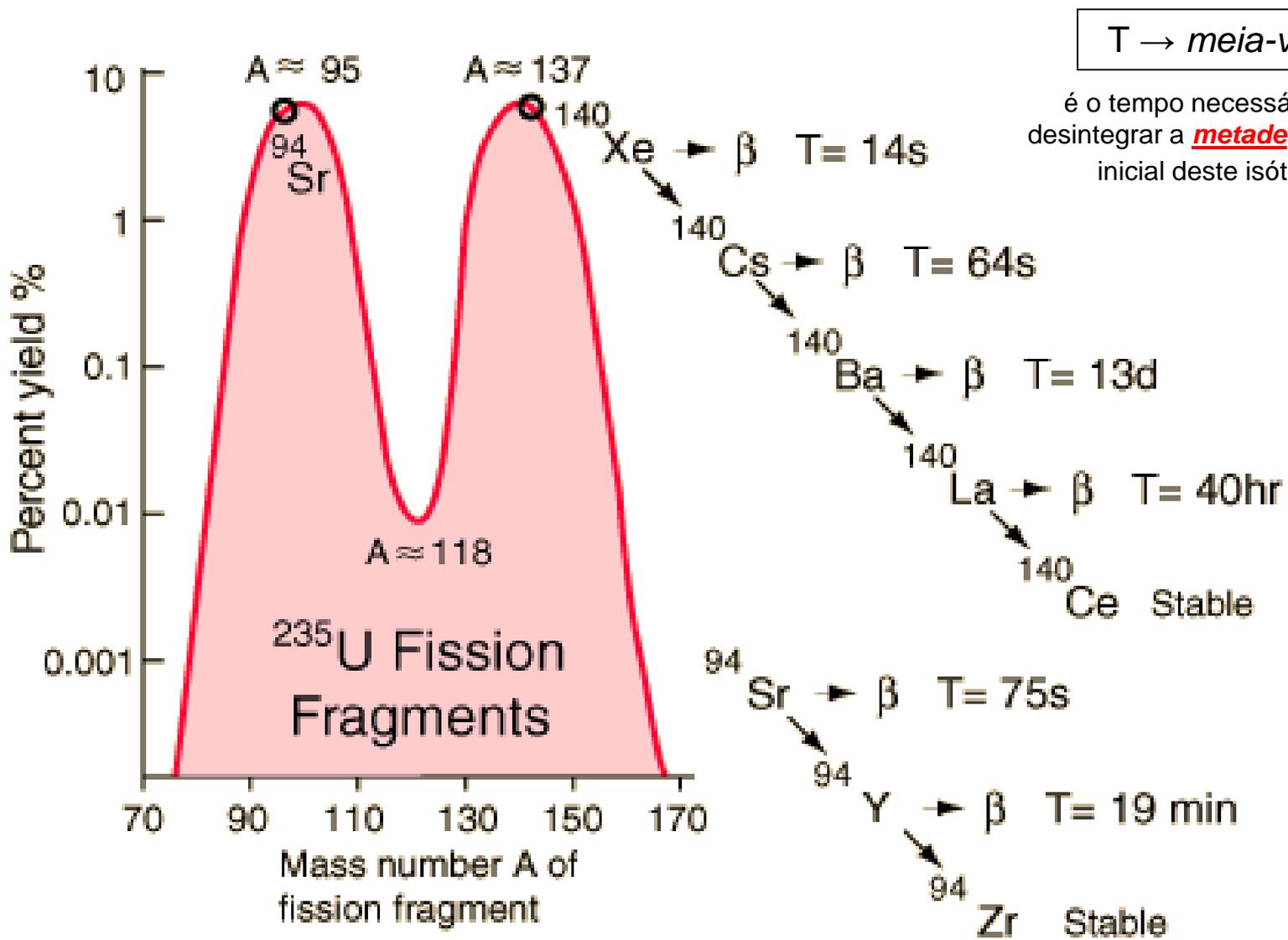
$$\text{La} = 142,91409 \text{ u}$$

$$\text{Kr} = 91,92627 \text{ u}$$

$$\text{Ba} = 140,914363 \text{ u}$$

Energia??

Mais possibilidades para a fissão do urânio 235...

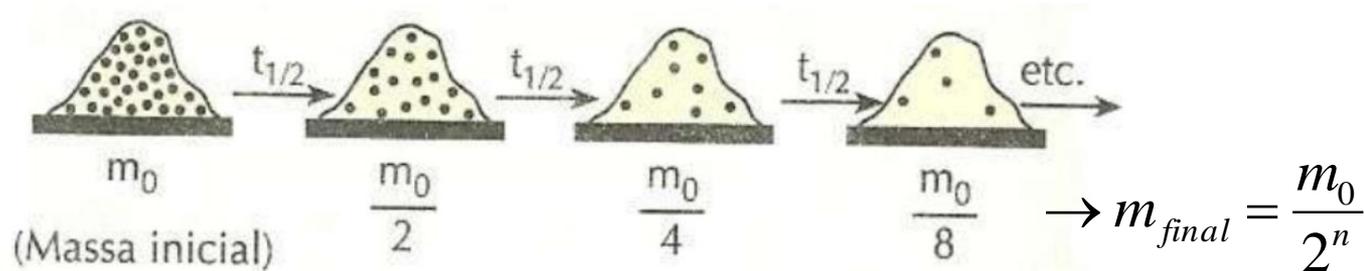


$T \rightarrow$ meia-vida

é o tempo necessário para desintegrar a metade da massa inicial deste isótopo.

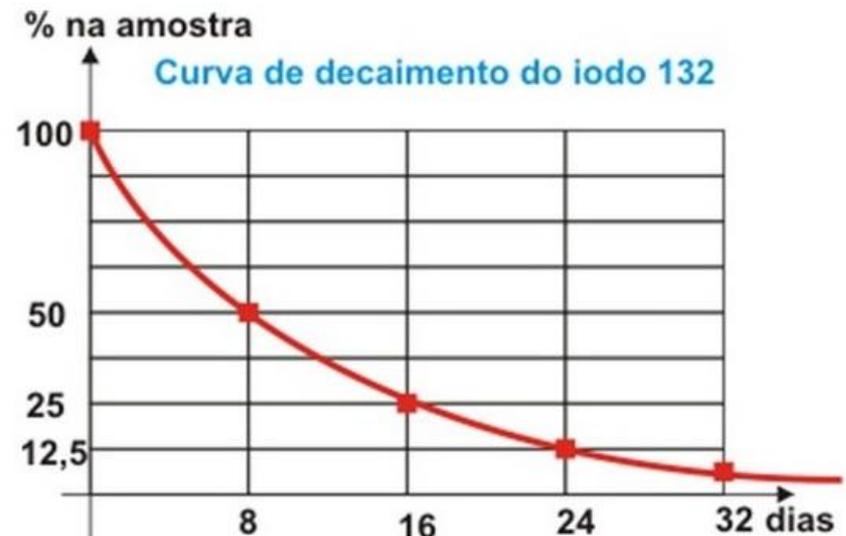
Datação

A **meia-vida** ($t_{1/2}$) de uma substância entrando em desintegração é o tempo que leva para que a massa inicial da amostra diminua pela metade.



, onde **n** representa o número de meias vidas. Logo, o tempo de medição Δt vale **$n \cdot t_{1/2}$** .

Observa-se que o decaimento obedece a uma função **exponencial**, cujo gráfico é mostrado ao lado, para o caso do ^{132}I .



Como a **meia vida** é determinada?

- Meça a massa inicial da amostra pura em uma balança. Inicie a contagem do tempo com um cronômetro;
- Após um certo tempo, separe da amostra pura o produto que sofreu o decaimento e meça a massa residual em uma balança;

• Por fim, faça a seguinte conta: $m_{final} = \frac{m_0}{2^n} \rightarrow m_f \cdot 2^n = m_0 \quad \ln(m_f) + \ln(2^n) = \ln(m_0)$

$$\ln(2^n) = \ln(m_0) - \ln(m_f) \rightarrow n \cdot \ln 2 = \ln(m_0) - \ln(m_f) \rightarrow n = \frac{\ln(m_0) - \ln(m_f)}{\ln 2}$$

