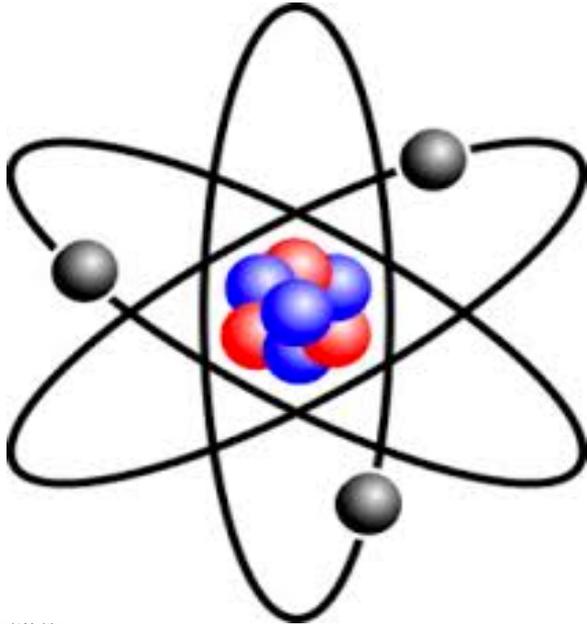


Física IV

Cap 43 – Física Nuclear

ANDREA LATGE



OBJETIVOS

Estudar a física básica do núcleo e discutir algumas aplicações

- ✓ Interpretar a estrutura básica do núcleo
- ✓ Coesão - interação forte
- ✓ Estabilidade e instabilidade dos núcleos – decaimento radioativo
- ✓ Cálculo de meia-vida de um decaimento
- ✓ Física nuclear na biologia e na medicina



O Problema das interações nucleares

Relacionados com Fenômenos Nucleares:

- ✓ Temperatura da terra
- ✓ Energia liberada das estrelas
- ✓ Evolução do Universo

- ✓ Primeiro efeito nuclear foi descoberto em 1896 Becquerel – radioatividade
- ✓ Desenvolvimento da física atômica foi essencial para o estudo da estrutura nuclear: núclei centro do átomo; mecânica quântica – aparato matemático.
- ✓ PROBLEMA FUNDAMENTAL: descobrir as forças entre as partículas nucleares

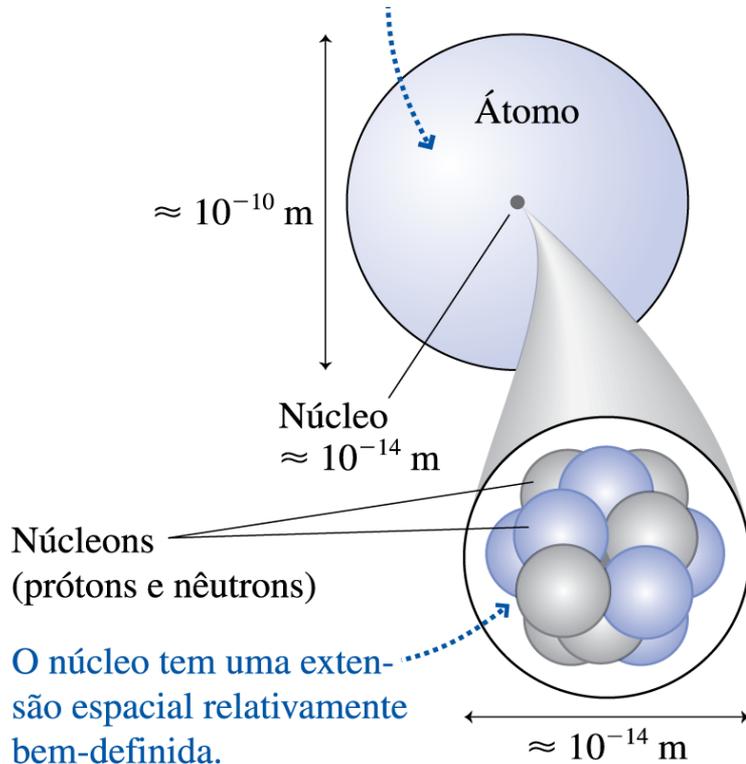


ESTRUTURA NUCLEAR

Núcleons = prótons e nêutrons (constituintes do núcleo)

Spin = $\frac{1}{2}$ (obedecem o princípio de exclusão de Pauli)

Esta ilustração de um átomo precisaria ter 10 m de diâmetro se fosse desenhada com um núcleo de 1mm de diâmetro



• **Número atômico (Z)** = número prótons no núcleo.

• **Número de massa (A)** = Número de prótons (Z) mais o de nêutrons (N)

$$A = Z + N$$

• **Isótopos** – Mesmo elemento (**Z igual**) porém com A diferente

Ex: ^{12}C e ^{14}C ; Z = 6.

• **Isóbaros** – **Z diferente com o mesmo A** (Ex. ^{14}C , ^{14}N e ^{14}O)



MASSAS DE NÚCLEONS E MASSA ATÔMICA

Def: 1 unidade de massa atômica (u) = 1/12 da massa do isótopo ^{12}C

$$\begin{aligned} \bullet 1 u &= 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg} \rightarrow uc^2 = (1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg})(2,9979 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 1,4924 \times 10^{-10} \text{ J} = 931,49 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$\bullet 1 u = 931,49 \text{ MeV}/c^2$$

Atenção para o n°. de casas decimais de precisão!

• A massa atômica de um elemento na tabela periódica é a *média ponderada* das massas de todos os isótopos que ocorrem naturalmente.

• Ex: ^{35}Cl ($m = 34,97u : 75,8\%$) e ^{37}Cl ($m = 36,97u : 24,2\%$) $\rightarrow m_{\text{Cl}} = 35,45u$

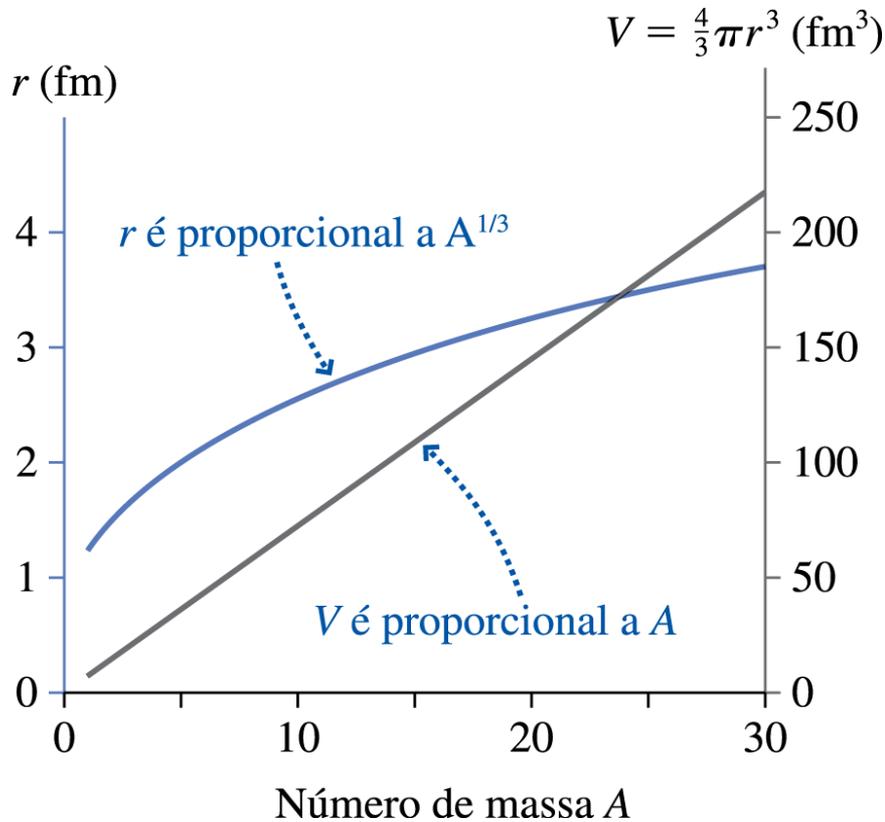
Partícula	Símbolo	Massa (u)	Massa (MeV/c ²)	
Elétron	e	0,00055	0,51	
Próton	p	1,00728	938,28	> u !
Nêutron	n	1,00866	939,57	
Hidrogênio	^1H	1,00783	938,79	
Deutério	^2H	2,01410	1876,12	< m(^1H) + m(p) !
Hélio	^4He	4,00260	3728,40	< 2 m(^2H) !



TAMANHO NUCLEAR

Experimentalmente: $r \approx r_0 A^{1/3}$ onde $r_0 = 1,2 \text{ fm}$ (femtômetro 10^{-15} m)

$$1u = 1.66 \times 10^{-27} \text{ Kg}$$



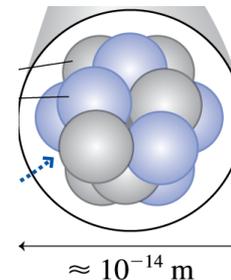
Implicações:

1. Todo núcleo tem aprox. a mesma densidade

$$\rho \cong A u / (4/3\pi r^3) \cong 2,3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

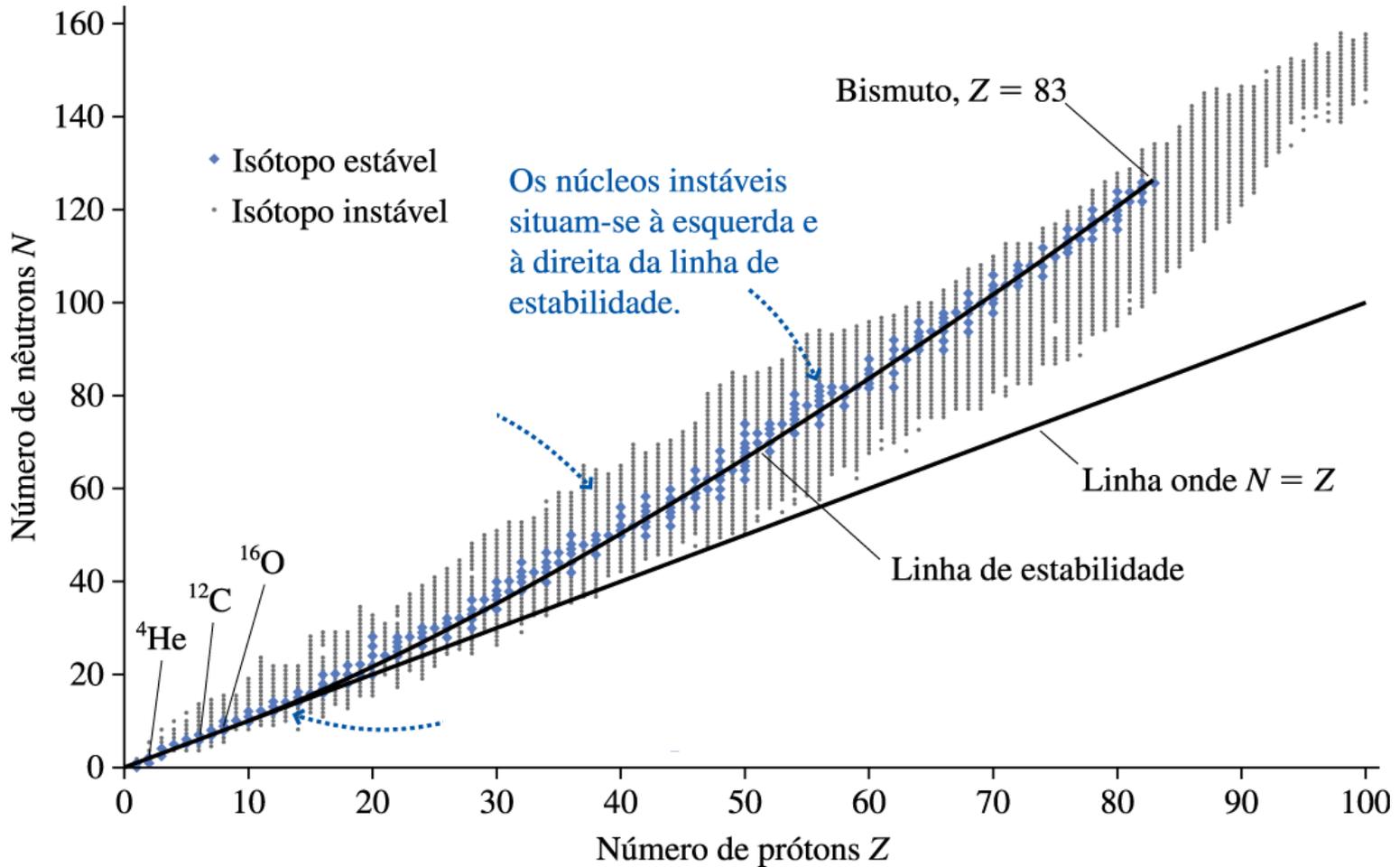
(1 colher de chá $\sim 10^9$ toneladas!)

2. Núcleons são **incompressíveis** e formam uma massa compacta, análoga a uma gota de líquido



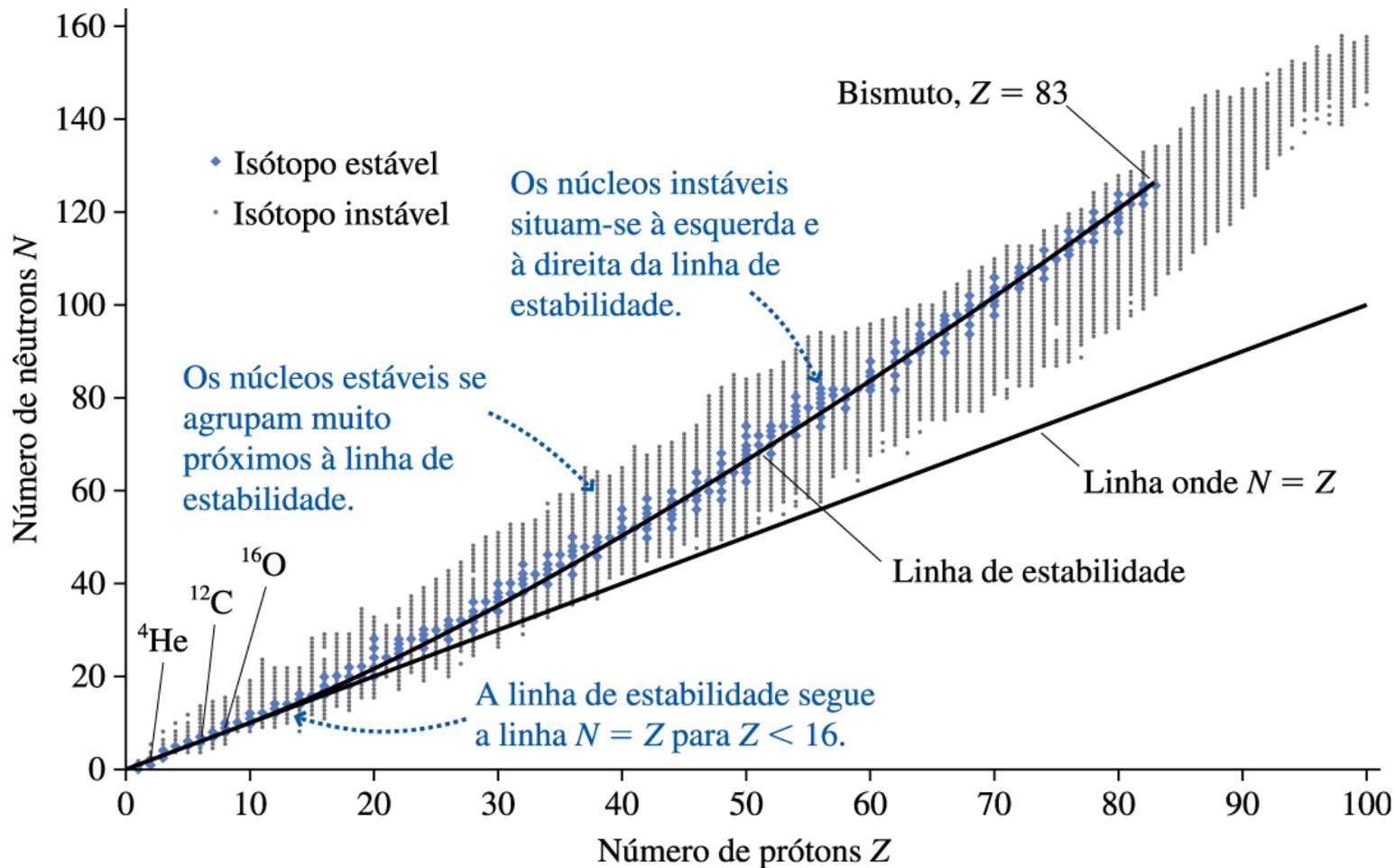
ESTABILIDADE NUCLEAR

Menos de 10 % dos núcleos conhecidos são estáveis (os demais são radioativos)