$$\Delta t = n \cdot t_{1/2} \rightarrow t_{1/2} = \frac{\Delta t}{n}$$

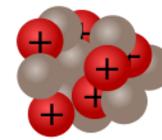
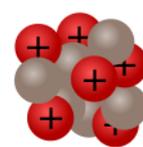
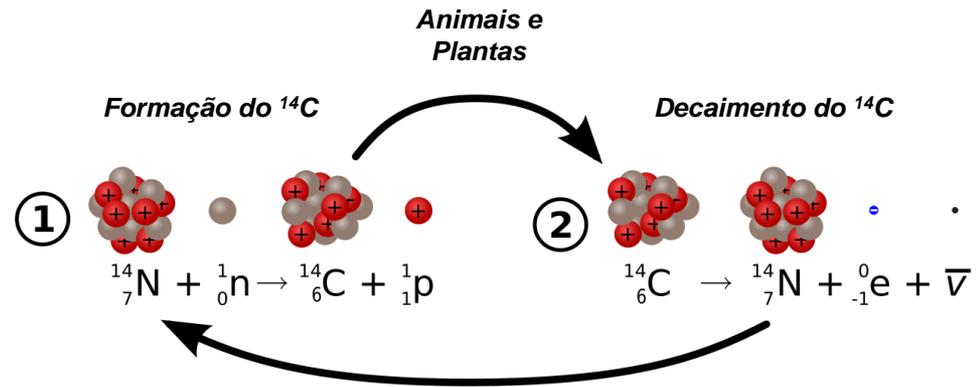
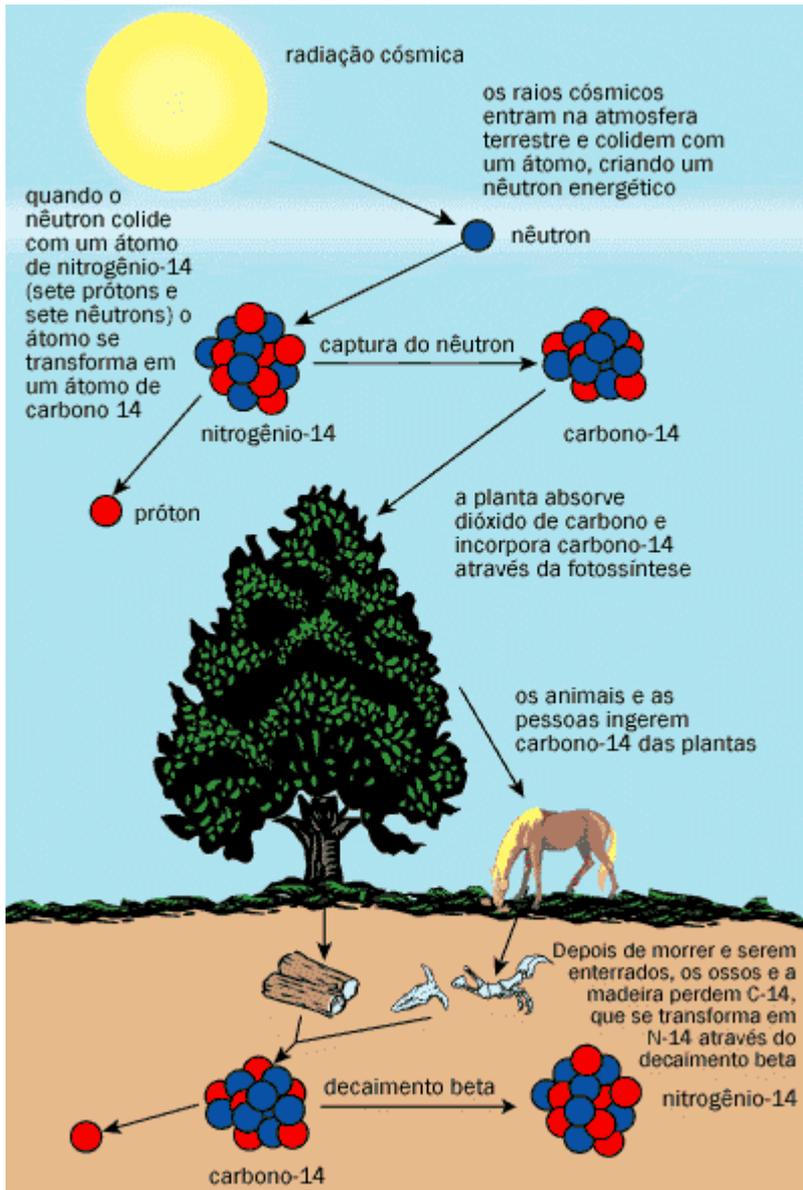
Exercícios

- 1) Se 20mg de iodo-132 for dada a um paciente, quanto sobrarão depois de 32 dias? A meia-vida do iodo-132 é de 8 dias.
- 2) Se a meia-vida do urânio-232 é de 70 anos, quantas meias-vidas serão necessárias para que 20g da substância sejam reduzidas para 1,25g?
- 3) Se um laboratório recebe um carregamento de 200g de tecnécio-99 e apenas 12,5g do isótopo sobre após 1 dia, qual a meia-vida do tecnécio-99?

A **vida média** (τ) de uma substância entrando em desintegração é o tempo que leva para que a massa inicial da amostra diminua de um fator $1/e$.

http://www.if.ufrgs.br/~marcia/FN_aula2.pdf

• Datação por Carbono 14



Para organismos vivos.

$$\text{Mol } ^{12}\text{C} = 10^{12} \cdot \text{Mol } ^{14}\text{C}$$

$$\text{Mol } ^{12}\text{C} > 10^{12} \cdot \text{Mol } ^{14}\text{C}$$

Para organismos mortos,
quando começa o
decaimento do ^{14}C em ^{14}N .

Meia vida do ^{14}C \rightarrow (5730 \pm 40) anos

Uma possibilidade para a fissão do urânio 238...



Decaimento β^{-}



Decaimento β^{-}

$U = 238,050784 \text{ u}$

$Pu = 239,052157 \text{ u}$

$Np = 239,052933 \text{ u}$

E quais são as principais utilidades para este Plutônio?

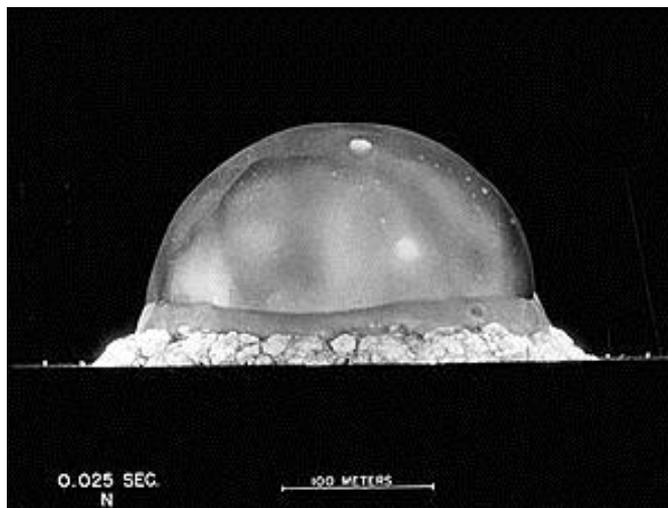
$$15,9 \text{ g/cm}^3 < d_{Pu} < 19,8 \text{ g/cm}^3$$

- Artefatos nucleares;
- Couraça de veículos blindados;
- Projéteis.

Experiência "Trinity"

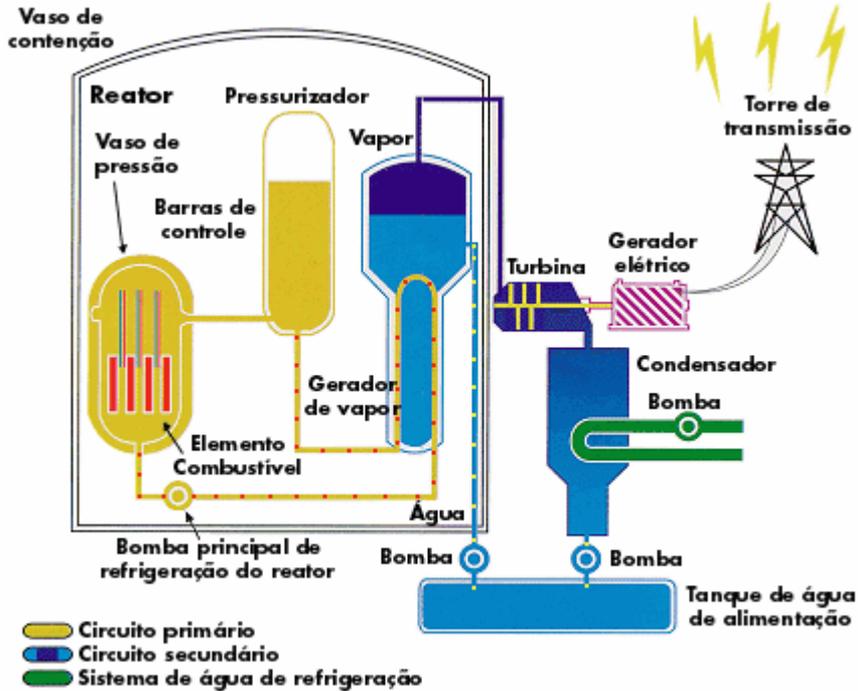
16/07/1945

20 kTon \rightarrow **20.000.000 kg de TNT**

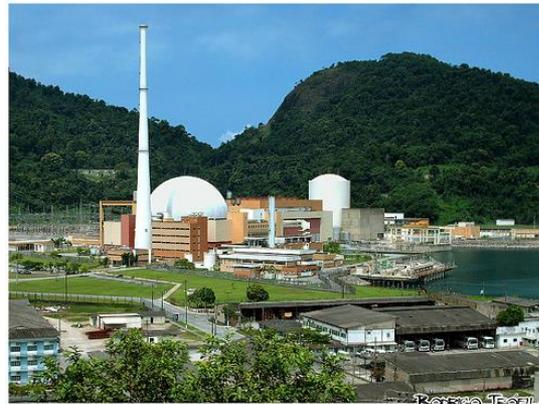


Que caminho seguir ???

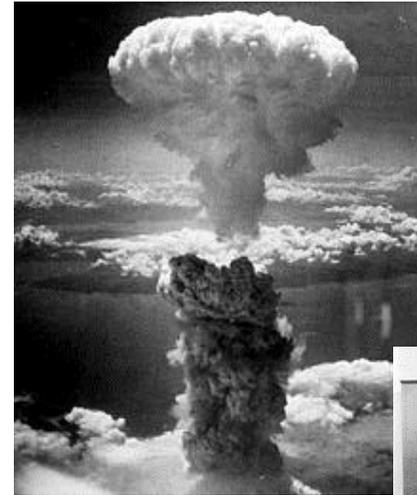
• Pacífico



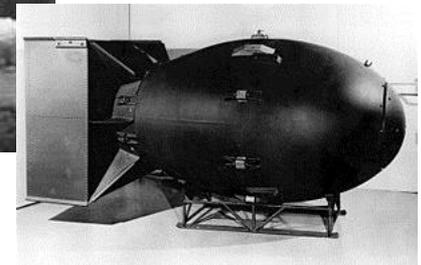
- Cura e/ou prevenção do câncer (*Radiofármacos*)
- Energia “segura”
- Independência energética
- Urânio (extração baixo custo)
- Sem efeito estufa
- Sem chuva ácida
- Menor impacto ambiental



• Não Pacífico



Nagasaki
08/1.945

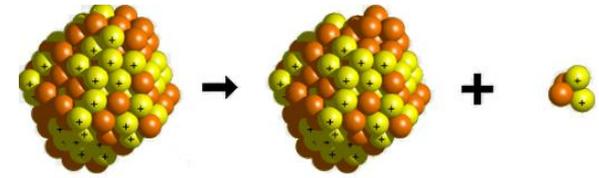
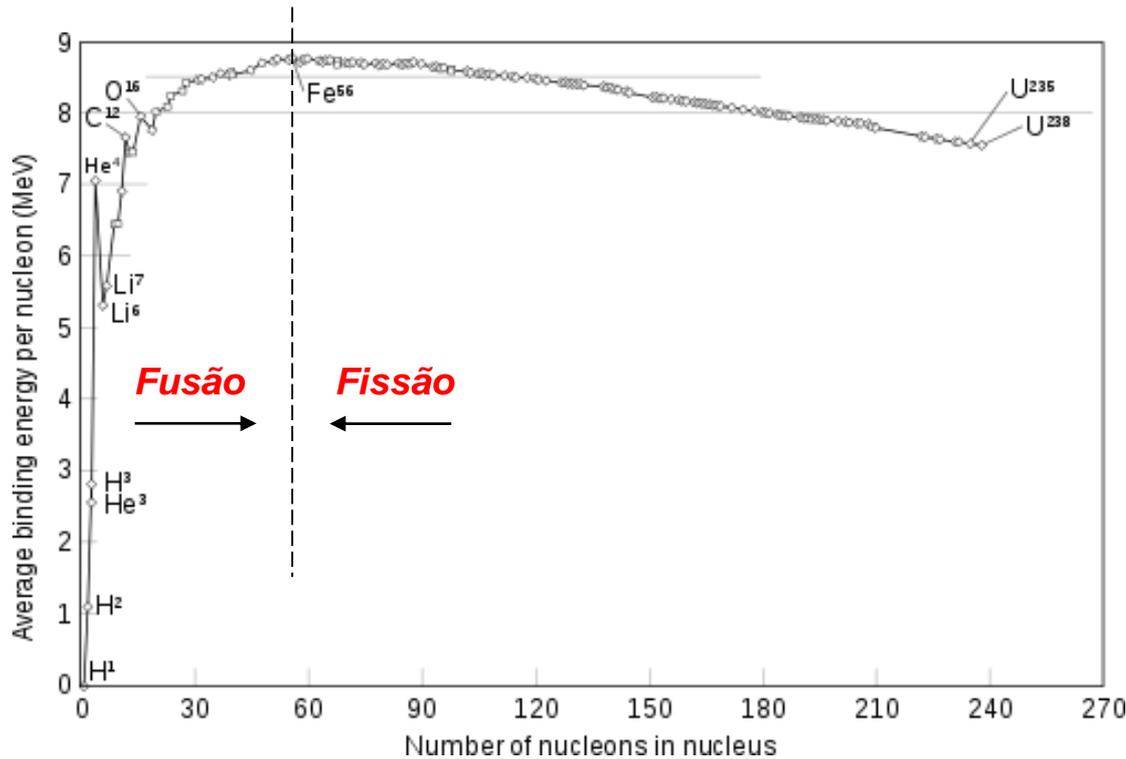


Fat Man - Pu 239
6,4 kg (21 kTon)

- Gestão dos resíduos
- Energia não-renovável
- Risco de acidente
- Fins bélicos

Angra 2
2.001
1.350 MW

Curva Energia de Ligação x Número de massa



Decaimento radioativo

Partícula α \rightarrow núcleo de hélio

Partícula β^- \rightarrow elétron gerado no núcleo

Partícula γ \rightarrow radiação eletromagnética

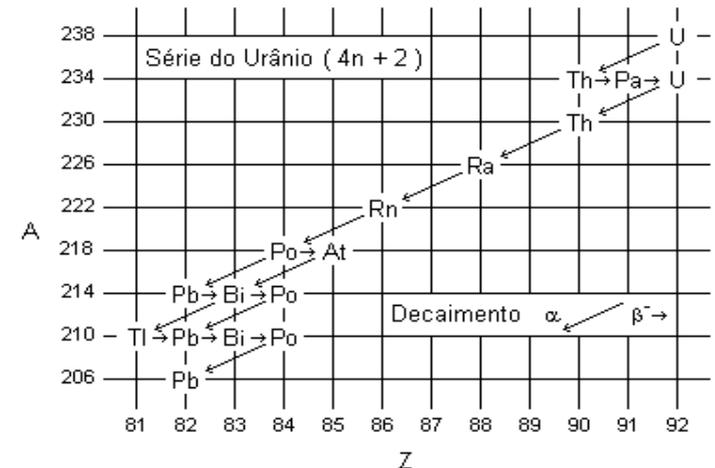


Tabela de elementos "estáveis"

CLASSIFICAÇÃO PERIÓDICA DOS ELEMENTOS

Com massas atômicas referidas ao isótopo 12 do carbono

	1A	Elementos de transição																8A	
I	1 H 1,008																	2 He 4,003	
II	3 Li 6,941	4 Be 9,012																	10 Ne 20,18
III	11 Na 23,00	12 Mg 24,30	3B	4B	5B	6B	7B	8B	1B	2B	3A	4A	5A	6A	7A	18 Ar 39,95			
IV	19 K 39,10	20 Ca 40,08	21 Sc 44,96	22 Ti 47,88	23 V 50,94	24 Cr 52,00	25 Mn 54,94	26 Fe 55,85	27 Co 58,93	28 Ni 58,69	29 Cu 63,55	30 Zn 65,38	31 Ga 69,72	32 Ge 72,59	33 As 74,92	34 Se 78,96	35 Br 79,90	36 Kr 83,80	
V	37 Rb 85,47	38 Sr 87,62	39 Y 88,91	40 Zr 91,22	41 Nb 92,91	42 Mo 95,94	43 Tc (98)	44 Ru 101,1	45 Rh 102,9	46 Pd 106,4	47 Ag 107,9	48 Cd 112,4	49 In 114,8	50 Sn 118,7	51 Sb 121,7	52 Te 127,6	53 I 126,9	54 Xe 131,3	
VI	55 Cs 132,9	56 Ba 137,3	57-71 SÉRIE DOS LANTANÍDIOS	72 Hf 178,5	73 Ta 180,9	74 W 183,8	75 Re 186,2	76 Os 190,2	77 Ir 192,2	78 Pt 195,1	79 Au 197,0	80 Hg 200,6	81 Tl 204,4	82 Pb 207,2	83 Bi 209,0	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)	
VII	87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 SÉRIE DOS ACTINÍDIOS	104 Ku (261)	105 Ha (260)	106 Unh	107 Uns	108 Uno	109 Une										

Série dos Lantanídeos

VI	57 La 138,9	58 Ce 140,1	59 Pr 140,9	60 Nd 144,2	61 Pm (145)	62 Sm 150,4	63 Eu 152,0	64 Gd 157,3	65 Tb 158,9	66 Dy 162,5	67 Ho 164,9	68 Er 167,3	69 Tm 168,9	70 Yb 173,0	71 Lu 175,0
----	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------

Série dos Actinídeos

VII	89 Ac (227)	90 Th 232,0	91 Pa (231)	92 U 238,0	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)
-----	-------------------	-------------------	-------------------	------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

NÚMERO DO ELEMENTO	Número Atômico
	Símbolo
	Massa Atômica () - elemento radioativo
ELETRONS NAS CAMADAS	

CONVENÇÕES

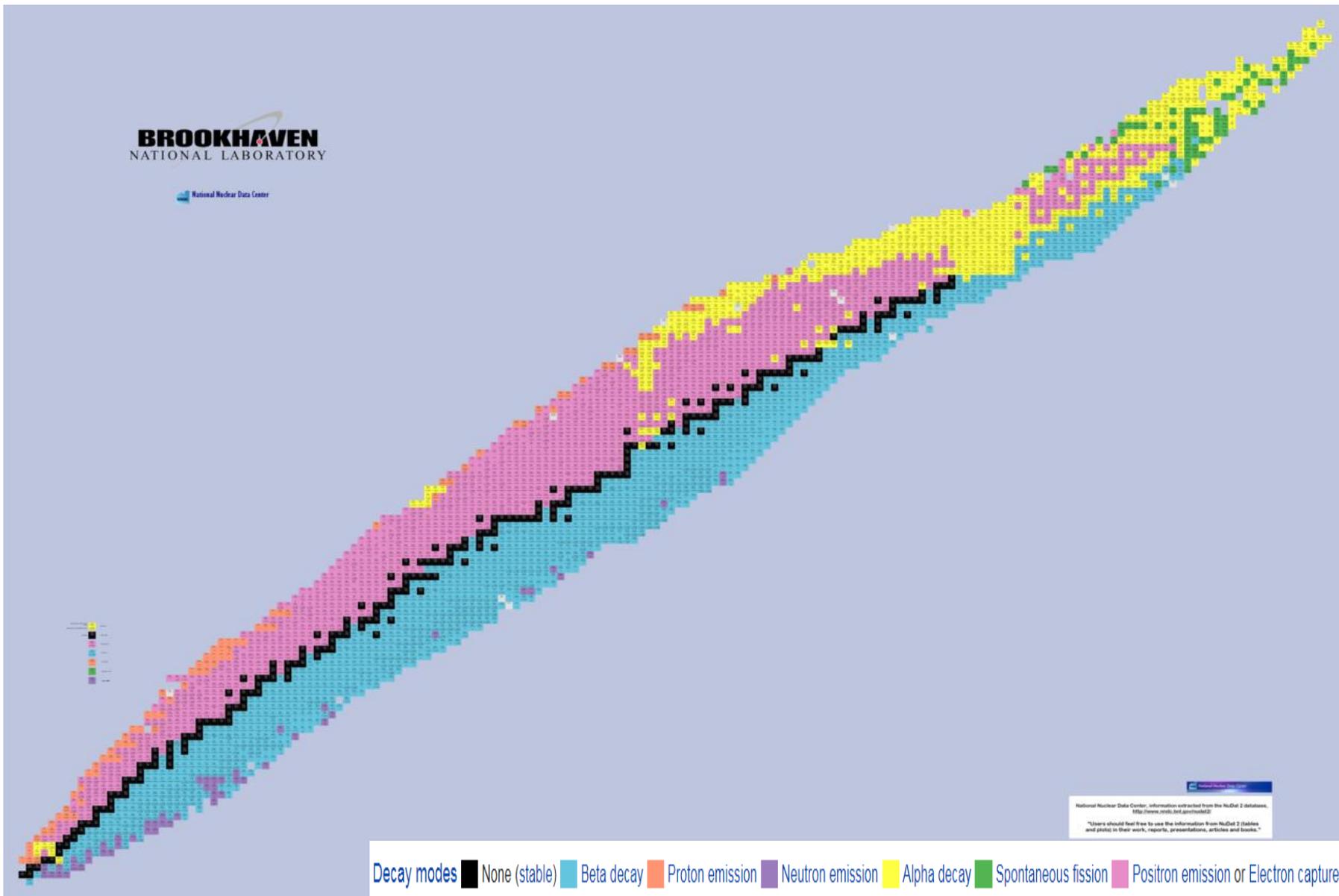
(s) = estado sólido (ℓ) = estado líquido (g) = estado gasoso (aq) = meio aquoso N = normal M = molar ΔH = variação de entalpia L = litro R = 0,082 atm · L / K mol N_A = 6,02 × 10²³