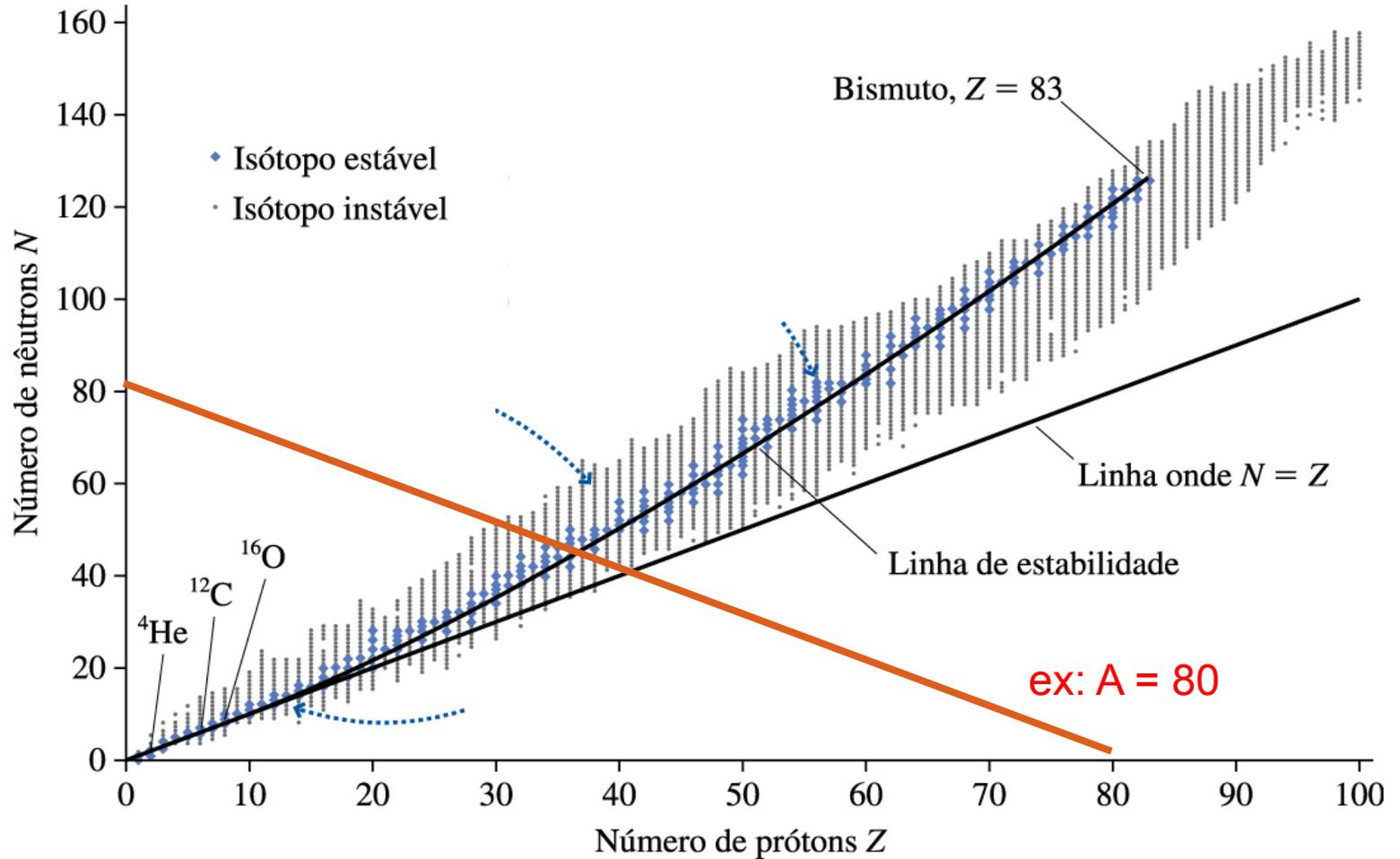
ESTABILIDADE NUCLEAR

Menos de 10 % dos núcleos conhecidos são estáveis (os demais são radioativos)



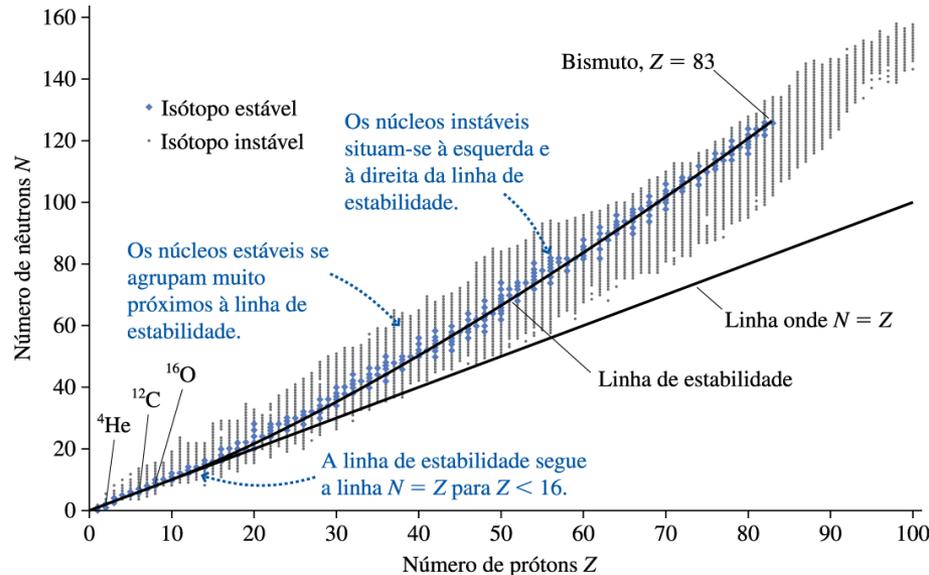
ESTABILIDADE NUCLEAR

P: como é uma linha formada por um conjunto de núcleos *isóbaros* (com mesmo $A = Z+N$)?



ESTABILIDADE NUCLEAR

Observações do gráfico (precisam de explicação!)



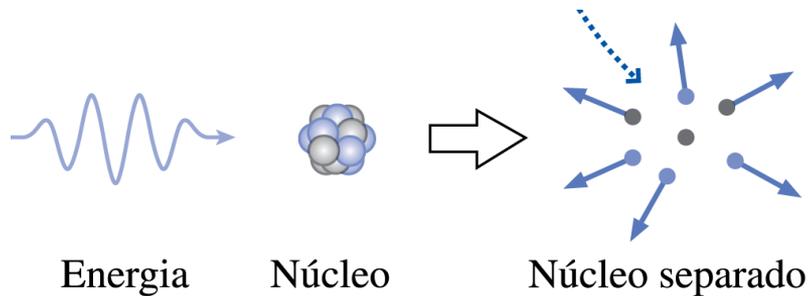
- Núcleos estáveis estão próximos à linha de estabilidade.
- Núcleos instáveis estão agrupados em bandas situadas à esquerda e a direita da linha de estabilidade.
- Os elementos mais leves, com $Z < 16$, são estáveis quando $N \cong Z$.

- À medida em que Z aumenta, o número de nêutrons necessários para garantir estabilidade aumenta bem mais do que o número de prótons.
- Não existe núcleo estável com $Z > 83$ (Bismuto)



ENERGIA DE LIGAÇÃO

Energia necessária para separar o núcleo em núcleons individuais.



$$B + m_{nuc}c^2 = (Zm_p + Nm_n)c^2$$

Na prática:

Energia de ionização dos átomos = da ordem de **eV**

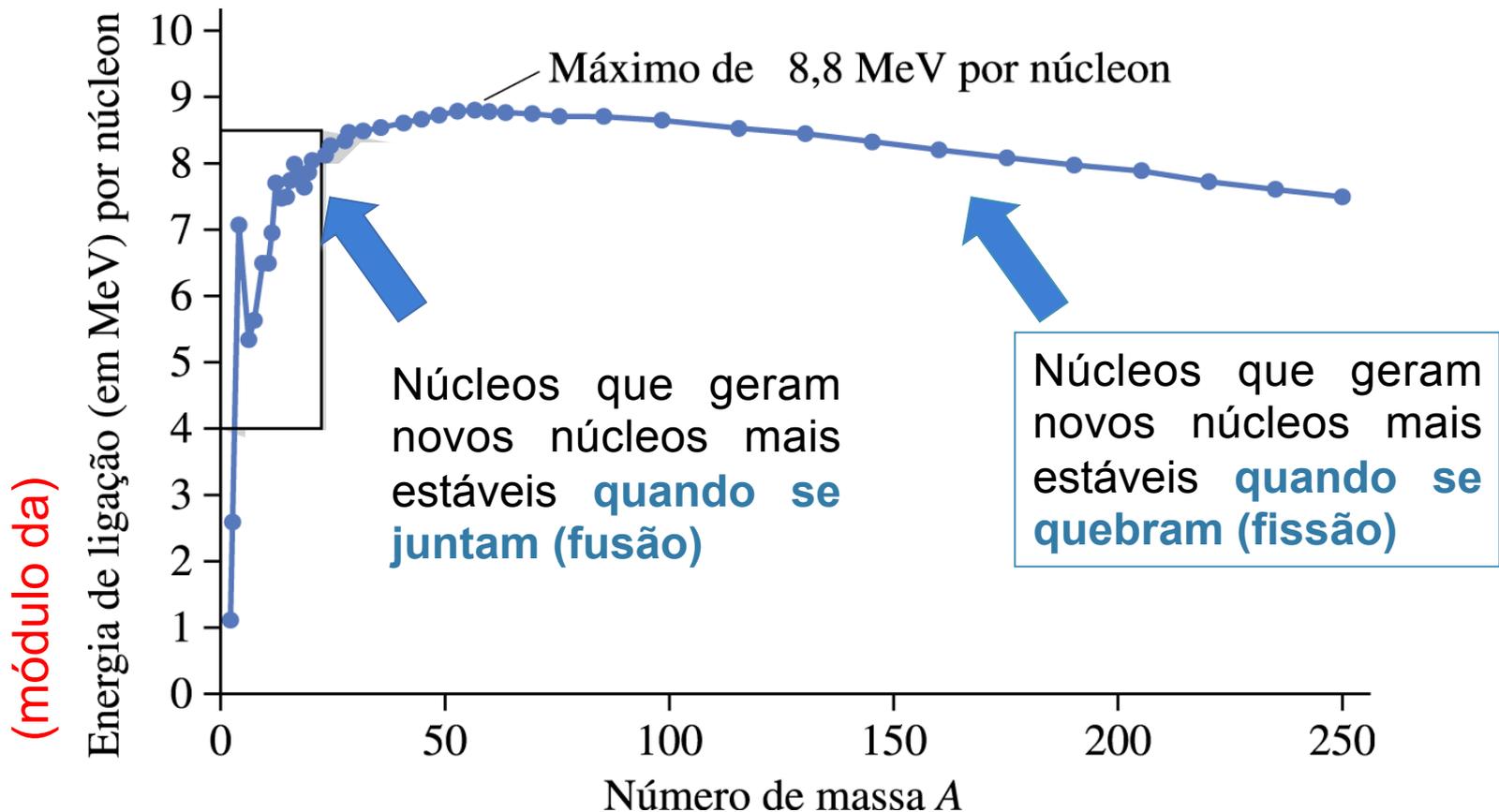
$$B = (Zm_p + Nm_n - m_{nuc}) \times (931,49 \text{ MeV}/u)$$

Partícula	Símbolo	Massa (u)	Massa (MeV/c ²)	
Elétron	e	0,00055	0,51	
Próton	p	1,00728	938,28	> u !
Nêutron	n	1,00866	939,57	
Hidrogênio	¹ H	1,00783	938,79	
Deutério	² H	2,01410	1876,12	< m(¹ H) + m(p) !
Hélio	⁴ He	4,00260	3728,40	< 2 m(² H) !



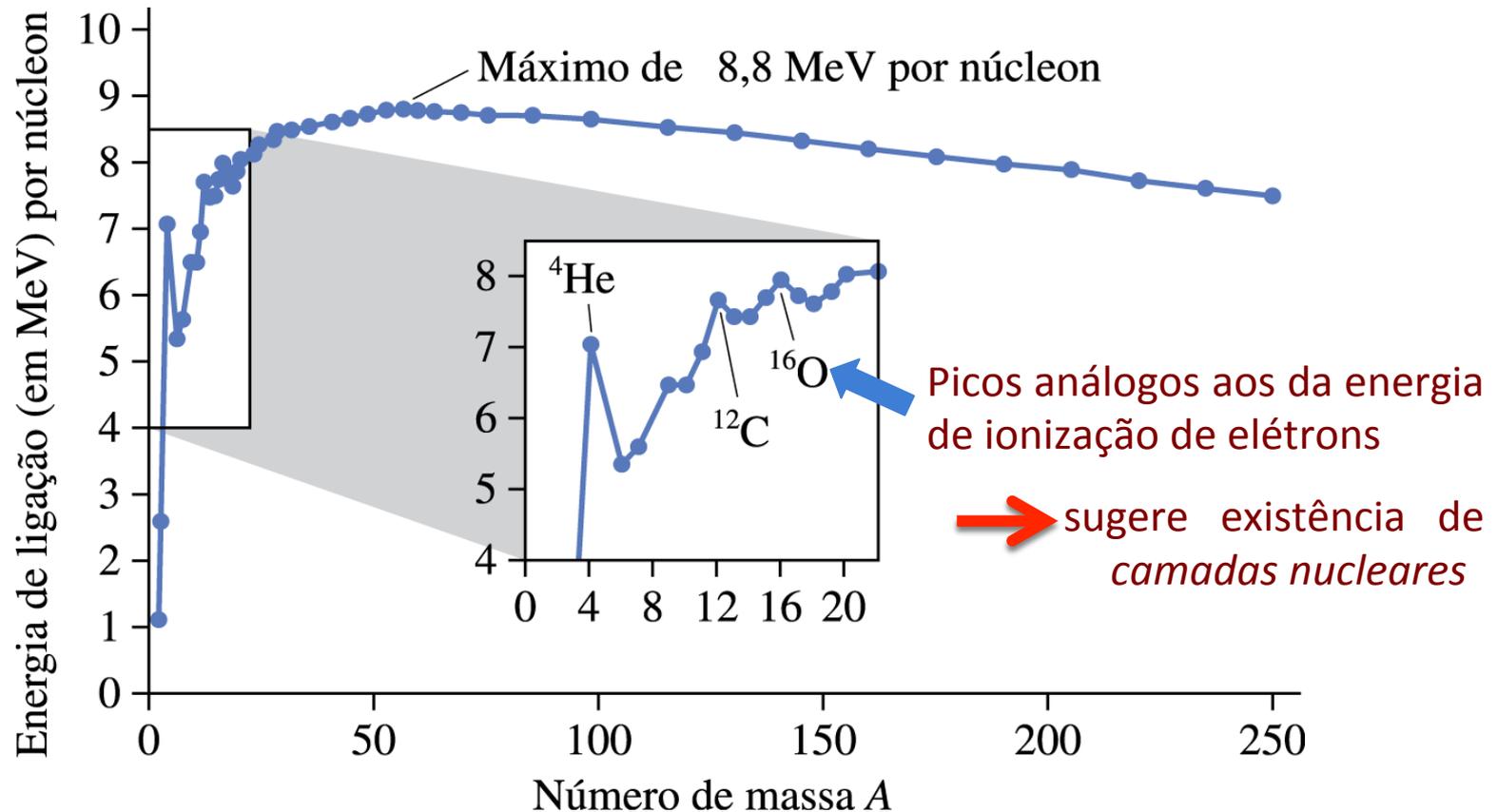
A Curva de Energia de Ligação

Um núcleo é mais coeso (i.e., mais estável) quanto maior for a sua **energia de ligação por núcleon** ($= B/A$)



A CURVA DE ENERGIA DE LIGAÇÃO

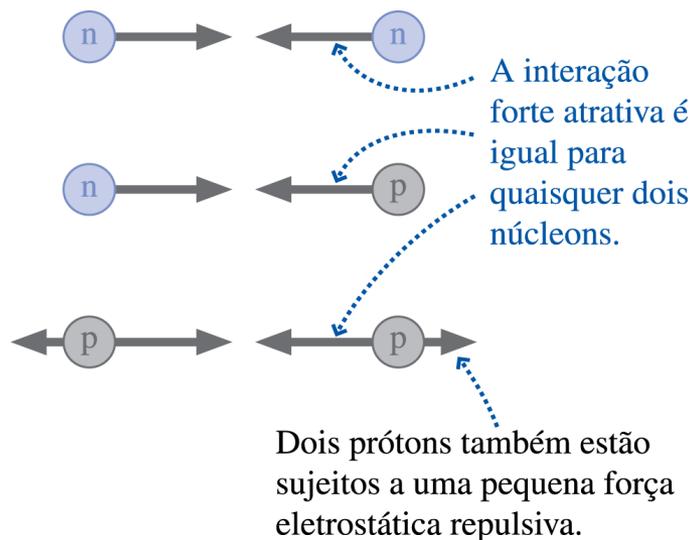
Um núcleo é mais coeso (i.e., mais estável) quanto maior for a sua **energia de ligação por núcleon** (= B/A)



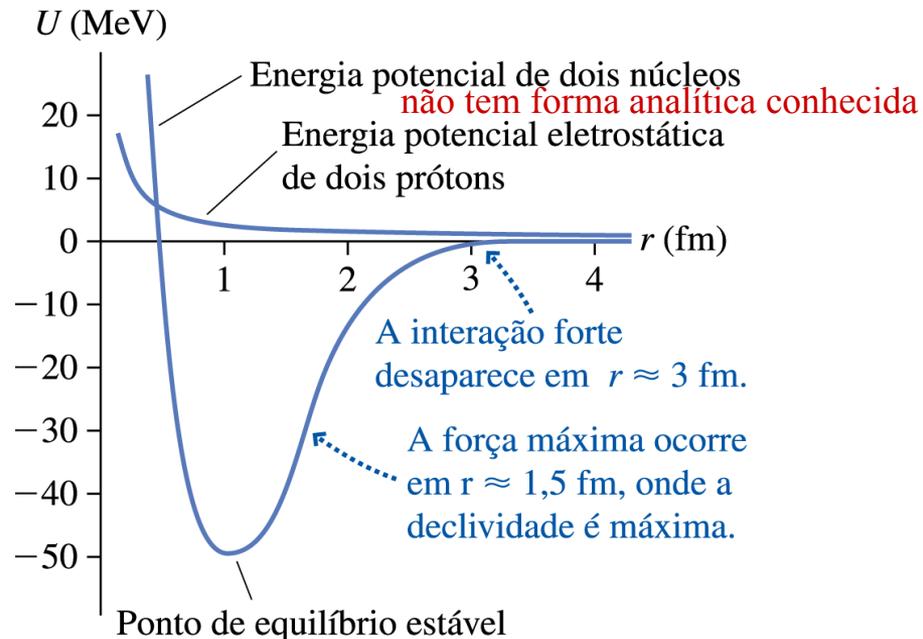
A Interação Nuclear Forte

- O que mantém os núcleos compactos, já que os prótons se repelem?