Carta de Nuclídeos

(completa +/- 3.000)

BROOKHAVEN
NATIONAL LABORATORY

National Nuclear Data Center



Fusão Nuclear **em laboratório**

- **Fusão Nuclear** - é o processo no qual dois ou mais núcleos atômicos se juntam e formam um outro núcleo de maior número atômico.

A **fusão nuclear** requer muita energia para acontecer e, geralmente, liberta muito mais energia que consome.

Quando ocorre com elementos **mais leves** que o ferro e o níquel (mais estáveis), ela geralmente **libera** energia e, com elementos **mais pesados**, ela **consome**.

Deutério (D) → ${}^2\text{H}_1$



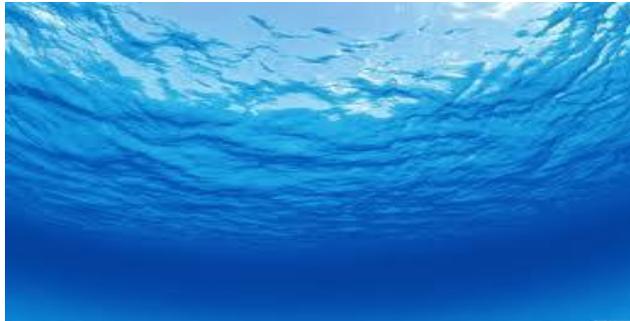
Harold Clayton Urey

1893 - 1981

1932

Nobel de Química - **1934**

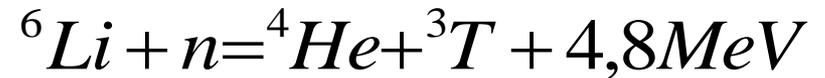
Proporção → $1 {}^2\text{H}_1 / 7.000$ átomos de ${}^1\text{H}_1$



Trítio (T) → ${}^3\text{H}_1$



Lítio



Reator Nuclear



$$PC_{\text{gasolina}} = 34.965 \text{ J/L}$$

$$d_{\text{gasolina}} = 0,742 \text{ kg/L}$$

http://pt.wikipedia.org/wiki/Desenho_de_arma_nuclear

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/nucene/fusion.html>

Fazendo algumas contas para a formação de Deutério...

$$m_p + m_n = 1,007276u + 1,0086647u = 2,0159407u$$

$$\Delta m = (m_p + m_n) - m_d = 2,0159407u - 2,01355u = 0,0023907u$$

$$1 \text{ u.m.a.} = u \rightarrow 1/12 \text{ da massa do átomo } C^{12} = \boxed{1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}}$$

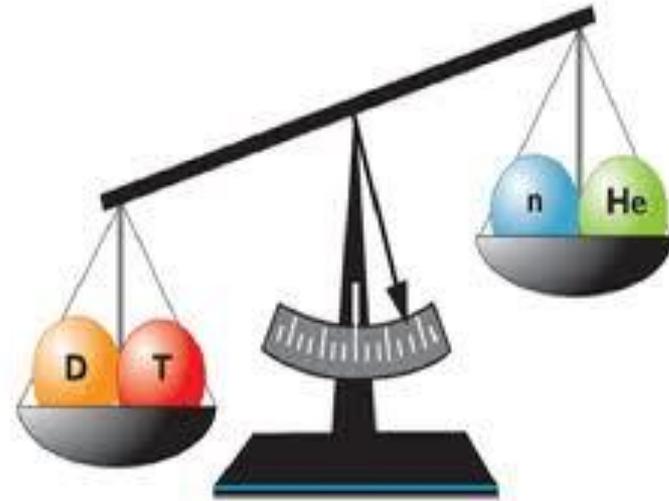
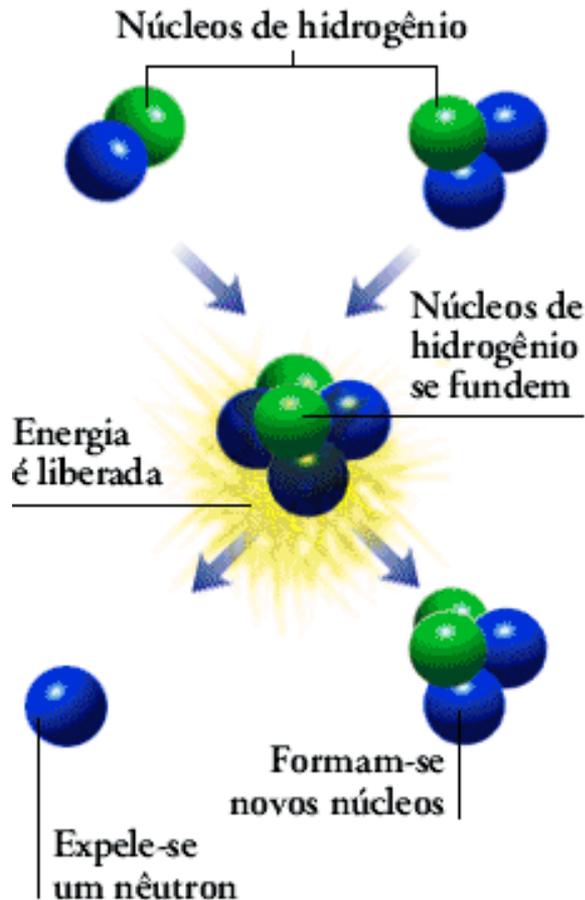
$$\boxed{\Delta E = \Delta m \times c^2}$$

Equação de Einstein

$$E = 0,0023907u \times 931,597 \frac{\text{MeV}}{u} = 2,22717 \text{ MeV}$$

que é energia de ligação do Deutério!!!

- Fusão deutério-trítio ocorre no interior de reatores experimentais do tipo *Tokamak* (*câmara magnética toroidal*)



A soma das massas dos “reagentes” é maior do que a soma das massas dos “produtos”.
O que aconteceu com a massa?

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

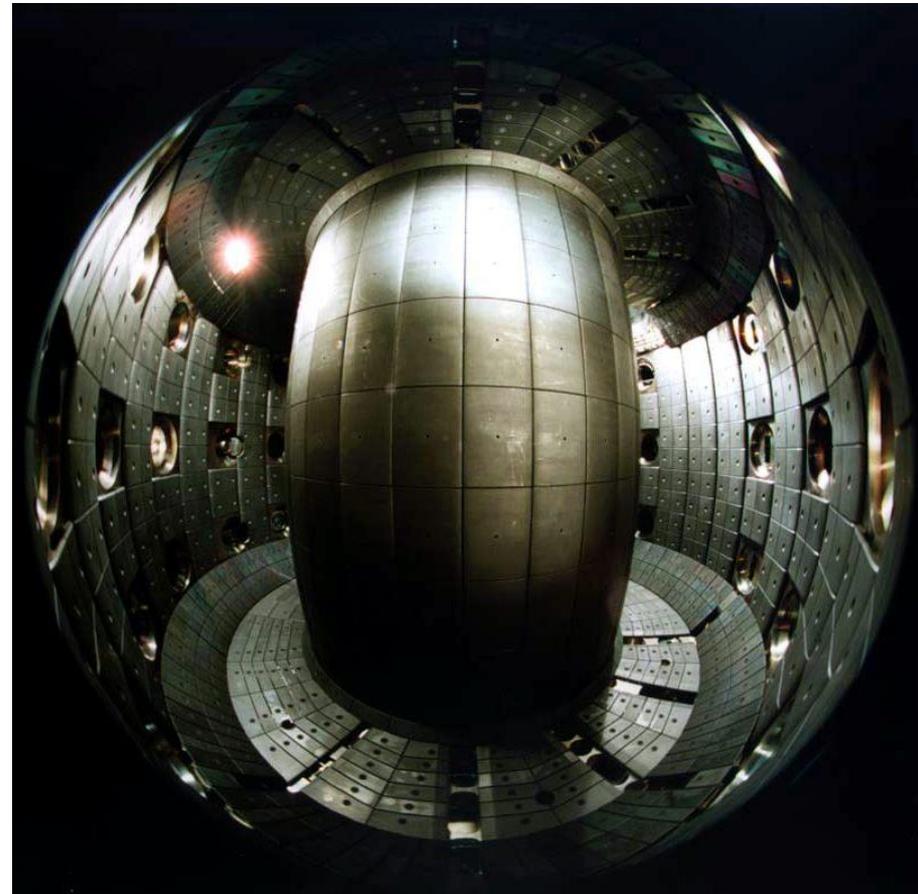
Reatores experimentais de fusão nuclear (tipo *Tokamak*)



JET (1997) - Entrada de 24 MW → Saída de **16,1 MW**

ITER - Entrada de 50 MW → Saída de **500 MW**

www.iter.org



ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)

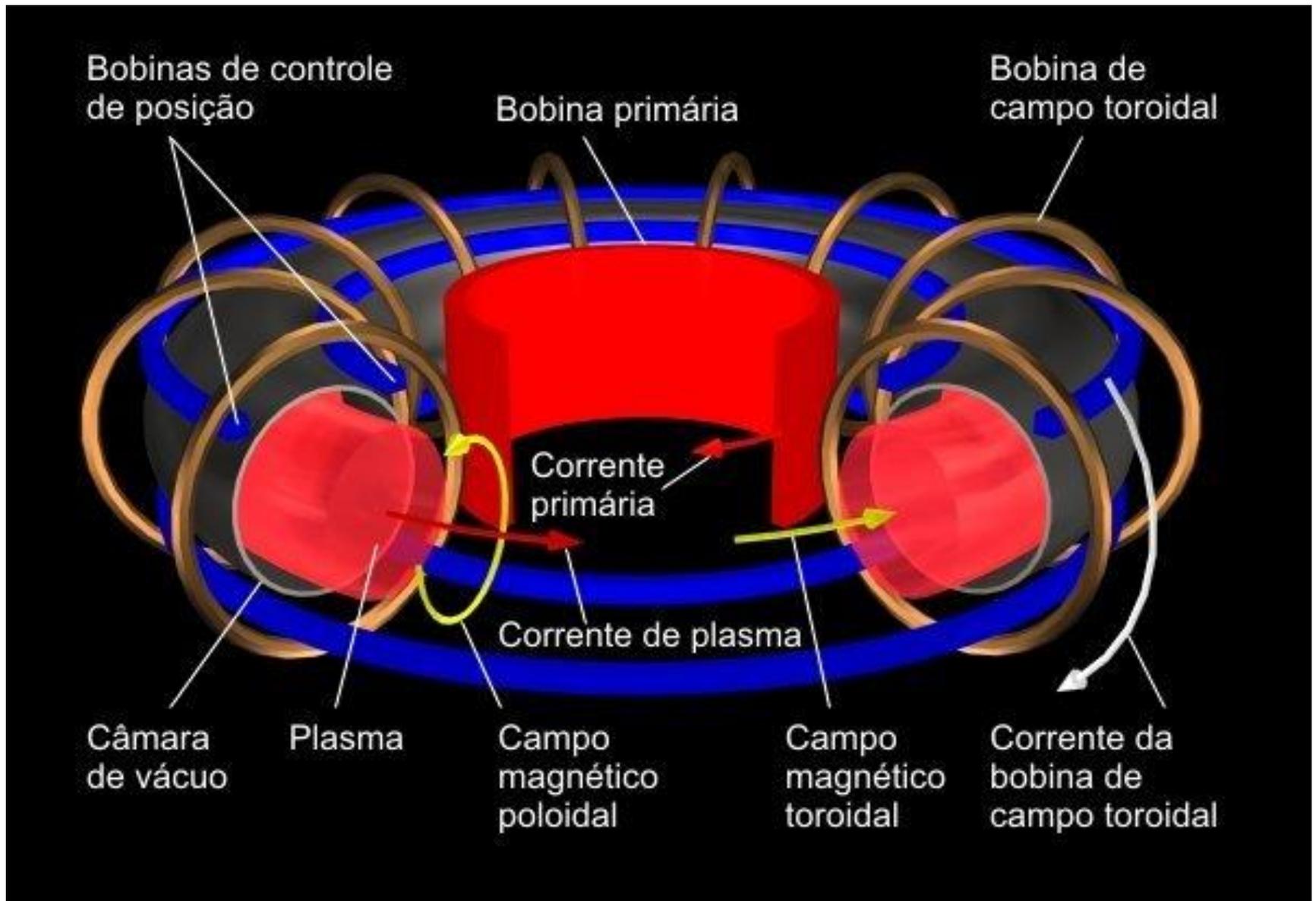
Construção - 2025

Operação com fusão D/T - 2035

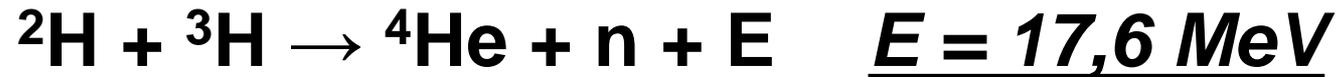
Temperatura do plasma = $1,5 \times 10^{+8}K$

***TCV**, an experimental tokamak fusion reactor at École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland*

Componentes principais e esquema de funcionamento



Uma parte da massa de ${}^2\text{H}$ mais ${}^3\text{H}$ transforma-se em energia:



$$E_{\text{CHe}} = 3,5 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{Cn}} = 14,1 \text{ MeV}$$

$$m_{\text{D}} = 2,01355 \text{ u}$$

$$m_{\text{T}} = 3,0160492 \text{ u}$$

$$m_{\text{He}} = 4,002602 \text{ u}$$

$$m_{\text{N}} = 1,008665 \text{ u}$$

Estime a energia liberada pela fusão D-T

- Comparado com a fissão, a fusão tem a vantagem de não produzir núcleos radioativos, além do que ela pode usar um combustível bem barato, ou seja, o hidrogênio.
- O inconveniente é que, para provocarmos a fusão do hidrogênio temos de submeter a amostra à altíssimas temperaturas ($\sim 10^{+6} \text{ K}$).

Até hoje, início do século XXI, a humanidade ainda

NÃO

conseguiu encontrar uma forma de controlar a fusão nuclear, assim como acontece com a fissão.

Que caminho seguir ???

- Não Pacífico



Edward Teller
1908 - 2003

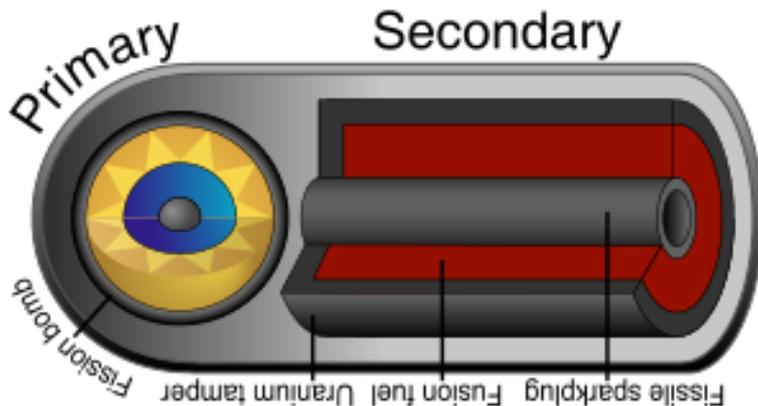


Stanislaw M. Ulam
1909 - 1984



31/10/1952
("Mike")

Atol de *Eniwetok* (Ilhas Marshall) → **10 milhões de toneladas de TNT** (≈ 700 vezes o poder da bomba de Hiroshima).



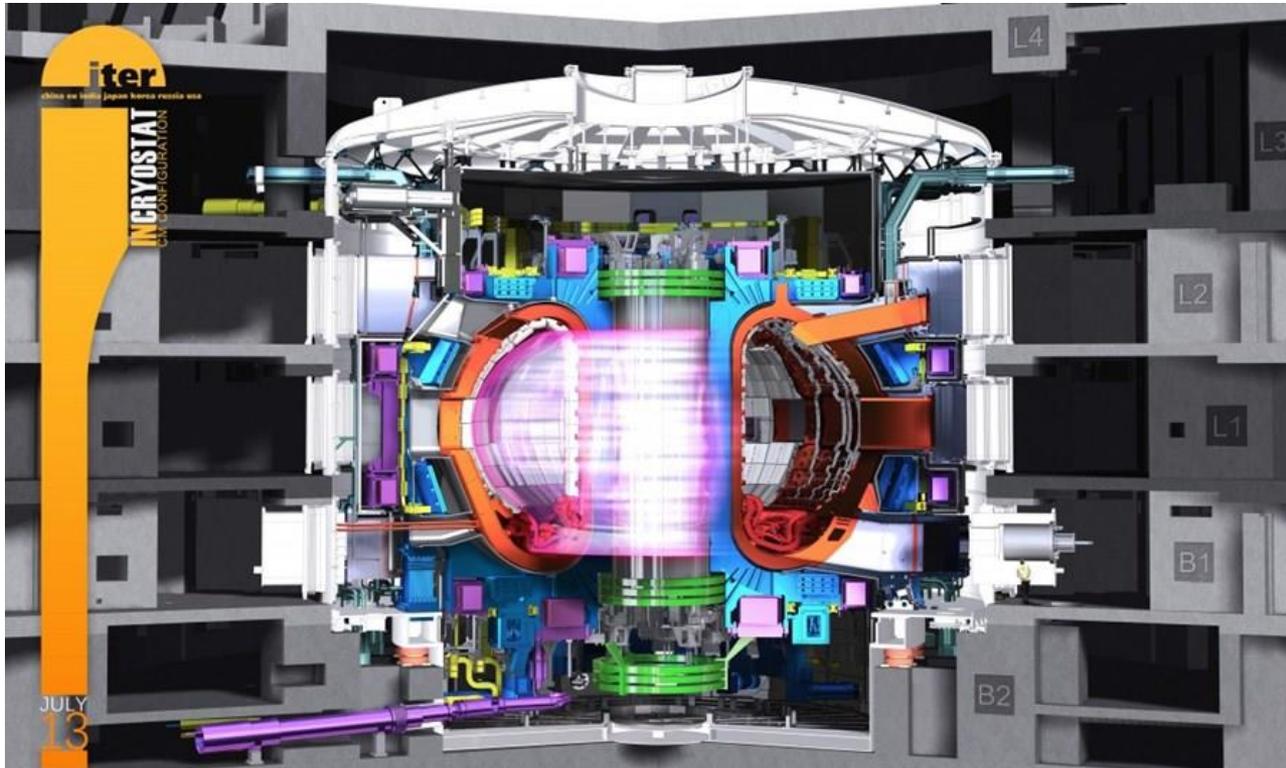
Desenho de Teller-Ulam

The **Teller-Ulam** design kept the fission and fusion fuel physically separated from one another, and used X-rays from the primary device "reflected" off the surrounding casing to compress the secondary (**Bomba H**).