Interação FORTE



- Força atrativa entre núcleons.
- Não é exercida sobre os elétrons.
- Força de **curto alcance** exercida em distâncias nucleares (alguns fm).



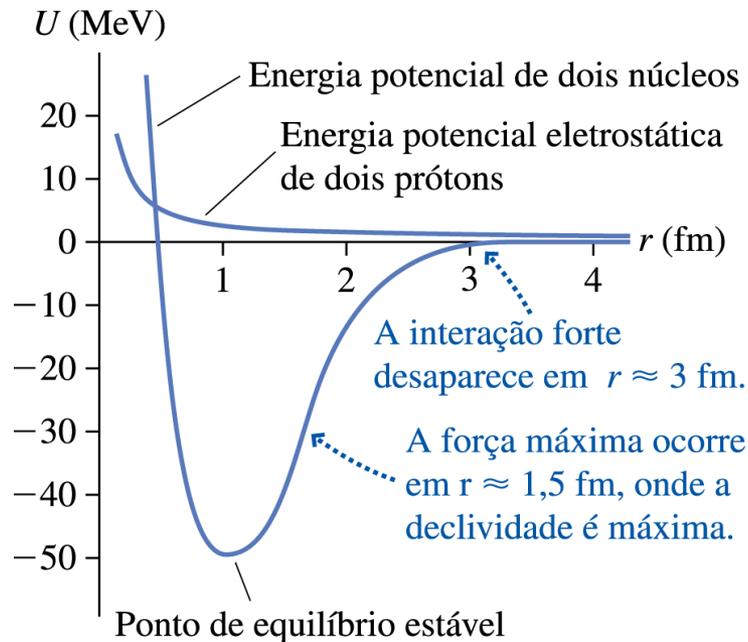
- Dentro de seu alcance ela é muito mais forte que a força eletrostática.
- Para Z grande todos os prótons se repelem, mas apenas os núcleons próximos se atraem → **é necessário $N > Z$ para o núcleo ser estável !**



A Interação Nuclear Forte

Energia eletrostática entre 2 prótons é muito menor do que a energia potencial devido à interação forte

$$F = - \delta U(r)/\delta(r)$$



$r < 1$ fm – derivada negativa muito alta – interação fortemente repulsiva

Caroços dos nucleons se repelem qdo muito próximos

$r > 1$ fm – derivada positiva- força atrativa (máxima em $r \approx 1,5$ fm)

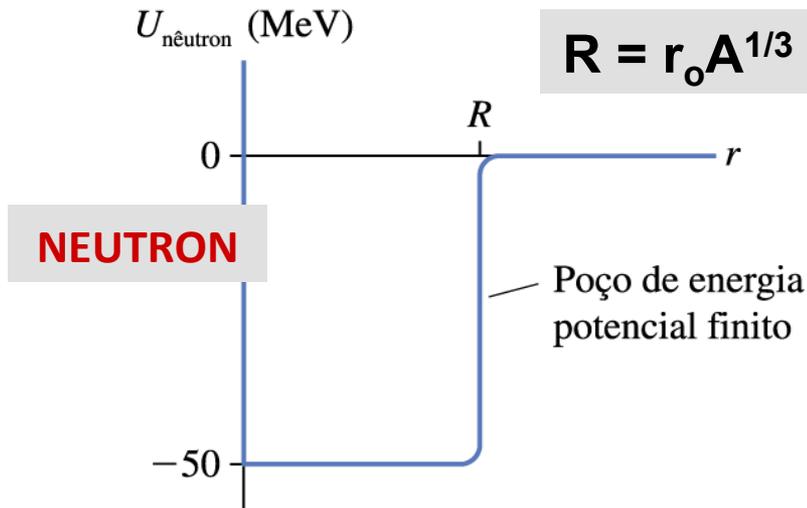
NUCLEONS – constituem a “COLA” adicional que mantém o núcleo unido (não contribuem com forças eletrostáticas)



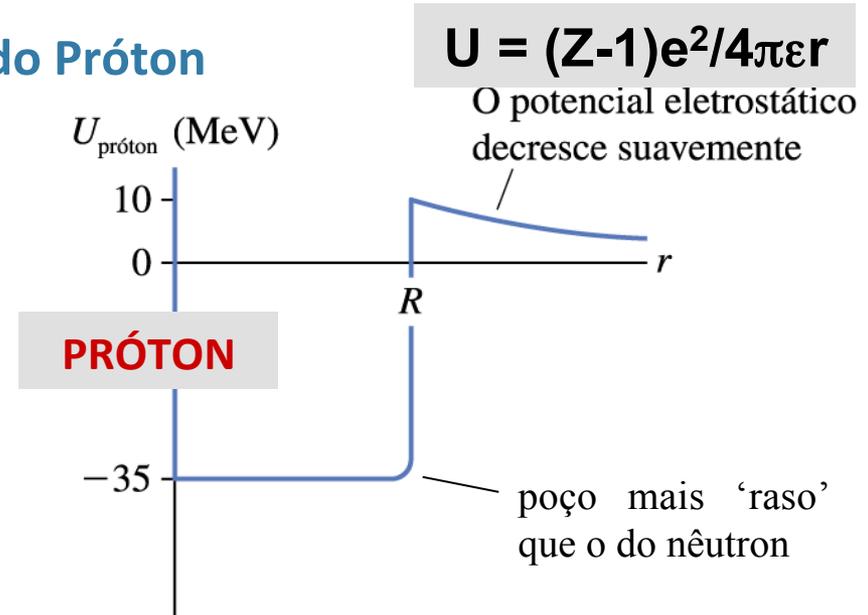
MODELO DE CAMADAS NUCLEARES

Análogo aos átomos multieletrônicos, consideramos que cada próton ou nêutron enxerga um potencial *médio* devido a todos os outros núcleons (simplificação)

Poços de Potencial do Nêutron e do Próton



A energia potencial média de um nêutron deve-se à interação forte.



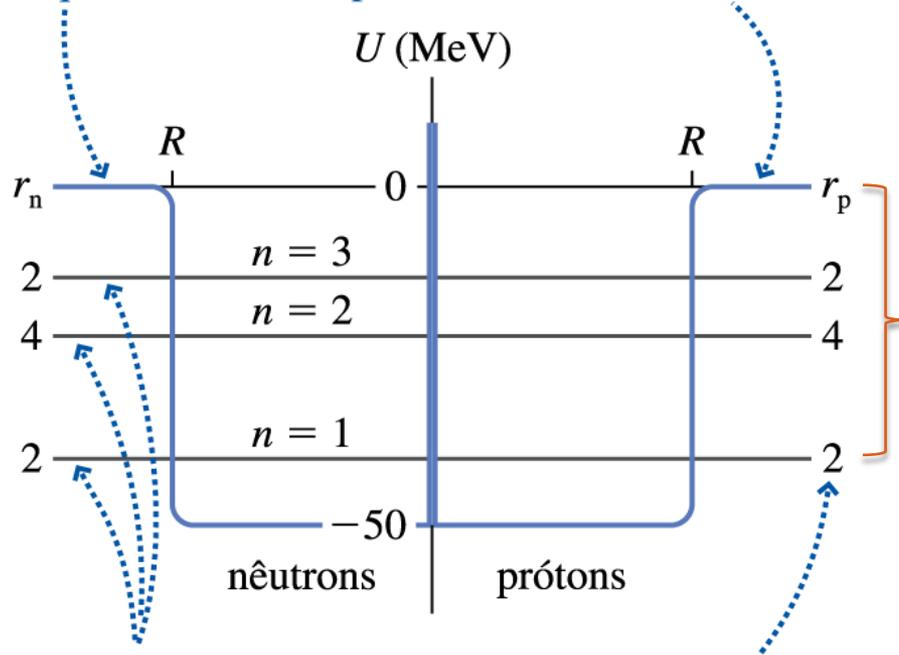
A energia potencial média de um próton se deve à interação forte e à força elétrica. Essa profundidade do poço de potencial é para $Z \approx 30$.

Resolvendo a eq. de Schrödinger para esses potenciais, encontramos níveis que serão ocupados pelos prótons e neutrons, obedecendo ao princípio de exclusão de Pauli

MODELO DE CAMADAS NUCLEAR: Z baixo (≤ 8)

A distância radial do nêutron é medida à esquerda.

Quando o valor de Z é baixo, a energia potencial do próton é quase idêntica à energia potencial do nêutron.



Estes são os três primeiros níveis de energia permitidos. Eles estão separados por muitos MeV.

Estes são os números máximos de núcleons permitidos pelo princípio de Pauli.

Aproximação: desprezar a energia eletrostática entre os prótons

Número de estados permitidos em cada camada (obs: diferente das camadas eletrônicas)

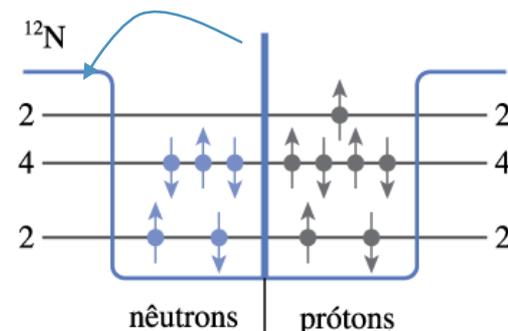
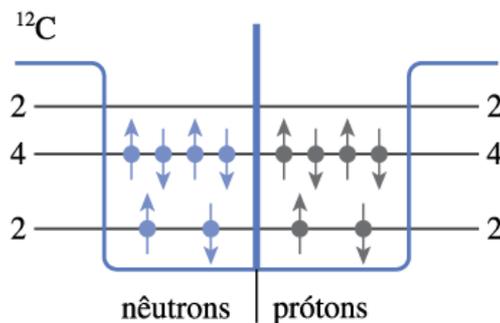
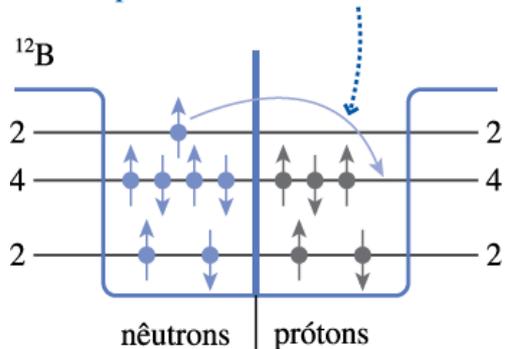
Núcleos com $Z = N = 2, 6$ ou 8 (${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$ e ${}^{16}\text{O}$) têm “dupla camada fechada” → são os picos da curva de energia de ligação!



MODELO DE CAMADAS NUCLEARES: Z baixo (≤ 8)

Um núcleo de ^{12}B poderia baixar sua energia se um nêutron pudesse se transformar em um próton.

e pode! Decaimento Beta



• O Boro ^{12}B e o Nitrogênio ^{12}N são **instáveis**, podendo decair para o ^{12}C (estável), via decaimento Beta: emissão de um elétron, ou de um pósitron (e^+)

$p^+ \rightarrow n + e^+$ = Decaimento Beta β^+ NITROGÊNIO

$n \rightarrow p^+ + e^-$ = Decaimento Beta β^- BORO



The positron or antielectron is the antiparticle or the antimatter counterpart of the electron. The positron has an electric charge of $+1 e$, a spin of $\frac{1}{2}$, and has the same mass as an electron. When a low-energy positron collides with a low-energy electron, annihilation occurs, resulting in the production of two or more gamma ray photons (see electron-positron annihilation).

Positrons are produced naturally in β^+ decays of naturally occurring radioactive isotopes (for example, potassium-40) and in interactions of gamma quanta (emitted by radioactive nuclei) with matter. **Antineutrinos** are another kind of antiparticle created by natural radioactivity (β^- decay). **Many different kinds of antiparticles are also produced by (and contained in) cosmic rays.** Recent (January 2011) research by the American Astronomical Society has discovered antimatter (positrons) originating above thunderstorm clouds; positrons are produced in gamma-ray flashes created by electrons accelerated by strong electric fields in the clouds.



MODELO DE CAMADAS NUCLEARES: Z alto

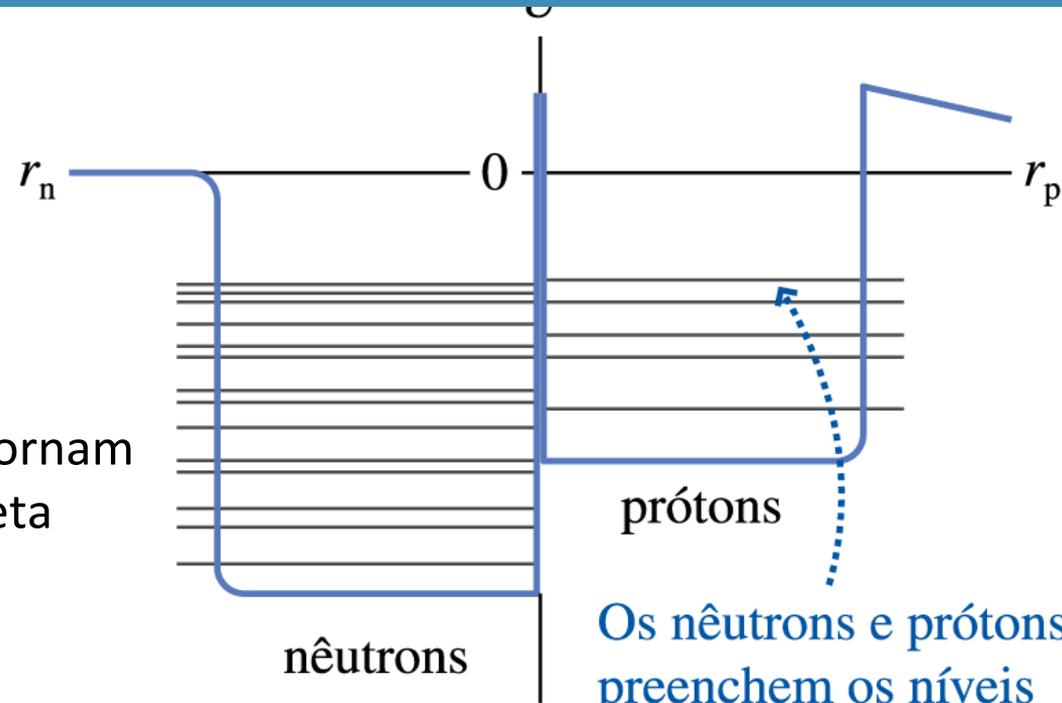
Poços de potencial do Nêutron e do Próton são diferentes – o do próton é bem mais raso e portanto com menos níveis

Nêutrons ou prótons em excesso tornam o núcleo instável via decaimento beta

- $p^+ \rightarrow n + e^+ + \text{energia}$
- $n \rightarrow p^+ + e^- + \text{energia}$

resultado final é manter os níveis preenchidos em ambos os lados com alturas aproximadamente iguais.

Portanto $N > Z$ nos núcleos estáveis com $Z \gg 1$!



Os nêutrons e prótons preenchem os níveis de energia até a mesma altura. Para que isso ocorra, são necessários mais nêutrons que prótons.