Armas nucleares (2019) → **13.865**

Que caminho seguir ???

- Pacífico



- Sem geração de resíduos radiativos
- Sem emissão de gases de efeito estufa
- Produção de energia inicialmente inesgotável
- Matéria prima acessível (água e lítio)
- Ótimo controle sobre o fluxo de plasma
- Risco irrisório ao meio ambiente
- Modernos protocolos de segurança

Comparação entre os processos de produção de energia

	Química	Fissão	Fusão
Exemplos de reação	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$n + U^{235} \rightarrow Ba^{143} + Kr^{91} + 2 n$	$H^2 + H^3 \rightarrow He^4 + n$
Combustível Típico	Carvão	UO ₂ (3% U ²³⁵ + 97% U ²³⁸)	Deutério & Trítio
Temperatura para reação (°C)	873	1.273	~10 ⁶
Energia (J/kg)	$3,3 \times 10^7$	$2,1 \times 10^{12}$	$3,4 \times 10^{14}$

Comparação entre quantidades de quatro combustíveis para produzir 1 GW.s de energia

FUSÃO



0,5 Toneladas - 1 Pickup

FISSÃO



150 Toneladas - 8 Caminhões

PETRÓLEO



10.000.000 Barris - 7 Super Petroleiros

CARVÃO



2.100.000 Toneladas - 191 Trens com 110 Vagões cada

Um modelo possível de geração de energia nas estrelas

- Poderia o Sol funcionar a combustível tradicional?



Constante Solar

$$1.360,8 \text{ W/m}^2$$



Carvão Mineral
 $PC = 8.000 \text{ kcal/kg}$

Exercícios

Determine a vida útil do Sol (com oxigênio), em anos, considerando a queima completa de carvão mineral, o qual ocuparia todo o volume da estrela.

$$M_{\text{Sol}} \approx 2 \times 10^{30} \text{ kg}$$

E se o Sol fosse formado pelo gás Hidrogênio H_2 (PCI = 119.600 kJ/kg) e, também, por oxigênio, sofrendo um processo de combustão contínua?

Hans Albrecht Bethe

02/07/1906 - 06/03/2005



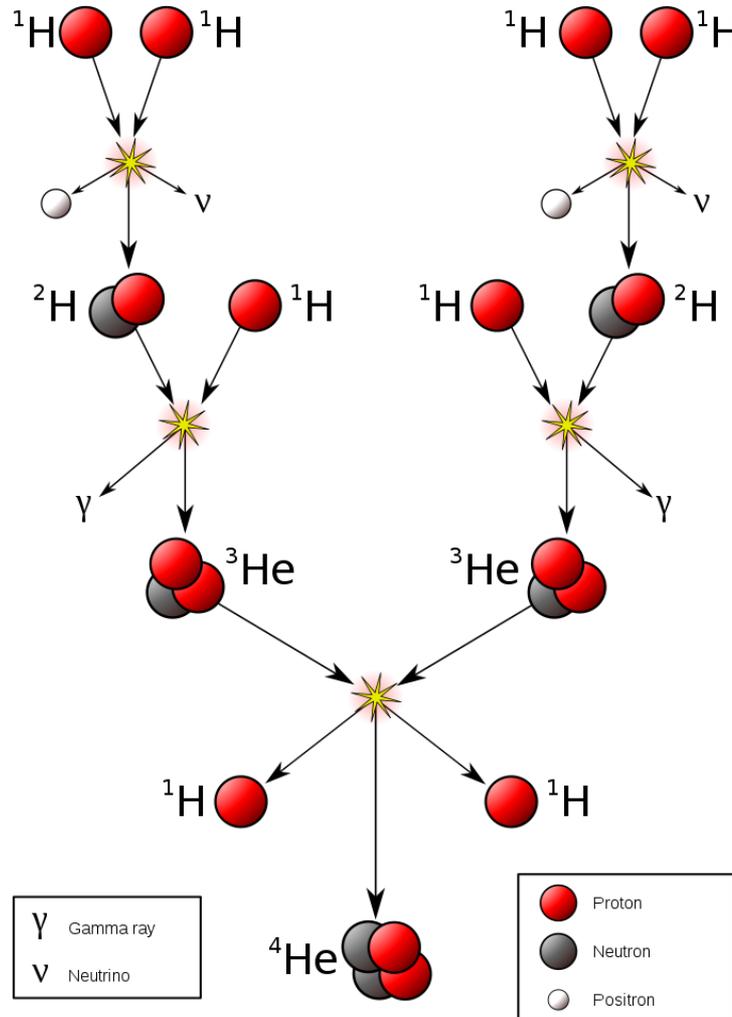
“A Produção de Energia nas Estrelas”
(1939)

Nobel de **1967**

“Por contribuições à teoria das reações nucleares, em especial, por descobertas relativas à produção de energia nas estrelas.”

Fusão Nuclear Estelar

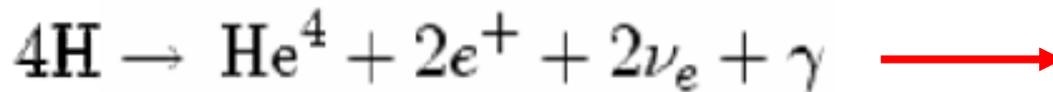
fusão nuclear do tipo **p-p I** → **10 a 14 MK** → Temperatura do núcleo da estrela



A cadeia próton-próton
domina as reações nas
estrelas do tamanho do
Sol ou menores.

$$M_{\odot} \leq M_{\text{Sol}}$$

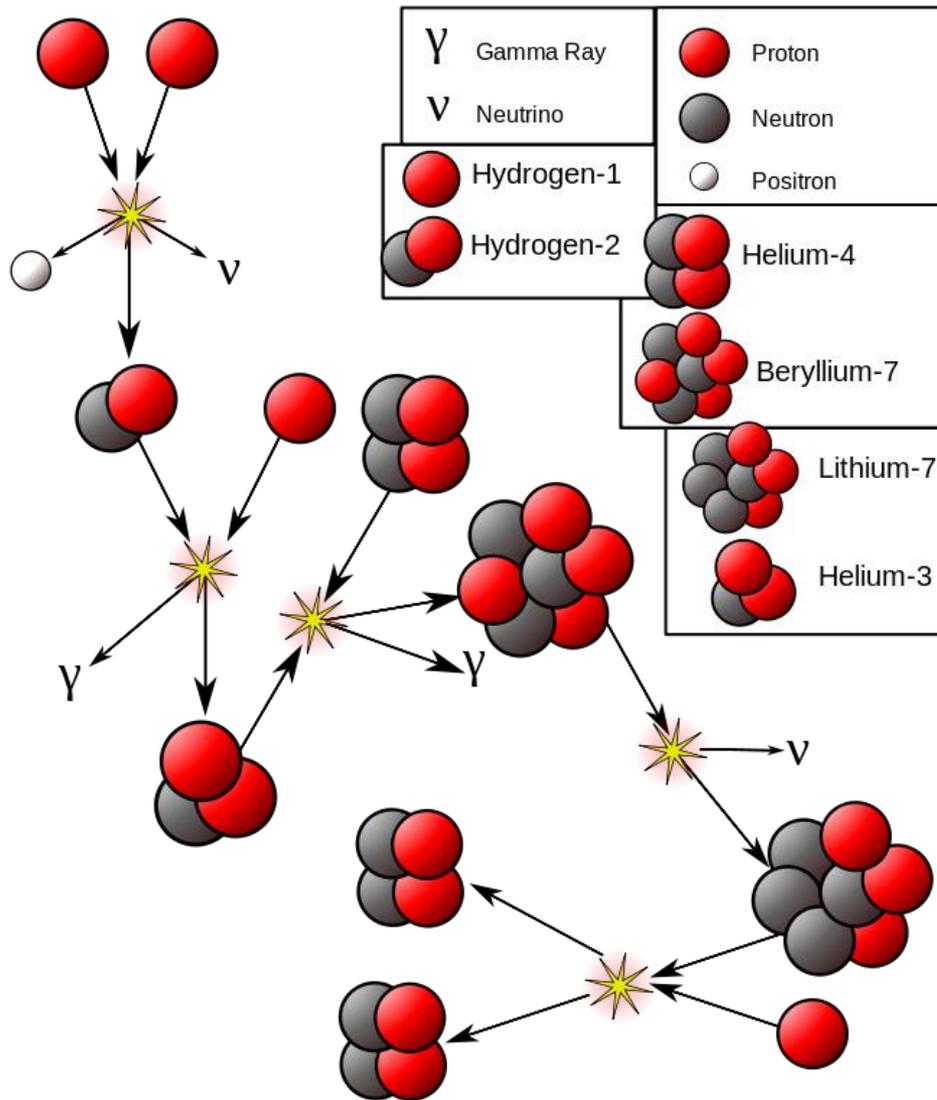
http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion



$$E = 26,73 \text{ MeV}$$

Fusão nuclear estelar

fusão nuclear do tipo p-p II → **14 a 23 MK**



Fusão nuclear estelar

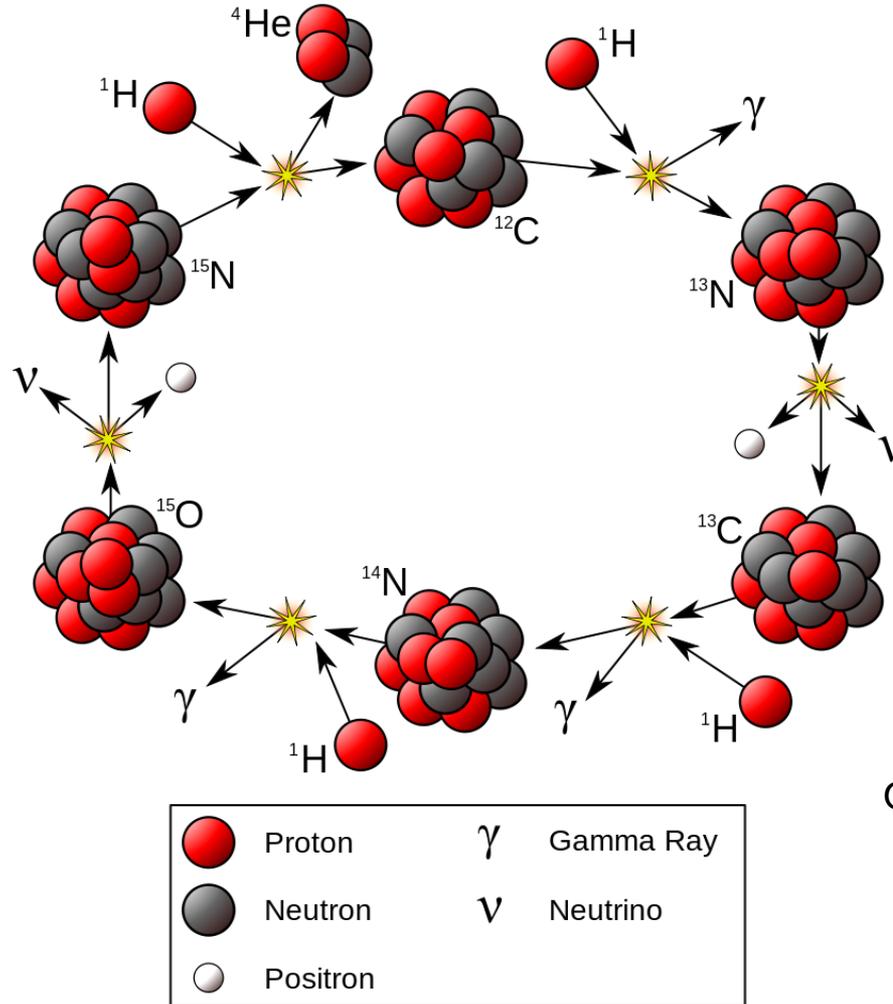
(fusão nuclear do tipo CNO)



Carl F. von Weizsäcker
1912 - 2007
1938



Hans Bethe
1906 - 2005
1939



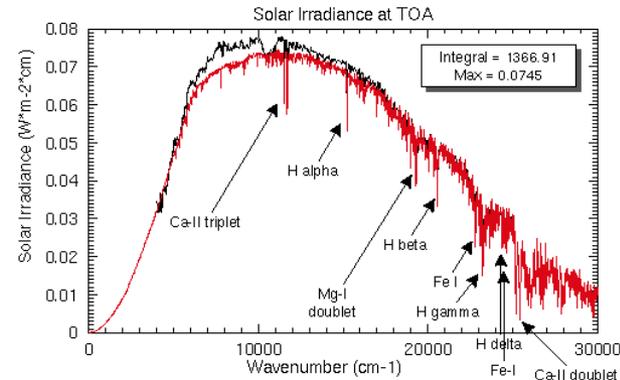
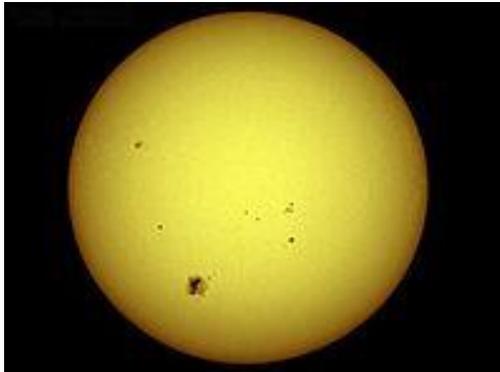
O ciclo CNO é a fonte de energia dominante nas estrelas mais massivas.

$$M_{\odot} \geq 1,3.M_{\text{Sol}}$$

Constante Solar

1.360,8 W/m²

Varição do valor nos últimos 400 anos: < 0,2%.



Como é medida a constante solar ?



Piranômetro solar fixo, modelo MS-60 EKO

Faixa de medição: 0 a 2.000 W/m²
Temperatura de trabalho: -40 a 80°C
Faixa de comprimento de onda: 285 a 3.000 nm



**Portátil: R\$??
Fixo: R\$??**

Atividade na sala de aula: Com o valor da constante solar e da energia produzida por uma reação nuclear de fusão - para a produção de um núcleo de hélio -, determinar a quantidade de massa convertida em energia, em **Quilograma por segundo** (kg/s), como resultado das reações nucleares ocorridas no Sol.

Atividade na sala de aula: Considerando que apenas a massa contida no núcleo da estrela, isto é, cerca de **10 %** da massa total (calculada pela Lei da Gravitação Universal, de **Newton**) produza energia através da fusão nuclear do tipo **p-p I**, determinar a **vida útil do Sol**, em seu primeiro estágio, em **anos**.

Lei da Gravitação Universal

$$\frac{a^3}{T^2} = G \cdot \frac{M_{total}}{4 \cdot \pi^2}$$

Período orbital da Terra: **365,25 dias**

Distância média Terra-Sol: **$1,496 \times 10^{11} \text{ m}$**

Massa do Sol = $2 \times 10^{30} \text{ kg}$

Hipóteses:

- A geração de energia pelo Sol dá-se a partir do momento em que ele é formado;
- A constante solar mantém-se constante ao longo do tempo de funcionamento de nossa estrela;
- O valor da constante solar é igual em todas as direções;
- À medida que os prótons são usados nas reações de fusão no núcleo do Sol, eles são repostos pelos prótons contidos no restante do volume;

Cálculos:

- Área da superfície esférica $\rightarrow S = 4.\pi.R^2$
- Intensidade $\rightarrow I = \frac{Potência}{Área} = \frac{Energia}{Área.\Delta t}$

Idade da Terra



Datação radiométrica

Método

Material de análise

- Rochas radioativas



~ 3,8 bilhões de anos

- Meteoritos



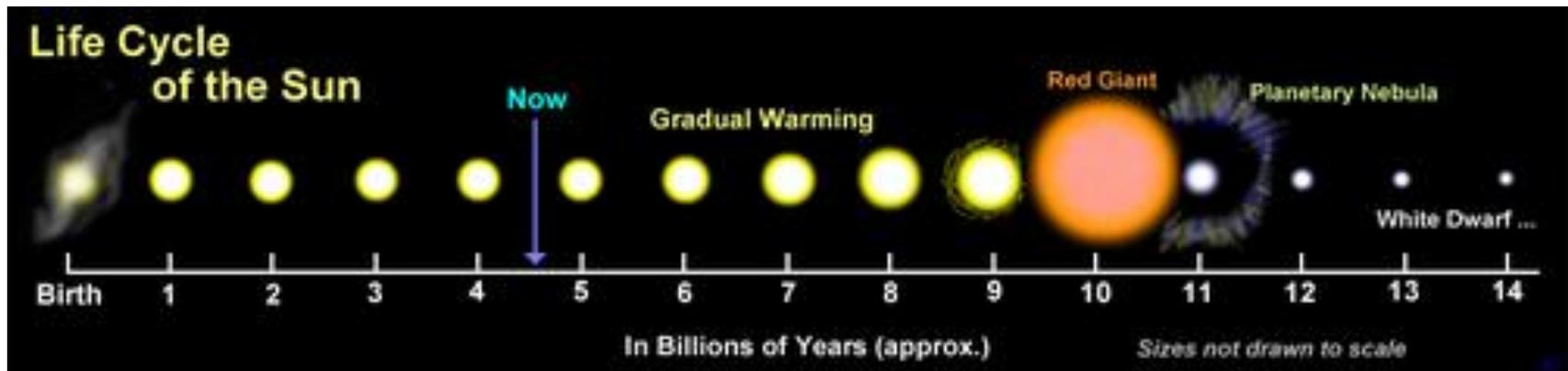
Pedra de Bendegó - 1784
(Museu Nacional - RJ)

~ 4,5 bilhões de anos

Evolução Estelar

Em Astronomia, é uma sequência de mudanças que uma estrela sofre durante seu tempo de vida, isto é, os milhares, milhões ou bilhões de anos durante os quais ela emite radiação eletromagnética.

Ciclo de vida do Sol



A evolução estelar começa com uma nuvem molecular gigante (**NMG**), também conhecida como *berçário estelar*.



copyright: C. O'Dell and S. Wong (Rice University), NASA

Nebulosa Órion (M42)



Nebulosa Carina (NGC 3372)
Hubble Space Telescope
20/04/10

O espaço 'vazio' interno de uma galáxia sempre contém em torno de *0,1 a 1 partícula por cm^3* , mas dentro de uma **NMG**, a densidade típica é de uns *poucos milhões de partículas por cm^3* .