RADIAÇÃO & RADIOATIVIDADE

- ◆ Após Marie Curie e Pierre Curie descobrirem o elemento radioativo Rádio, J. J. Thomson e Rutherford realizaram o experimento abaixo.

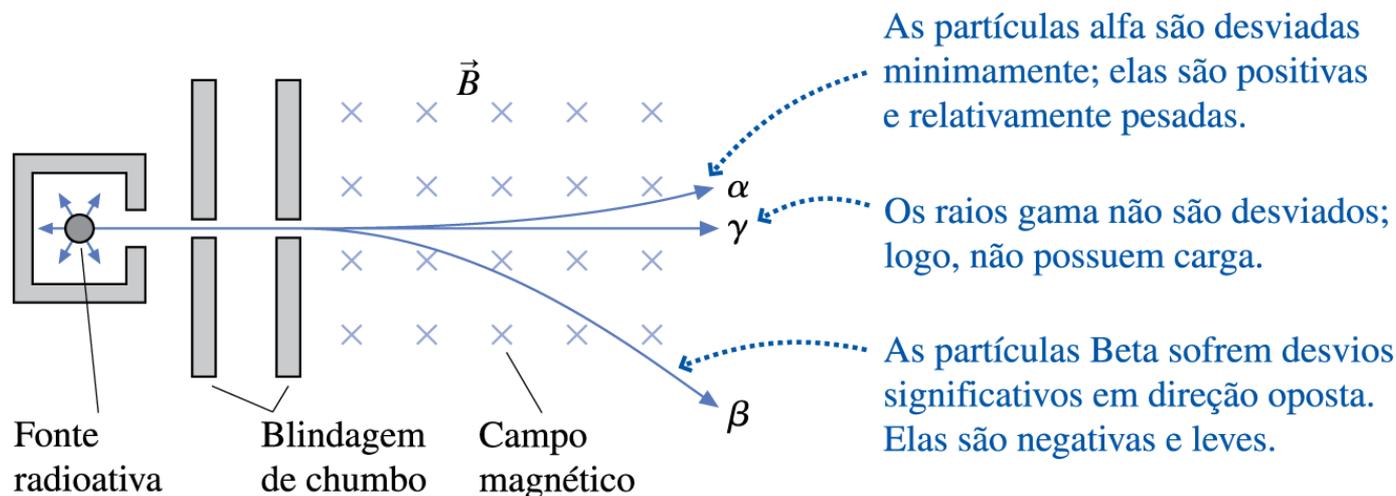


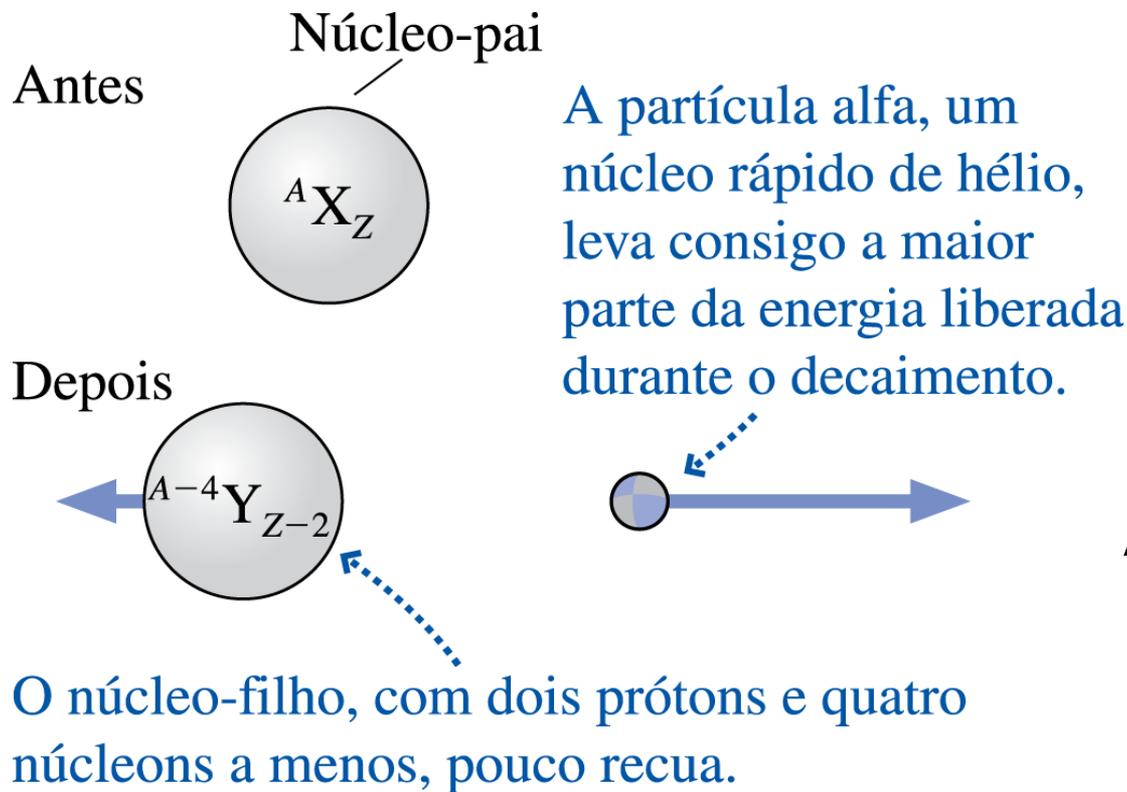
TABELA 43.3 Os três tipos de radiação

Radiação	Identificação	Carga	Blindada por
Alfa, α	Núcleo de ${}^4\text{He}$	$+2e$	Folha de papel
Beta, β	Elétron	$-e$	Folha de alumínio de alguns mm
Gama, γ	Fóton de alta energia	0	Muitos cm de chumbo



DECAIMENTO alfa (α)

- ◆ Ocorre em núcleos pesados, além do pico da Curva de Energia de Ligação (energeticamente favorável se quebrar)



Exemplo:



$$m_{\text{U}} = 238,0505\text{u};$$

$$m_{\text{Th}} = 234,0436\text{u};$$

$$m_{\text{He}} = 4,0026\text{u}$$

$$\begin{aligned}\Delta E &= (m_{\text{U}} - m_{\text{Th}} - m_{\text{He}})c^2 \\ &= 0,0046\text{u} = 4,3\text{MeV} \sim K_{\alpha}\end{aligned}$$

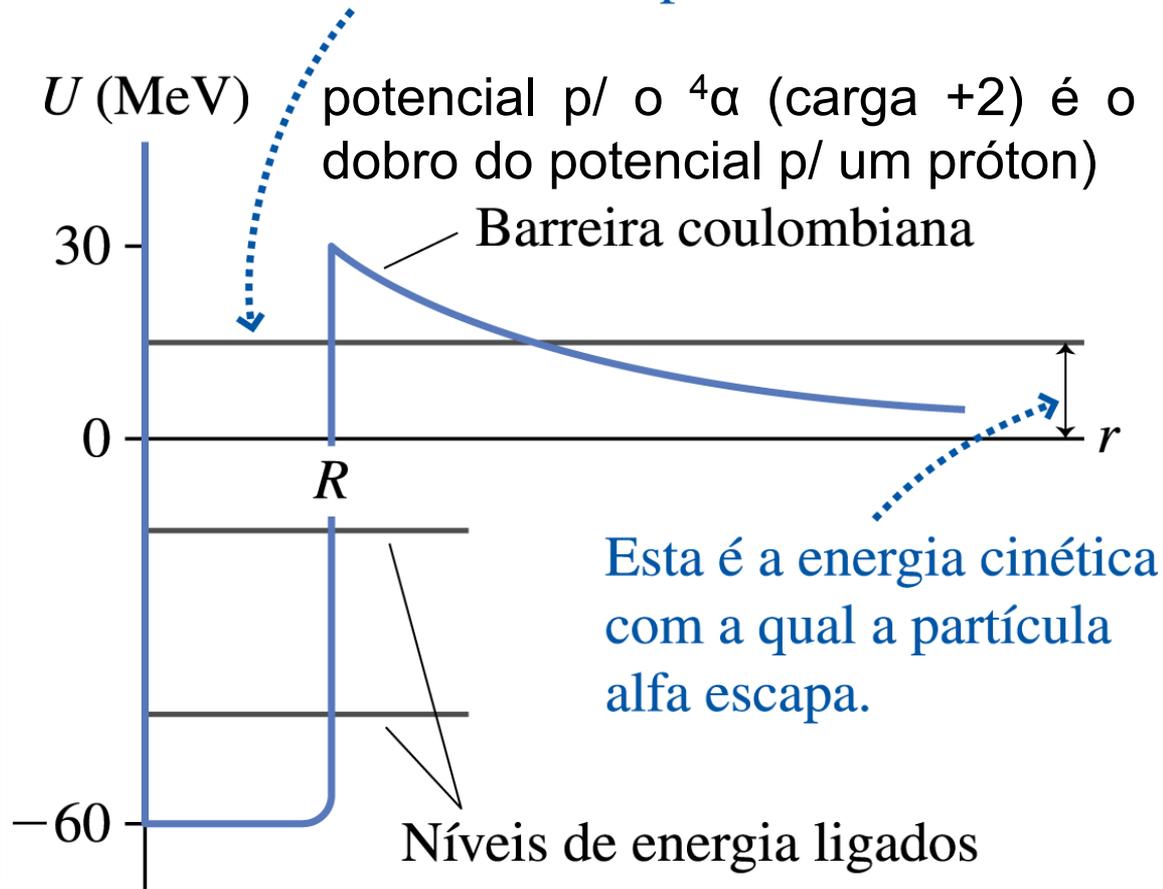


DECAIMENTO alfa (α)

Mecanismo: **tunelamento** através da barreira Coulombiana

- ◆ Os núcleos de Hélio são fortemente ligados (ver pico na curva de energia de ligação). Em geral:
- ◆ Mais favorável (energia) emitir um núcleo inteiro do que um próton sozinho!

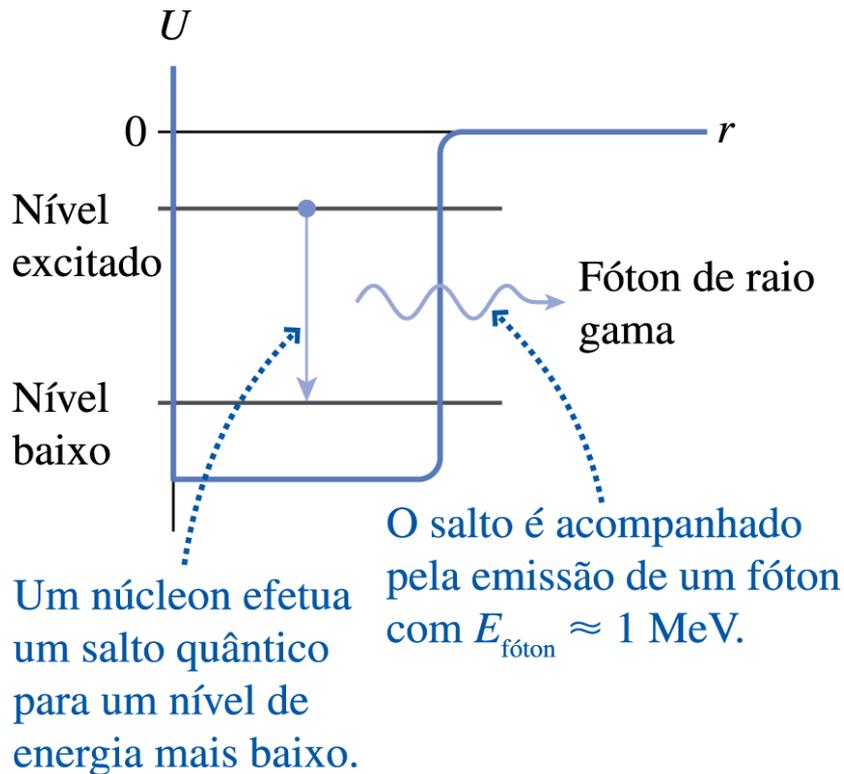
Uma partícula alfa pode tunelar através da barreira coulombiana e escapar.



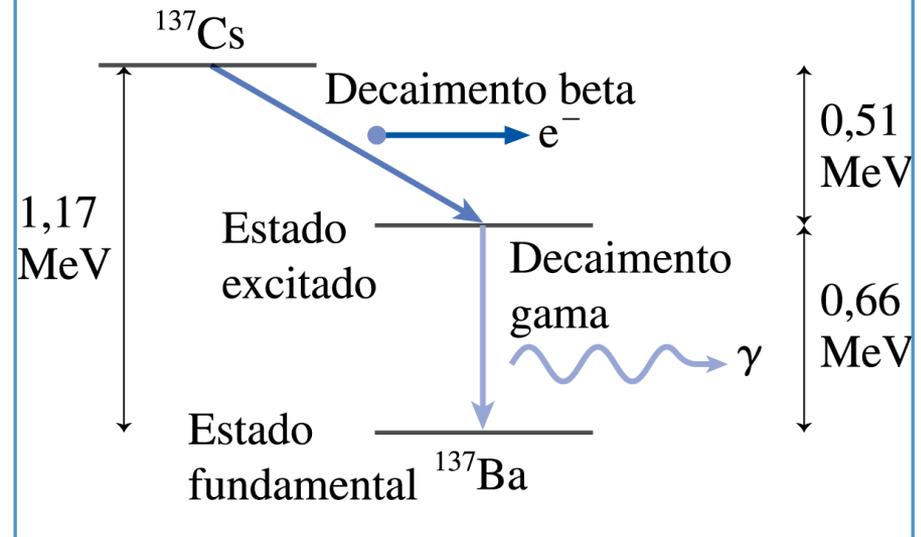
DECAIMENTO Gama (γ)

- ◆ Mecanismo: emissão de um fóton pelo decaimento espontâneo de um núcleon de um nível mais excitado para um menos excitado.

Note que isso **não altera Z ou A**

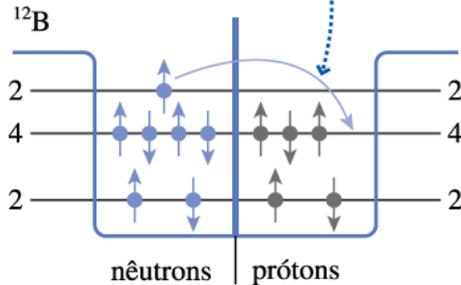


Em geral ocorre logo após um decaimento α ou β que deixa o núcleo “filho” num estado excitado



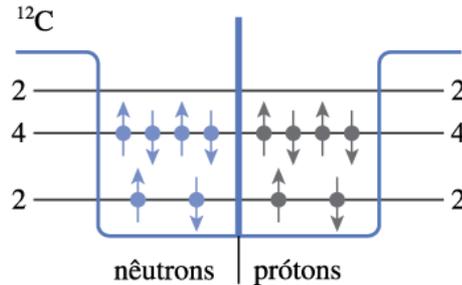
DECAIMENTO Beta (β)

Um núcleo de ^{12}B poderia baixar sua energia se um nêutron pudesse se transformar em um próton.

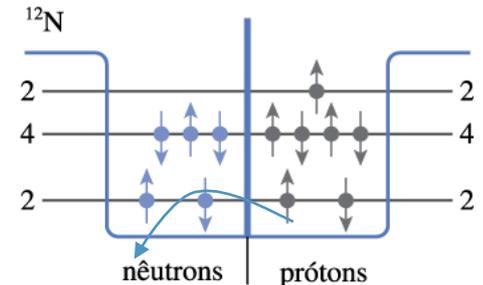


$$m_{\text{B}_{12}} = 12.01435 \text{ u}$$

e pode! Decaimento Beta

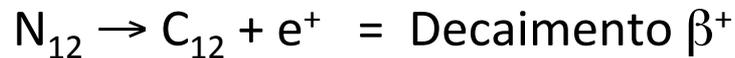
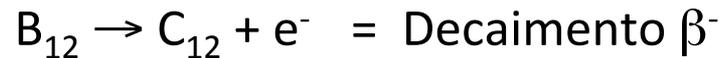


$$m_{\text{C}_{12}} = 12.0000 \text{ u}$$



$$m_{\text{N}_{12}} = 12.01861 \text{ u}$$

O Boro ^{12}B e o Nitrogênio ^{12}N são instáveis, podendo decair para o ^{12}C (estável), via decaimento Beta: emissão de um elétron, ou de um pósitron (e^+)



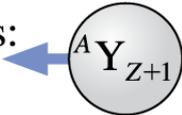
DECAIMENTO Beta (β)

(a) Decaimento beta-menos

Antes:



Depois:



Um nêutron se transforma em um próton e um elétron. O elétron é ejetado para fora do núcleo.

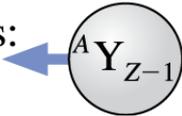


(b) Decaimento beta-mais

Antes:



Depois:



Um próton se transforma em um nêutron e um pósitron. O pósitron é ejetado para fora do núcleo.



Partícula	Símbolo	Massa (u)	Massa (MeV/c^2)
Elétron	e	0,00055	0,51
Próton	p	1,00728	938,28
Nêutron	n	1,00866	939,57

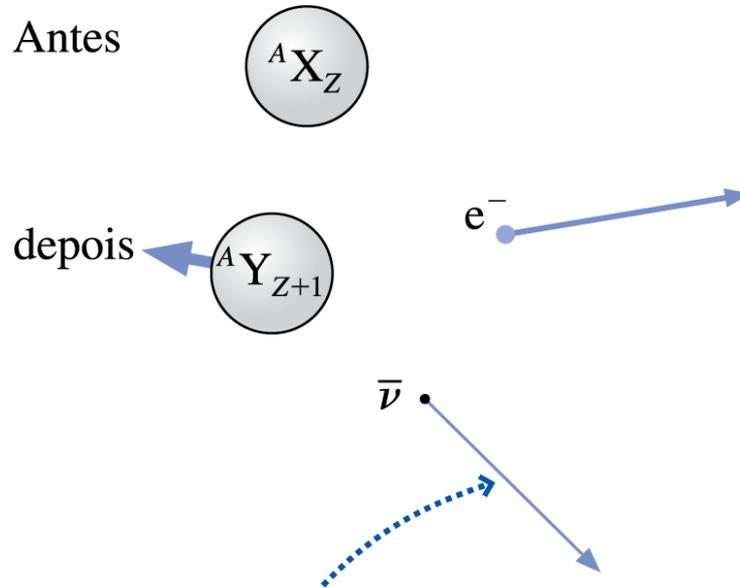
$$m_N - (m_p + m_e) = 0,00083u > 0$$

- ✓ O decaimento β^- pode ocorrer com um nêutron isolado. Já o β^+ não ocorre com um próton isolado (prótons isolados são estáveis!).
- ✓ Decaimentos β^\pm só são possíveis se $m_X > m_Y + m_e$. Como $m_p < m_n$, então o decaimento β^+ só pode ocorrer se a energia de ligação de Y é bem mais negativa que a de X (compare N_{12} e C_{12}).



DECAIMENTO β & INTERAÇÃO NUCLEAR FRACA

Na realidade é mais complicado!!!!!!



Um (*anti*)*neutrino* também é criado, levando parte da energia e momentum do nêutron original. Essa partícula é muito difícil de detectar, pois não tem carga e sua massa é (pelo menos) 100000 vezes menor que a do elétron.

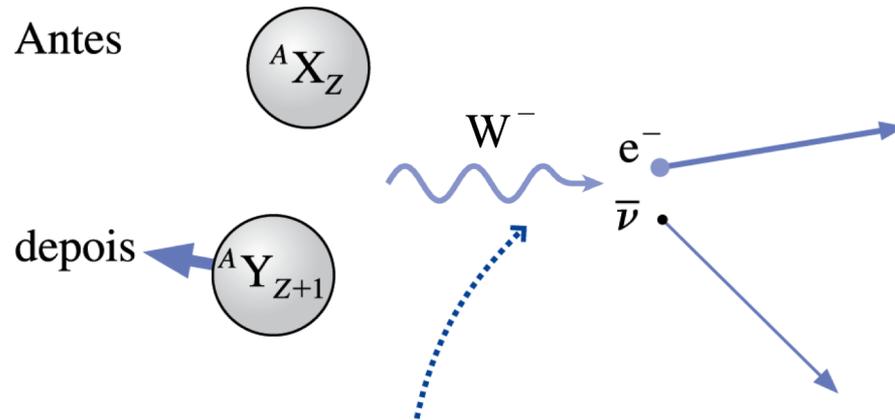
- $p^+ \rightarrow n + e^+ + \text{energia}$
- $n \rightarrow p^+ + e^- + \text{energia}$
- Como um nêutron se transforma num próton?
- **1930** experimentos mostraram que a energia e o momentum não se conservavam

FERMI - neutrino



DECAIMENTO β & FORÇA NUCLEAR FRACA

Na realidade é mais complicado *ainda*....



emissão de uma partícula W^- , a qual rapidamente decai no e^- e no $\bar{\nu}$

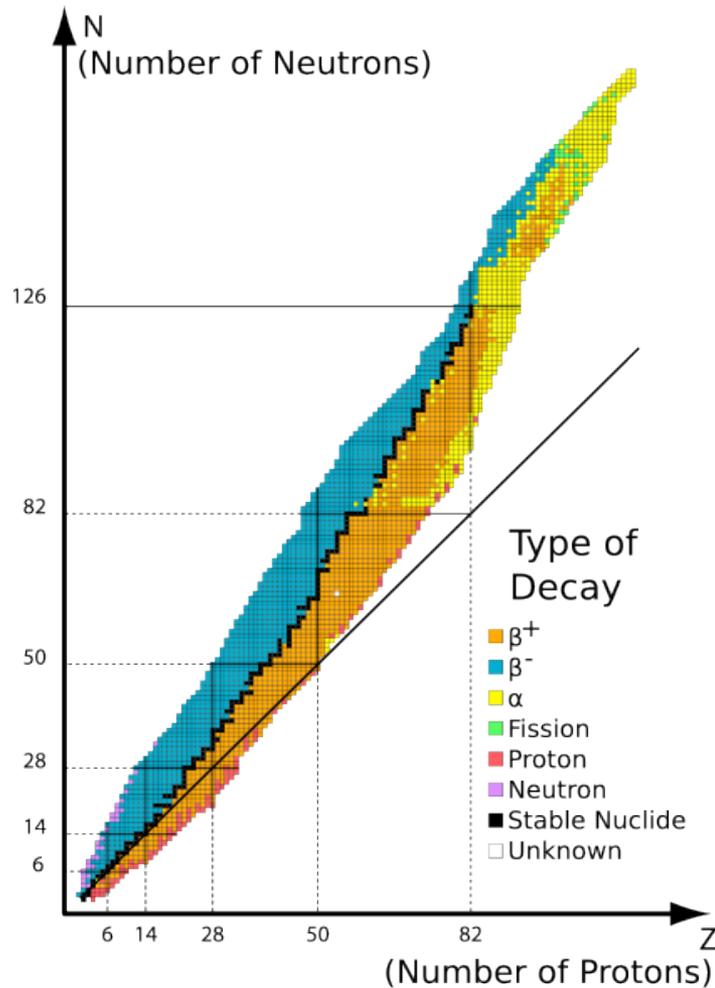
Essa partícula é análoga a um fóton, mas ao invés de transmitir a força eletromagnética ela é responsável por uma nova força, chamada **força nuclear fraca** (pois só age no interior do núcleo, mas é muito mais fraca que a força nuclear forte). Existem ainda outras duas 'versões' dessa partícula, chamadas W^+ (emitida no decaimento β^+) e Z (neutra, responsável pela interação entre neutrinos e elétrons). A existência de todas elas só foi confirmada em 1983.

Hoje em dia já se sabe que a força nuclear fraca e a força eletromagnética são apenas aspectos de uma mesma interação unificada, chamada **força eletrofraca**.



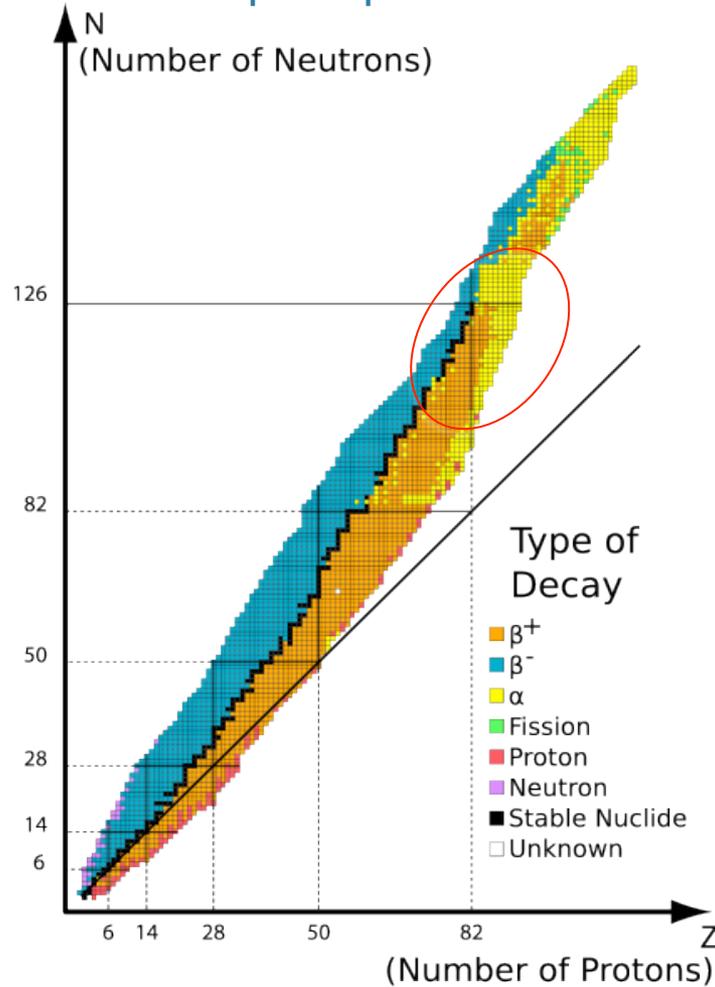
Decaimento nuclear: visão global

Classificação dos núcleos de acordo com seu mecanismo principal de decaimento

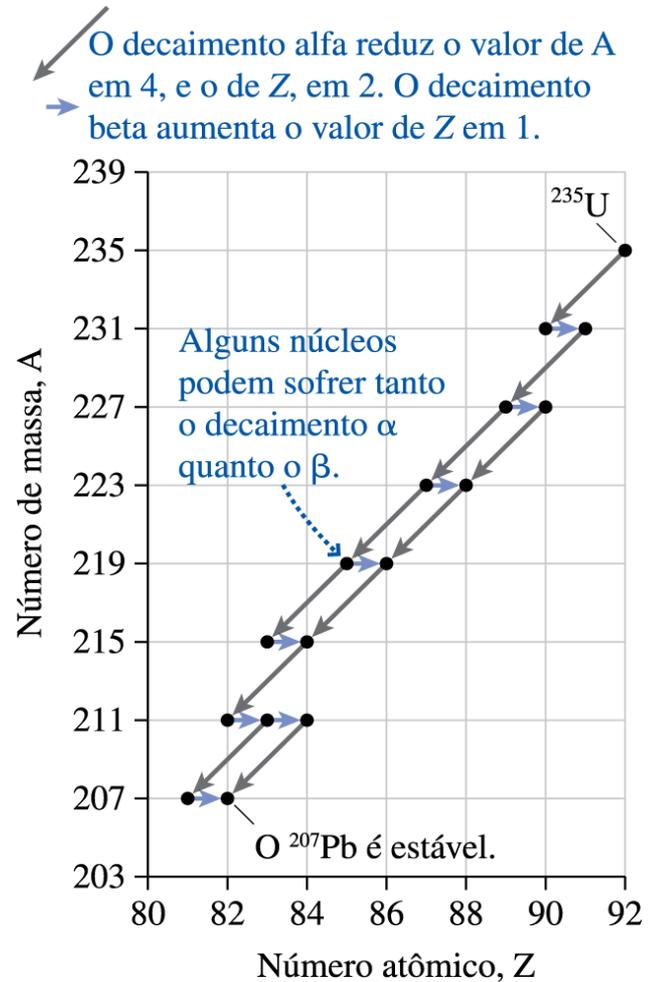


Decaimento nuclear: visão global

Classificação dos núcleos de acordo com seu mecanismo principal de decaimento



Sequências de decaimentos



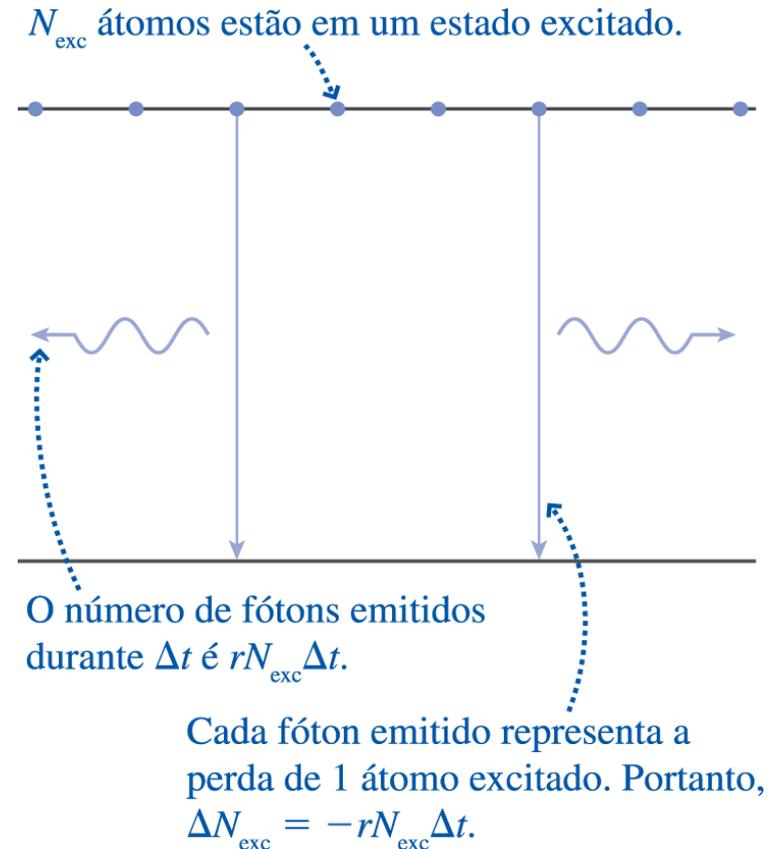
Recordando: vida média de um elétron

- Um átomo excitado emitirá um fóton espontaneamente, em um instante **aleatório**
- Se o átomo ainda não tiver emitido até o instante t , a **probabilidade** de emitir no intervalo dt seguinte é **$P = r dt$** , sendo **r** uma **taxa de relaxação** que varia de transição p/ transição.

Eq. de Relaxação:
$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

$$\tau = \frac{1}{r} = \text{tempo de vida médio do estado excitado}$$

tipicamente: desde ms até ns.



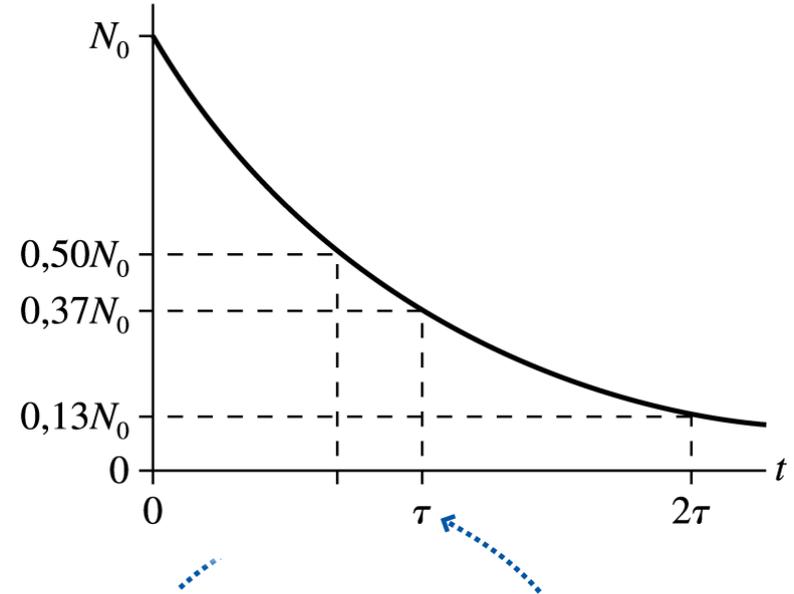
Decaimento nuclear: vida média

- Um **núcleo instável** emitirá uma **partícula α, β ou γ** espontaneamente, em um instante **aleatório**
- Se o núcleo ainda não tiver emitido até o instante t , a **probabilidade** de emitir no intervalo dt seguinte é **$P = r dt$** , sendo r uma **taxa de relaxação** que varia de transição p/ transição.