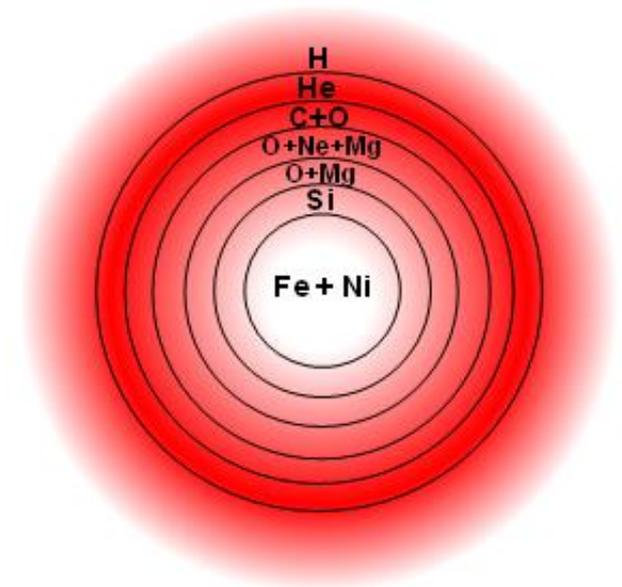
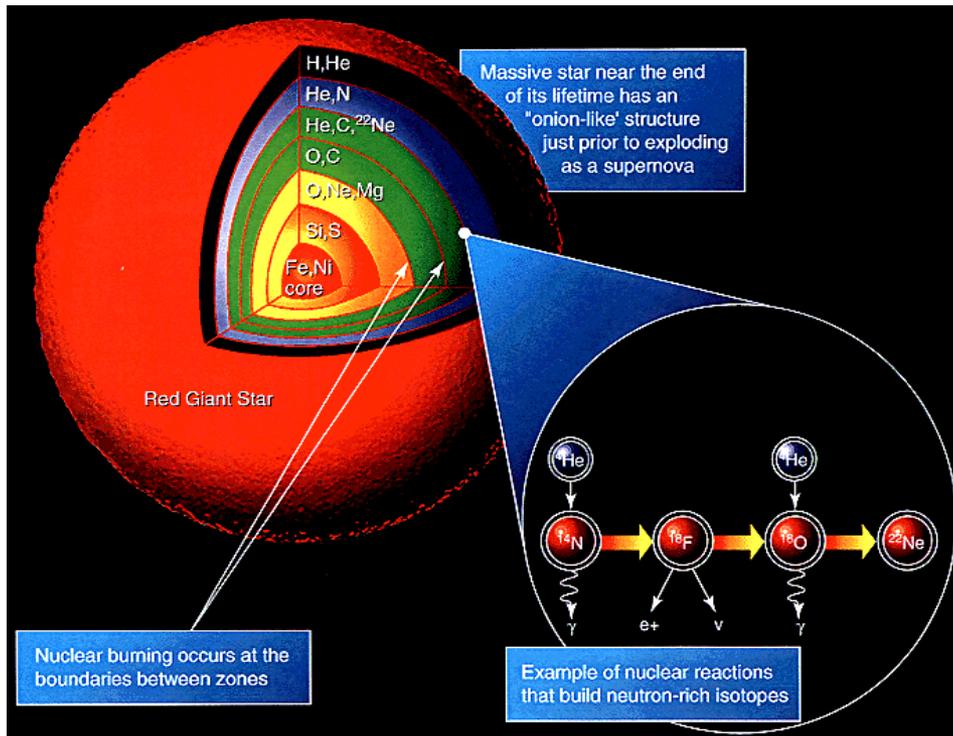
Algum evento deve ocorrer para causar um colapso gravitacional.

Durante o colapso da **NMG**, o gás condensado é aquecido pela **Energia Potencial Gravitacional**.

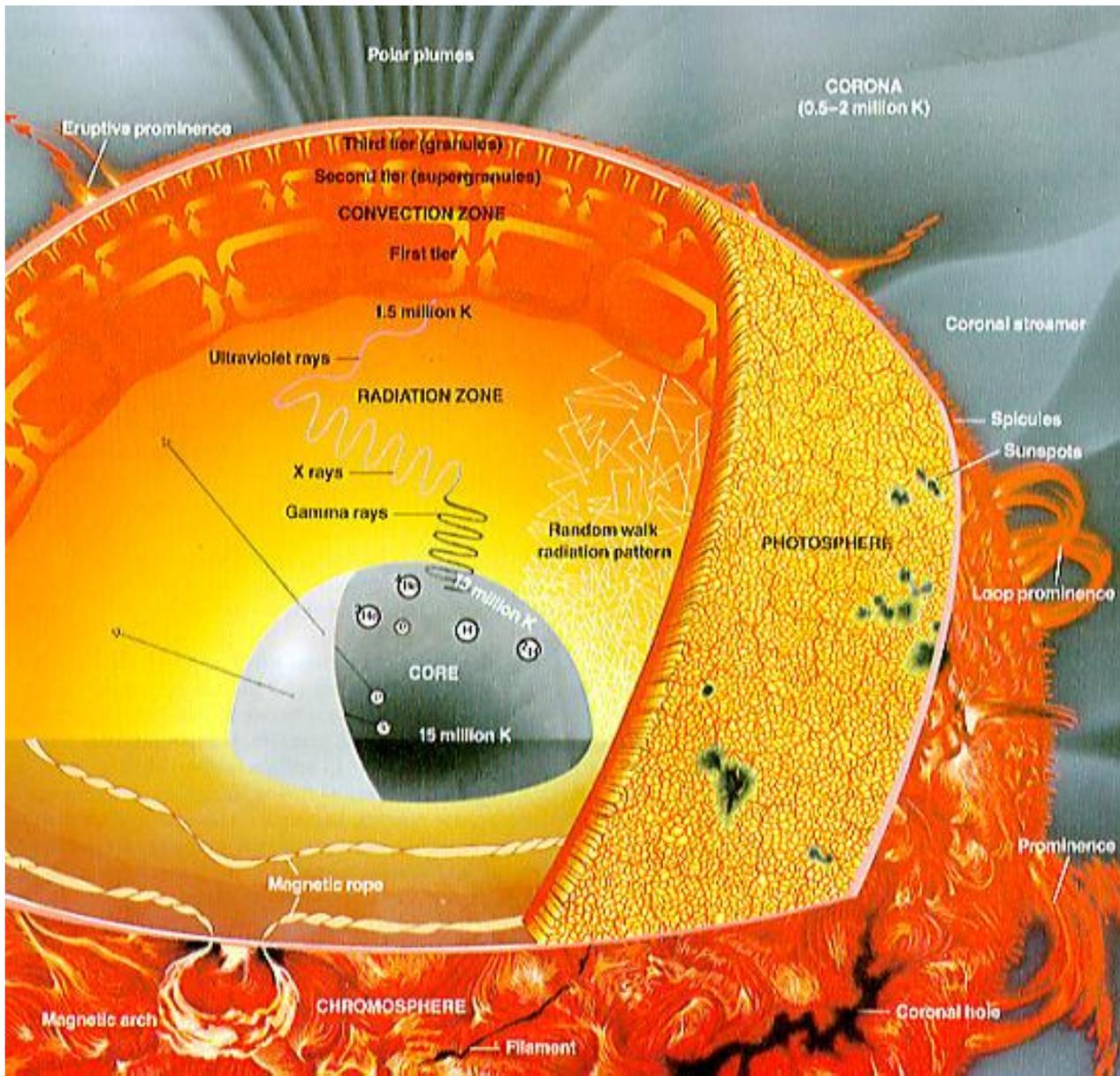


Assim começa a **Fusão Nuclear** !!!

Nucleossíntese Estelar



O Sol



Temperatura do núcleo ~ $15 \times 10^{+6} \text{ K}$

Referências

- http://pt.wikipedia.org/wiki/Radia%C3%A7%C3%A3o_solar
- <http://www.romiotto.com.br>
- <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node10.htm>
- http://www.prof2000.pt/users/angelof/af16/ts_estrelas/evolucao_estelar_media_massa.htm#
- http://www.ufrgs.br/geociencias/cporcher/Atividades%20Didaticas_arquivos/Geo02001/Tempo%20Geologico.htm
- <http://the-rioblog.blogspot.com/2011/05/amchitka-o-ultimo-segredo-nuclear-norte.html>
- http://www.google.com.br/imgres?q=rochas+radioativas&hl=pt-BR&rlz=1C2GGGE_pt-BRBR450BR456&biw=1152&bih=769&tbn=isch&tbnid=u9tWu5Hq81KO2M:&imgrefurl=http://dc345.4shared.com/doc/PzGnLwQN/preview.html&docid=A0pRuoAqictaEM&imgurl=http://dc345.4shared.com/doc/PzGnLwQN/preview005.png&w=1071&h=1516&ei=k7_UTqzKOY2btwfj9bSqAg&zoom=1&iact=hc&vpx=865&vpy=390&dur=5500&hovh=267&hovw=189&tx=102&ty=125&sig=105093065953807487091&page=3&tbnh=140&tbnw=97&start=46&ndsp=25&ved=1t:429,r:17,s:46
- www.ov.ufrj.br/AstroPoetas/.../Bercarios_Estelares.ppt
- http://www.google.com.br/imgres?q=gr%C3%A1fico+de+nucl%C3%ADdeos&hl=pt-BR&biw=1280&bih=677&tbn=isch&tbnid=X3RruyNtZ6hxCM:&imgrefurl=http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Reacoes_de_Fusao.htm&docid=YT1TDjn1GBYS0M&imgurl=http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Figuras/Fracao_de_Empacotamento.gif&w=540&h=360&ei=FRnZToHPOKT30gG0g8TvDQ&zoom=1&iact=hc&vpx=686&vpy=174&dur=5653&hovh=183&hovw=275&tx=143&ty=76&sig=109458669040167550787&page=5&tbnh=131&tbnw=197&start=72&ndsp=18&ved=1t:429,r:3,s:72
- http://en.wikipedia.org/wiki/Strong_interaction
- http://nautilus.fis.uc.pt/spf/velharia/gazeta/93/GF-16_1.93/09.html
- <http://historia-ancestral.blogspot.com.br/2012/12/enriquecimento-do-uranio.html>
- <http://www.portalmedquimica.com.br/dicas.php?id=258>
- http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/16306/05_teorias.htm?sequence=140
- http://www.cctn.nuclear.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/06/Palestra_ciclos.pdf
- http://www.on.br/ead_2013/site/conteudo/cap9-forcas/forca-fraca.html
- <file:///C:/Documents%20and%20Settings/usu%C3%A1rio/Meus%20documentos/Downloads/nuclear.pdf>
- <https://slideplayer.com.br/slide/3132183/> - física nuclear - **importante**