Eq. de Relaxação:
$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

$$\tau = \frac{1}{r} = \text{tempo de vida médio (ou "constante de tempo")} \text{ do núcleo}$$

Número de núcleos restantes



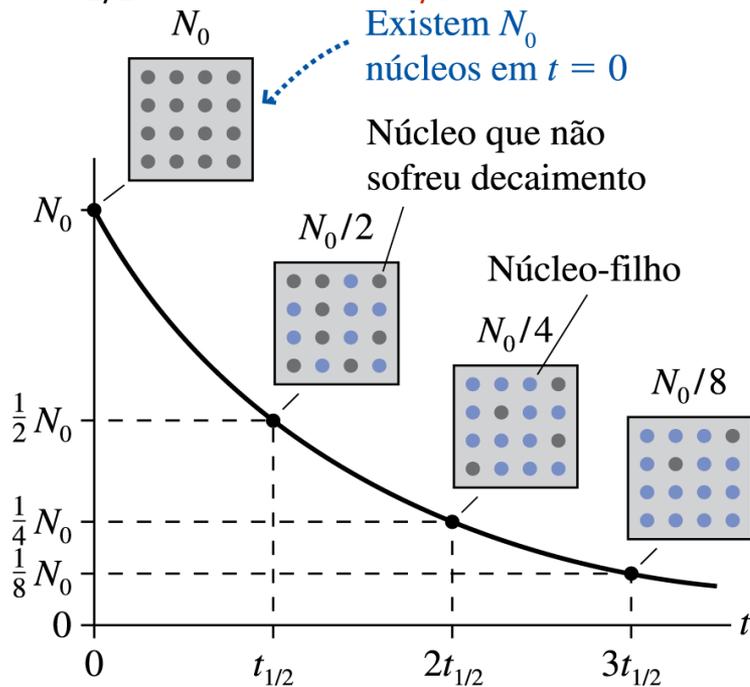
A constante de tempo é o instante de tempo em que o número de núcleos é e^{-1} , ou 37% do número inicial.



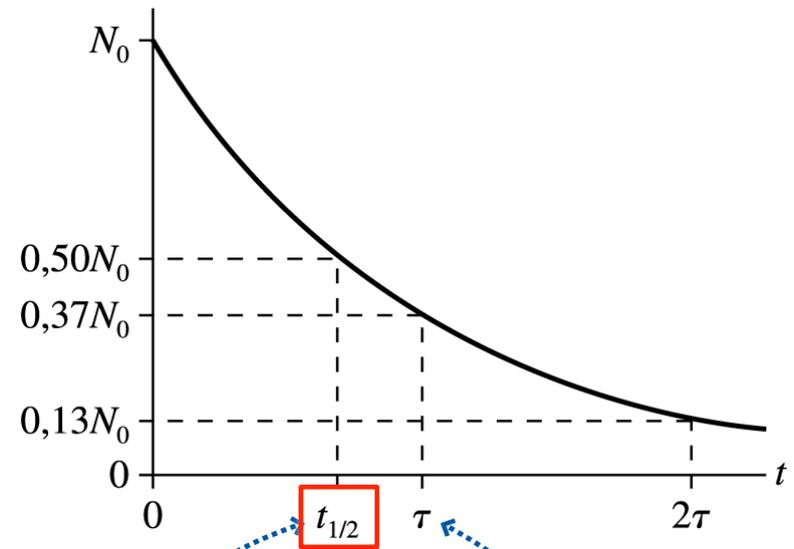
Decaimento nuclear: vida média

Meia-vida: tempo após o qual metade dos núcleos originais já decaiu

$$N(t_{1/2}) = N_0/2 \rightarrow t_{1/2} = \tau \ln 2 = 0.693 \tau$$



Número de núcleos restantes



A meia-vida é o tempo durante o qual decai a metade dos núcleos originais.

A constante de tempo é o instante de tempo em que o número de núcleos é e^{-1} , ou 37% do número inicial.

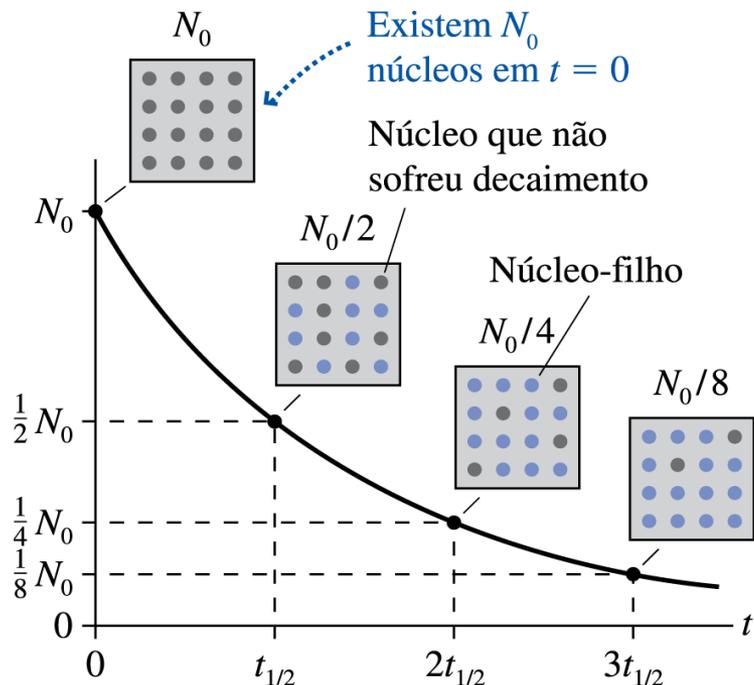
Eq. de Relaxação:

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

Decaimento nuclear: vida média

Meia-vida: tempo após o qual metade dos núcleos originais já decaiu

$$N(t_{1/2}) = N_0/2 \rightarrow t_{1/2} = \tau \ln 2 = 0.693 \tau$$



Exemplos de meias-vidas

nêutron livre: 10,5 minutos

Flúor ^{18}F (usado em tomografia por emissão de pósitrons): **109,8 minutos**

Iodo ^{131}I (usado em radioterapia p/ câncer de tireóide): **8 dias**

Césio ^{137}Cs (fonte de raios- γ usados em aplicações industriais/medicinais. Acidente de Goiânia/1987): **30 anos**

Carbono ^{14}C (usado para datação de objetos históricos): **5730 anos**

Potássio ^{40}K (usado p/ datação de rochas): **1,28 bilhão de anos**

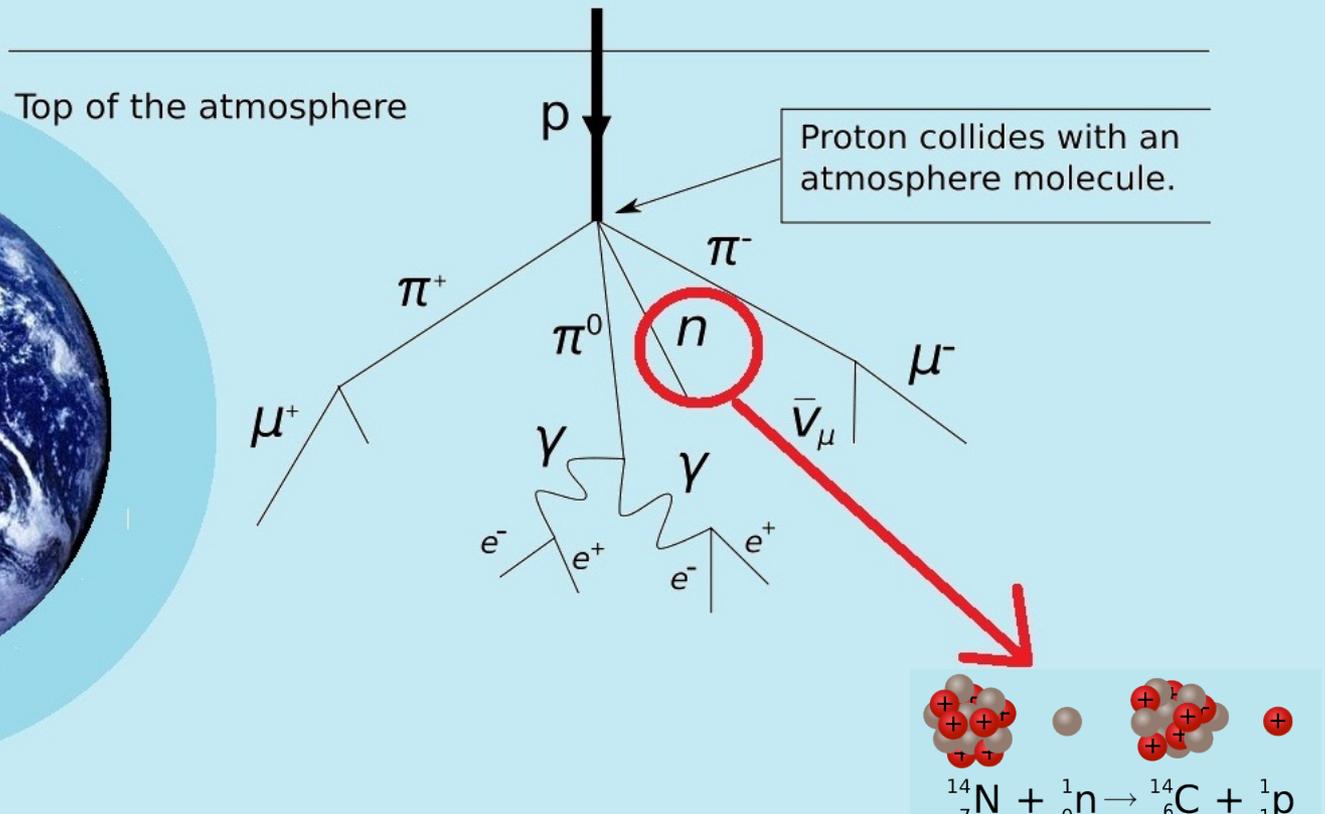
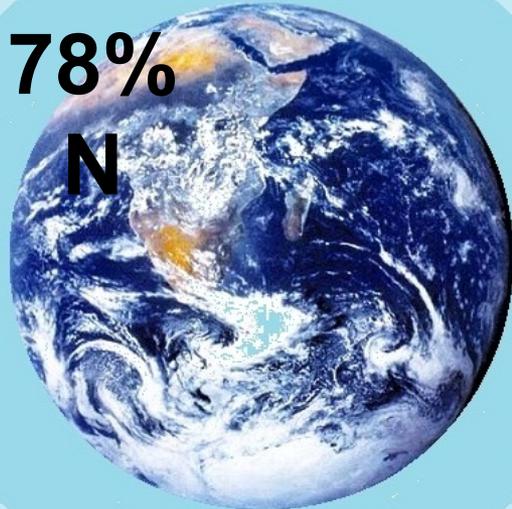
Urânio ^{238}U : **4,5 bilhões de anos**



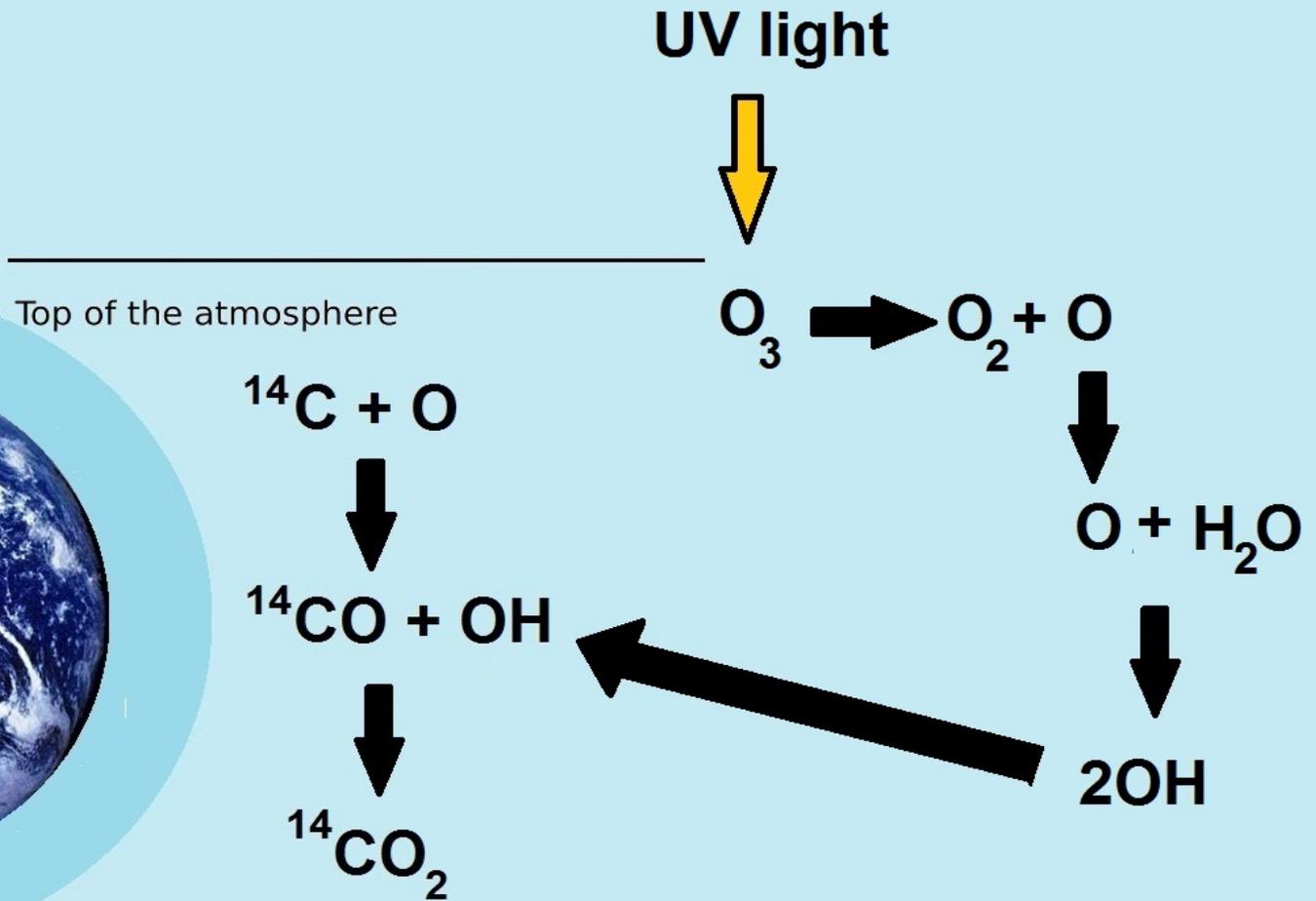
Produção de Radiocarbono (^{14}C)

próton energético vindo do espaço profundo (“raio cósmico”)

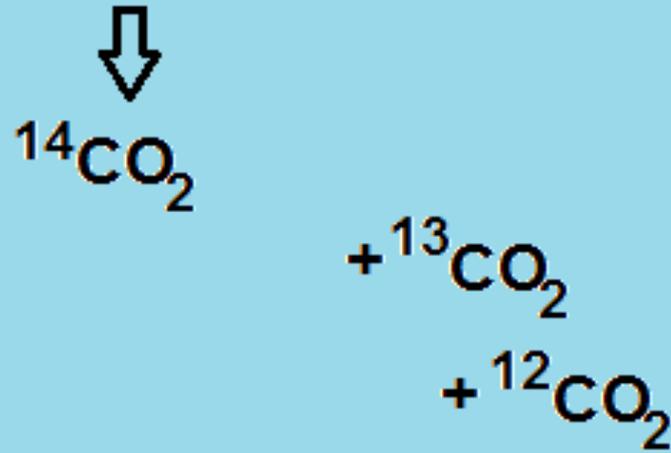
78%
N



Produção de dióxido de carbono



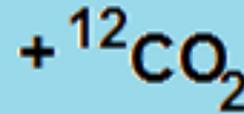
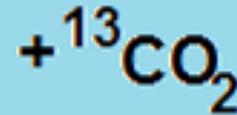
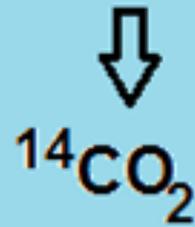
O ciclo do carbono



Equilíbrio: a produção compensa as perdas por decaimento

Proporção de equilíbrio:

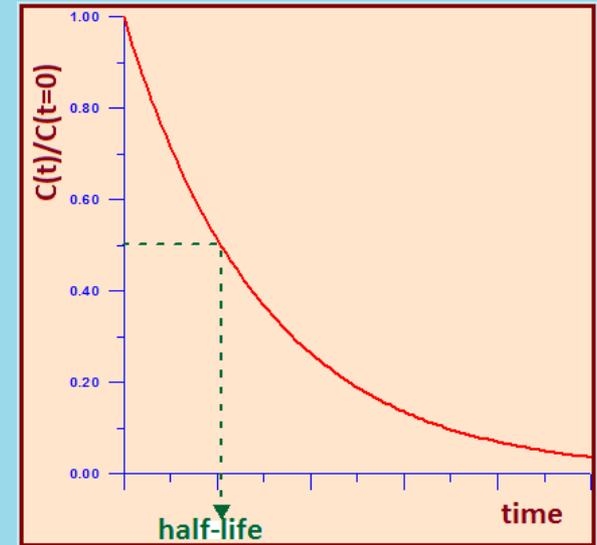
$$^{14}\text{C} / ^{12}\text{C} = 1,3 \times 10^{-12}$$



Morte: as trocas de carbono são interrompidas



Sistema fechado: apenas o decaimento altera a razão isotópica



Aplicação em diversas áreas da ciência

- ✓ **Arqueologia**
- ✓ **Processos deposicionais**
- ✓ **Estudo de incêndios naturais**
- ✓ **Clima global**
- ✓ **Correntes marinhas**
- ✓ **Traçador em processs biomédicos**



Exemplo de datação por carbono (43.4)

Um detector (contador Geiger) mede a **atividade A** de uma amostra (num. de decaimentos /s): $A = r N(t)$. Unidade: 1 Bq = 1 decaimento/s)

✓ Arqueólogos encontram um pedaço de carvão de 5,0g proveniente de uma fogueira acesa por caçadores pré-históricos. A amostra tem atividade de 0,35 Bq devidos ao ^{14}C . Qual a sua idade?

1. Meia-vida: $t_{1/2} = 5370 \text{ anos} = 1,807 \times 10^{11} \text{ s} \rightarrow r = \ln 2 / t_{1/2} = 3,84 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$

2. Num de ^{14}C na amostra agora: $N_{14}(t) = 0,35 / r = 9,1 \times 10^{10}$ núcleos

3. Num de ^{12}C na amostra (agora e tb em $t=0$):

$$N_{12} = m / m(^{12}\text{C}) = 5,0\text{g} / (12 \times 1,6605 \times 10^{-24}\text{g}) = 2,51 \times 10^{23} \text{ núcleos.}$$

Portanto no presente a proporção de ^{14}C é $N_{14}/N_{12}(t) = 3,6 \times 10^{-13}$

4. Assumimos que originalmente $N_{14}/N_{12}(0) = 1,3 \times 10^{-12}$. Substituindo todos os

dados na eq. $\frac{N_{14}}{N_{12}}(t) = \frac{N_{14}}{N_{12}}(0) \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$ e resolvendo para t :

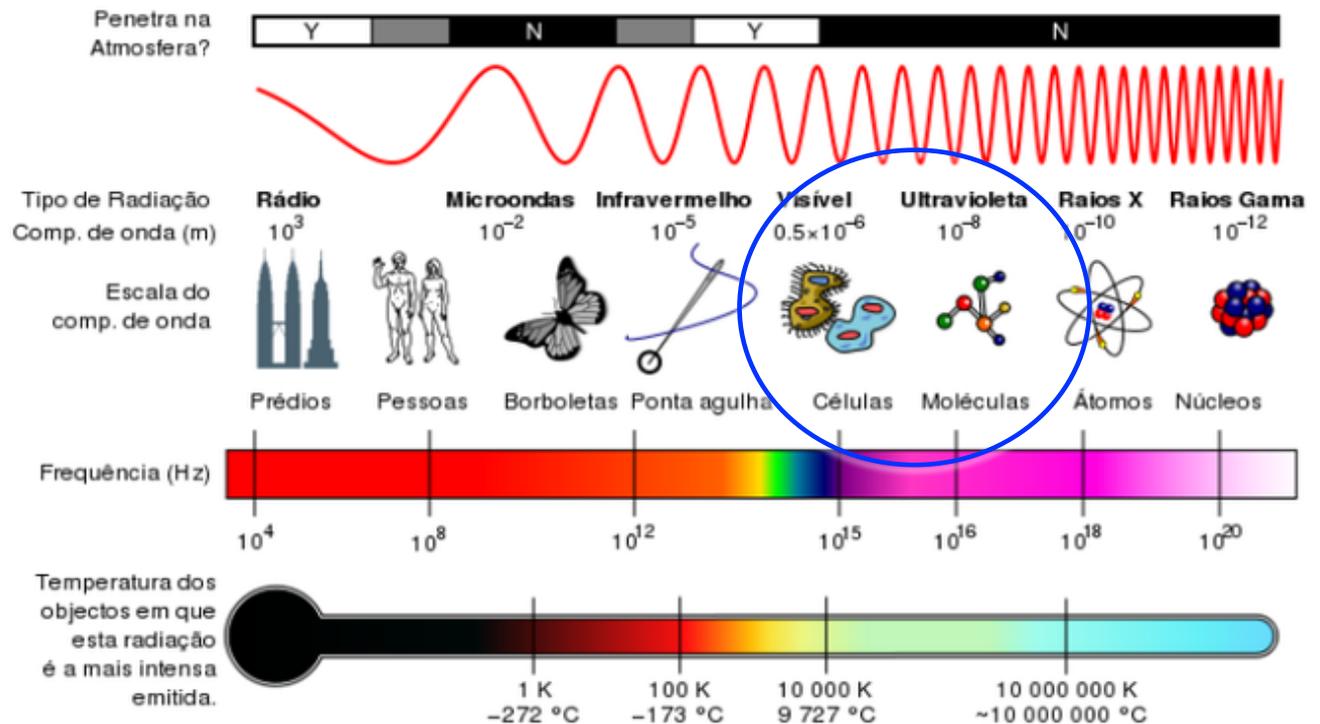
$t = 10.600 \text{ anos!}$



RADIAÇÃO IONIZANTE

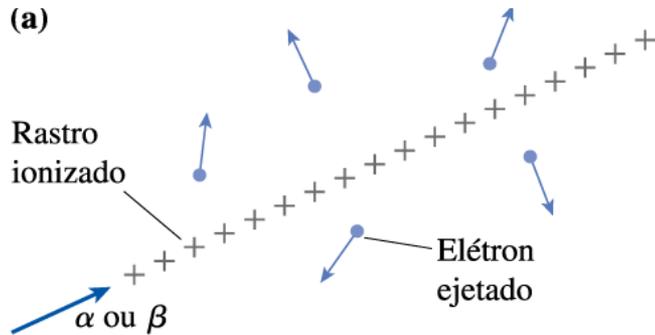
Raios-X e radiações nucleares α, β, γ são **Radiações ionizantes**: devido à sua alta energia, podem ionizar a matéria e romper ligações moleculares.

Atenção: nem toda radiação eletromagnética é ionizante, e nem toda radiação ionizante é eletromagnética!



RADIAÇÃO IONIZANTE

Ao atravessar a matéria, raios α ou β vão colidindo com átomos e ejetando elétrons, deixando um rastro de íons, gerando reações químicas e alterando moléculas



(raios- γ podem, de acordo com sua energia, gerar efeitos semelhantes, ou sofrer outros processos, como absorção)

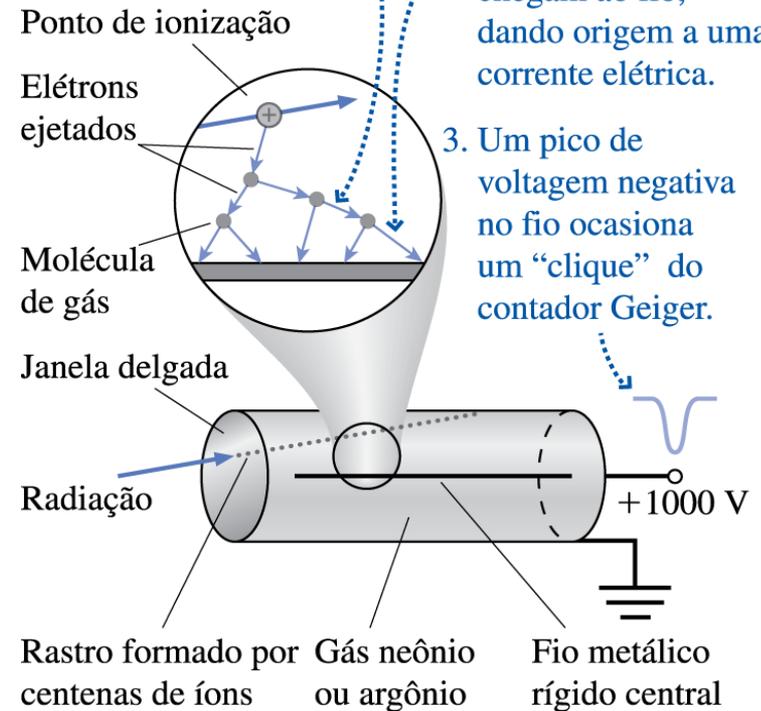
Radiações ionizantes podem causar mutações, tumores ou até morte em seres vivos. Mas não alteram os núcleos, então não tornam radioativos os materiais irradiados.

Detector (Contador Geiger):

1. Elétrons ejetados causam uma reação em cadeia de ionização do gás.

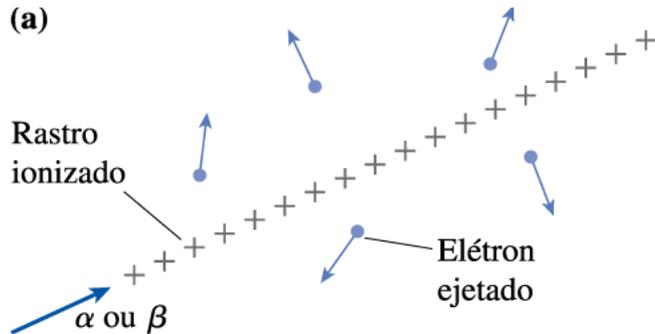
2. Milhares de elétrons chegam ao fio, dando origem a uma corrente elétrica.

3. Um pico de voltagem negativa no fio ocasiona um “clique” do contador Geiger.



Radiação Ionizante

Ao atravessar a matéria, raios α ou β vão colidindo com átomos e ejetando elétrons, deixando um rastro de íons, gerando reações químicas e alterando moléculas



(raios- γ podem, de acordo com sua energia, gerar efeitos semelhantes, ou sofrer outros processos, como absorção)

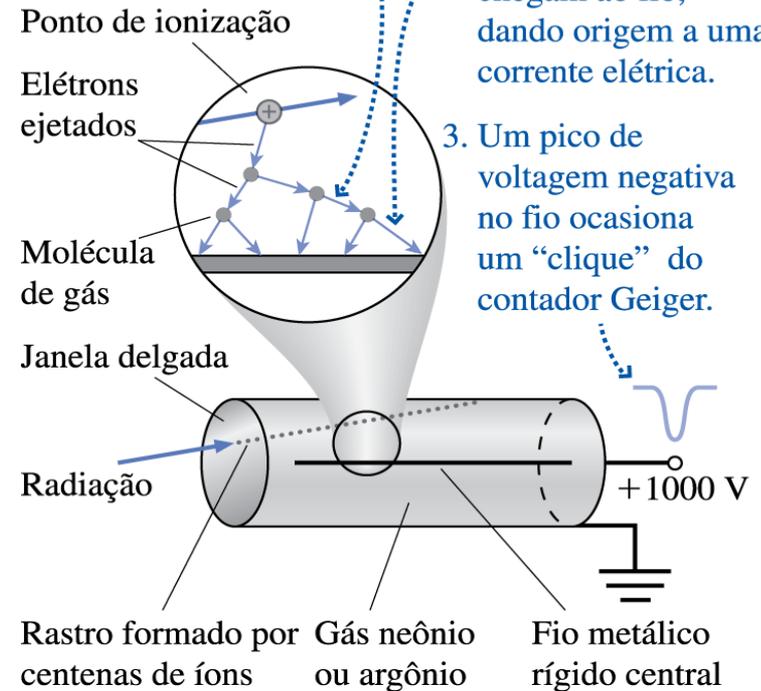
Uma pessoa ou objeto só pode 'se tornar radioativo' se ingerir ou absorver de alguma forma uma *fonte* de radiação, i.e., um material radioativo que ainda não decaiu.

Detector (Contador Geiger):

1. Elétrons ejetados causam uma reação em cadeia de ionização do gás.

2. Milhares de elétrons chegam ao fio, dando origem a uma corrente elétrica.

3. Um pico de voltagem negativa no fio ocasiona um "clique" do contador Geiger.



DOSES DE RADIAAÇÃO

- **Dose absorvida (Gy)** de radiação = energia da radiação ionizante que é absorvida por 1Kg de tecido **1gray = 1 Gy = 1,00 J/Kg** de energia absorvida

Repara que só depende da energia absorvida e nada do tipo da fonte

RBE (eficácia biológica relativa)

- DOSE EQUIVALENTE = produto entre a dose absorvida e o RBE Esta unidade mede a quantidade de energia em J depositada pela fonte em um kg de material biológico, já levando em conta os impactos diferentes dos diferentes tipos de radiação: **Sievert (Sv) ou rem (= 0,01 Sv)**
- Unidades para medir a quantidade de dano de uma fonte radioativa em um ser vivo ('dose equivalente')
- Um ótimo resumo visual do tamanho das doses de radiação que absorvemos ao fazer diversas atividades, desde prosaicas como comer uma banana ou voar de avião, até suicidas como visitar o interior do reator de Chernobyl, pode ser encontrado em

- <https://xkcd.com/radiation/>



Radiation Dose Chart

This is a chart of the ionizing radiation dose a person can absorb from various sources. The unit for absorbed dose is "sievert" (Sv), which will have on the cells of the body. One sievert (all at once) will make you sick, and too many more will kill you, but we safely absorb it every day. Note: The same number of sieverts absorbed in a shorter time will generally cause more damage, but your cumulative long-term dose plays a larger role in determining health effects.

■ Sleeping next to someone (0.05 μ Sv)

■ Living within 50 miles of a nuclear power plant for a year (0.09 μ Sv)

■ Eating one banana (0.1 μ Sv)

■ Living within 50 miles of a coal power plant for a year (0.3 μ Sv)

■ Arm x-ray (1 μ Sv)

■ Using a CRT monitor for a year (1 μ Sv)

■ Extra dose from spending one day in an area with higher-than-average natural background radiation, such as the Colorado plateau (1.2 μ Sv)

■ Dental x-ray (5 μ Sv)

■ Background dose received

■ Chest x-ray (20 μ Sv)

■ All the doses in the blue chart combined (~60 μ Sv)

■ Extra dose to Tokyo in weeks following Fukushima accident (40 μ Sv)

■ Living in a stone, brick, or concrete building for a year (70 μ Sv)

■ Average total dose from the Three Mile Island accident to someone living within 10 miles (80 μ Sv)

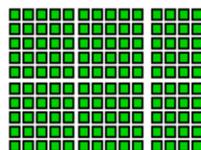
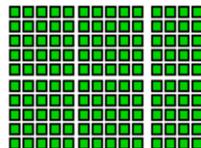
■ Approximate total dose received at Fukushima Town Hall over two weeks following accident (100 μ Sv)

■ EPA yearly release limit for a nuclear power plant (250 μ Sv)

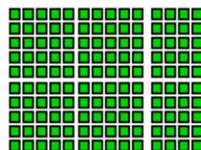
■ Yearly dose from natural potassium in the body (390 μ Sv)

■ Mammogram (400 μ Sv)

■ EPA yearly release from a nuclear power plant

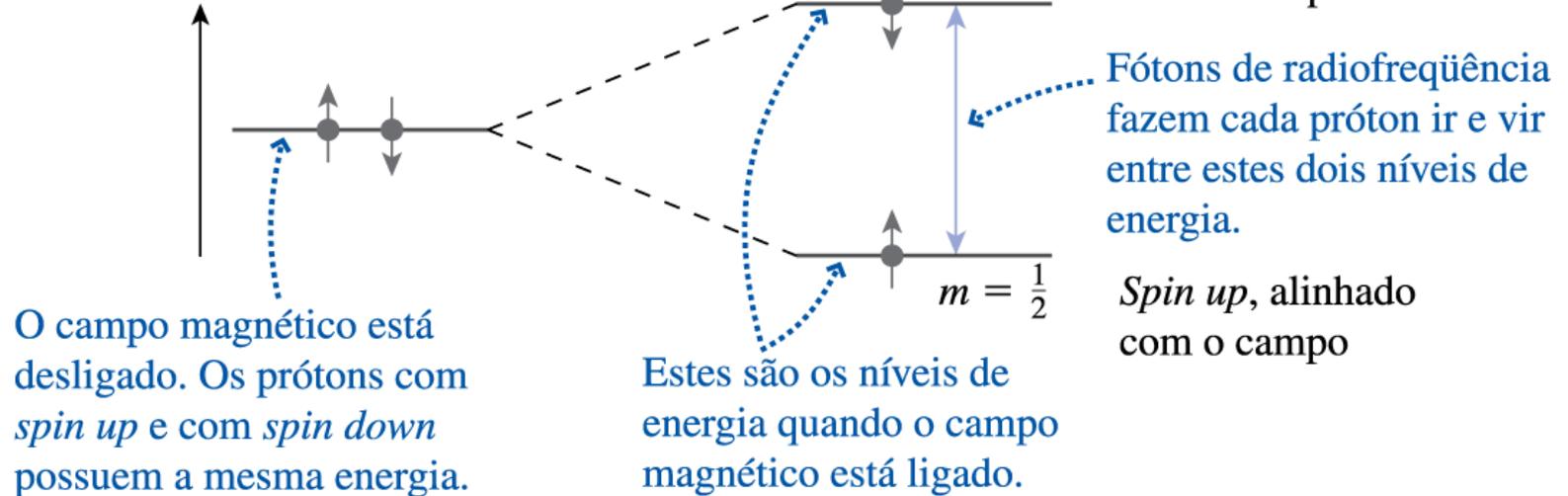


Maximum yearly dose

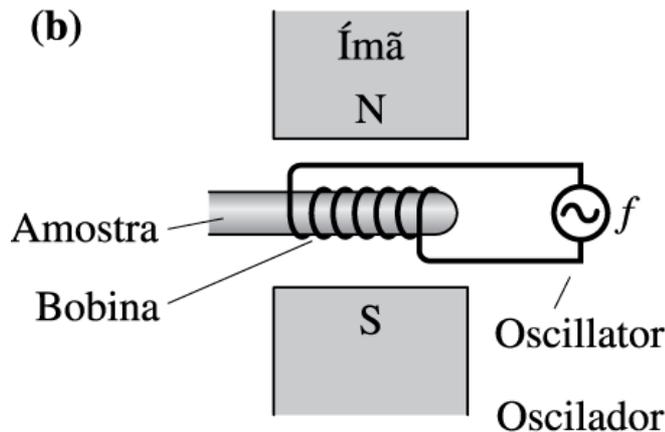


Ressonância Magnética (Nuclear)

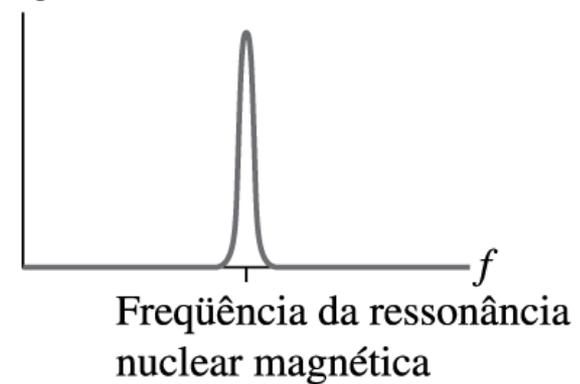
(a) Aumento de energia



(b)



Absorção



RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RNM)

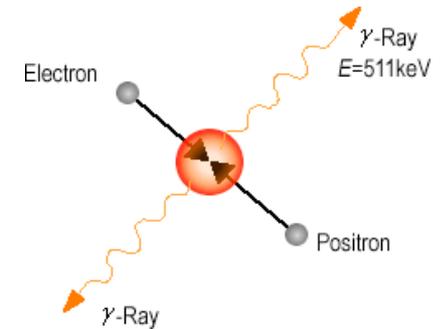
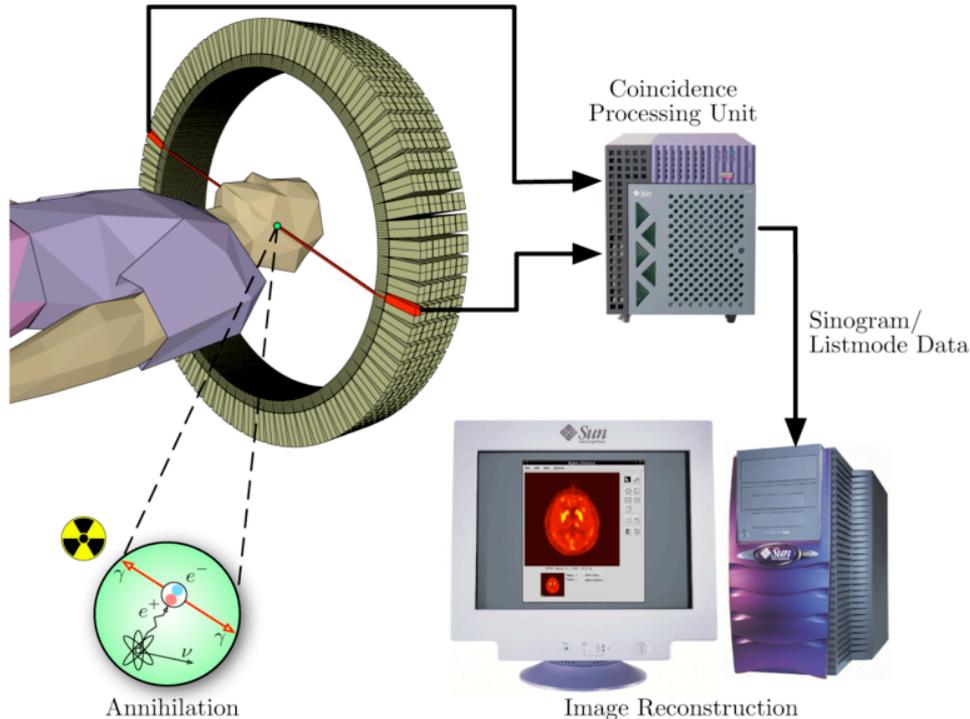
Cada tecido tem frequências ressonantes ligeiramente diferentes (conhecidas). Além disso, colocando o corpo como um todo em um campo magnético estático inhomogêneo, essas frequências passam também a variar ligeiramente de ponto para ponto.

Assim é possível se determinar precisamente qual parte do corpo está absorvendo qual frequência, e mapear os tecidos. Um programa de computador interpreta os dados e gera uma imagem



Tomografia por emissão de pósitrons

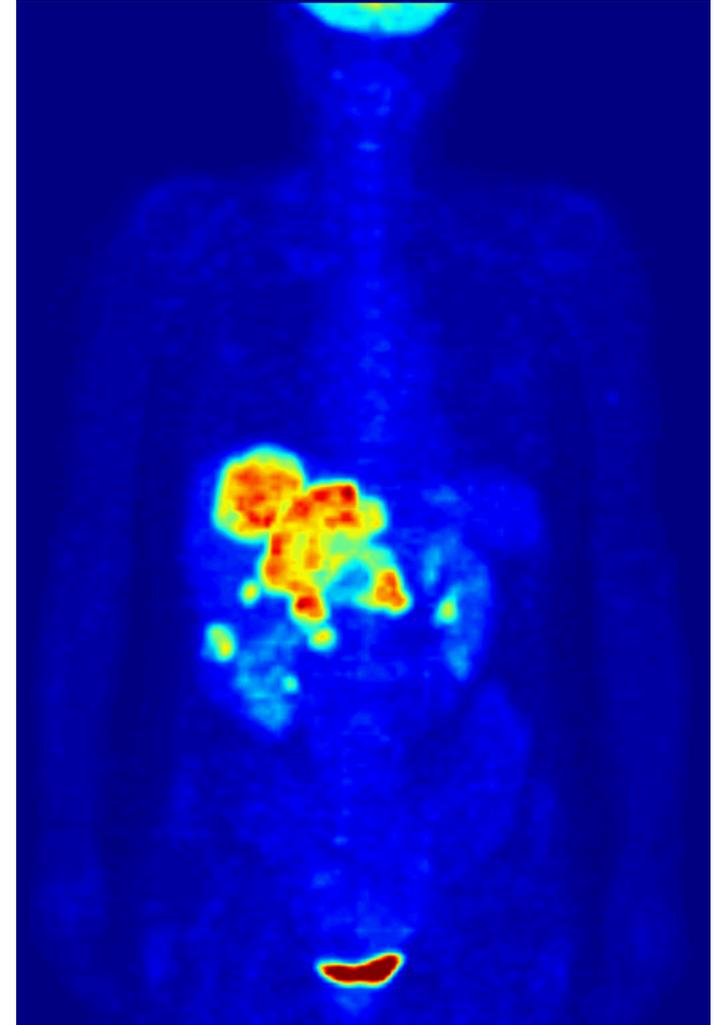
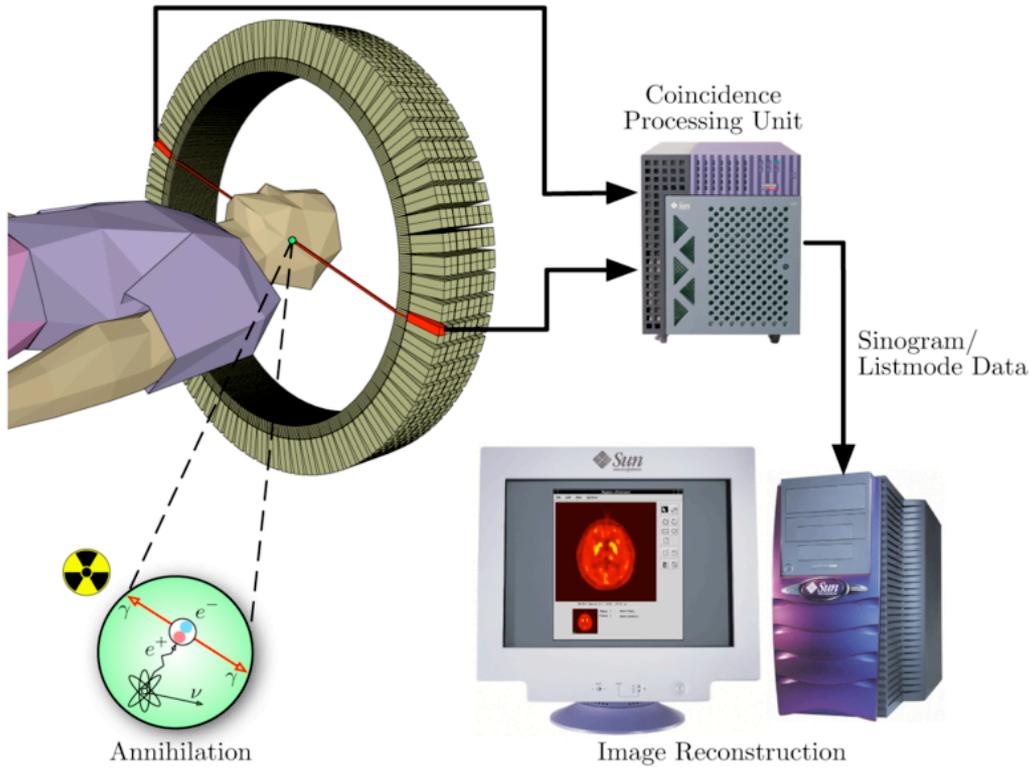
- A pessoa ingere um composto radioativo ('traçador') que se acumula preferencialmente em certos tecidos.
- Após o traçador sofrer decaimento β^+ , o pósitron e^+ produzido se aniquila com um elétron do corpo, produzindo um sinal característico de 2 raios- γ .



- Detectando os raios em coincidência, determina-se o ponto de origem

OBS: não confundir com tomografia computadorizada, que é baseada em raios-X

Tomografia por emissão de pósitrons



ENERGIA NUCLEAR

ENERGIA EXTRAÍDA DE 1 kg DE MATÉRIA

$$Q = mc^2$$

Tabela 43-1

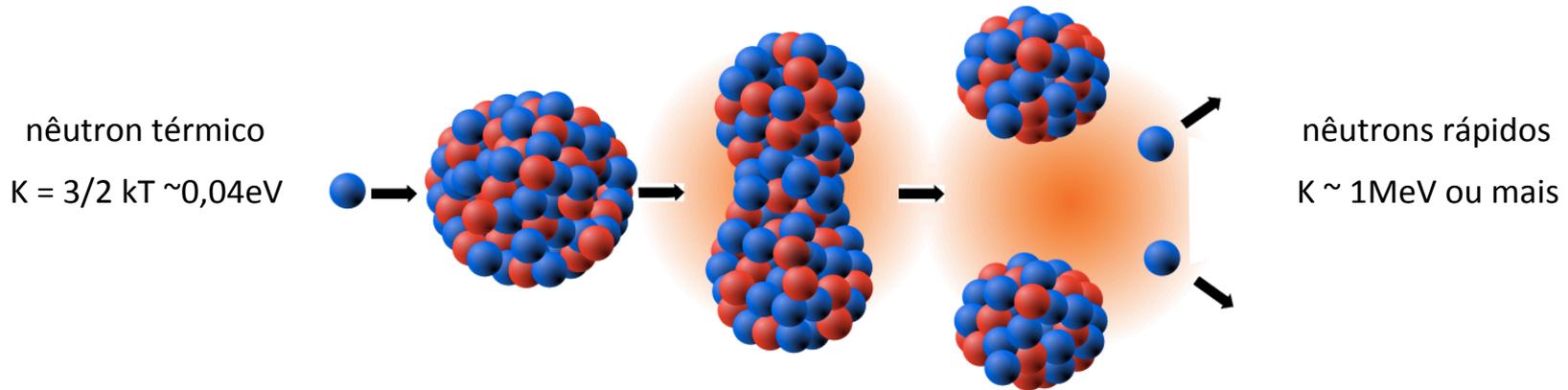
Energia Liberada por 1 kg de Matéria

Forma de Matéria	Processo	Tempo ^a
Água	Queda d'água de 50 m	5 s
Carvão	Combustão	8 h
UO ₂ Enriquecido	Fissão em um reator	690 anos
²³⁵ U	Fissão total	3×10^4 anos
Deutério	Fusão total	3×10^4 anos
Matéria e antimatéria	Aniquilação total	3×10^7 anos

^aEsta coluna mostra o tempo durante o qual a energia gerada manteria acesa uma lâmpada de 100 W.



Fissão Nuclear



Como os núcleos produzidos na fissão têm excesso de nêutrons, sofrem em seguida uma série de decaimentos (em geral β^-), p. ex:

	^{140}Xe	\rightarrow	^{140}Cs	\rightarrow	^{140}Ba	\rightarrow	^{140}La	\rightarrow	^{140}Ce		^{94}Sr	\rightarrow	^{94}Y	\rightarrow	^{94}Zr	
$T_{1/2}$	14 s		64 s		13 d		40 h		Estável		$T_{1/2}$	75 s		19 min		Estável
Z	54		55		56		57		58		Z	38		39		40



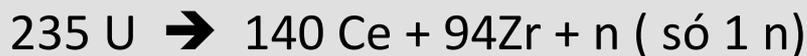
Ex. 43.1 - Determine a energia de desintegração para o evento de fissão acima (considerar o produto final ^{140}Ce e ^{94}Zr). As massas são:

^{235}U	235,0439 u	^{140}Ce	139,9054 u
n	1,008 66 u	^{94}Zr	93,9063 u

R: 208 MeV (7% da energia é “perdida” com emissão de neutrinos (ou antineutrinos))

Q= energia de desintegração = energia de repouso convertida em energia cinética dos produtos do decaimento

$$Q = -\Delta mc^2$$



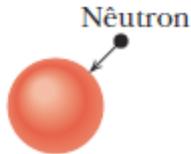
$$\Delta m = (139,905 \text{ u} + 93,9063 \text{ u} + 1,00866 \text{ u}) - (235,0439) \text{ u}$$

Q = 208 MeV gera aumento da energia cinética do corpo e portanto aumento de temperatura



Fissão Nuclear – modelo de ‘gota’

O ^{235}U absorve um nêutron térmico (de baixa energia cinética) e se torna ^{236}U .



(a)

Parte da massa se transforma em energia, que faz o núcleo oscilar.



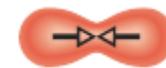
(b)

As oscilações produzem um pescoço; os prótons possuem carga positiva e se repelem mutuamente.



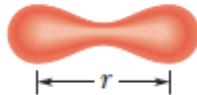
(c)

Ao mesmo tempo, prótons e nêutrons se atraem mutuamente pela interação nuclear.



(d)

A interação nuclear diminui rapidamente com a distância.



(e)

A repulsão elétrica prevalece e o núcleo se divide em duas partes.



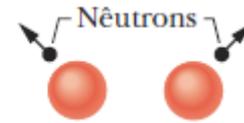
(f)

Como a massa das partes é menor que a massa inicial, a fissão libera energia.



(g)

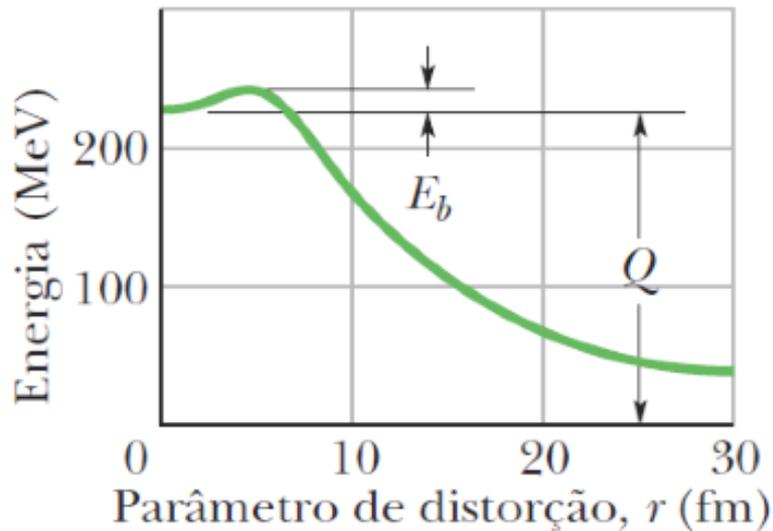
Os fragmentos possuem um excesso de nêutrons, que são ejetados.



(h)

Fissão Nuclear - modelo

A atração dos núcleons cria uma barreira de potencial de altura E_b para a fissão. Se um nêutron incidente tiver energia E_n suficiente para vencer ou tunelar por essa barreira, a fissão ocorre



REATOR NUCLEAR (FISSÃO)

Reação em cadeia controlada (reator nuclear)

Reação em cadeia não controlada (bomba atômica)

Urânio natural contém 0,7% de ^{235}U o restante de ^{238}U .

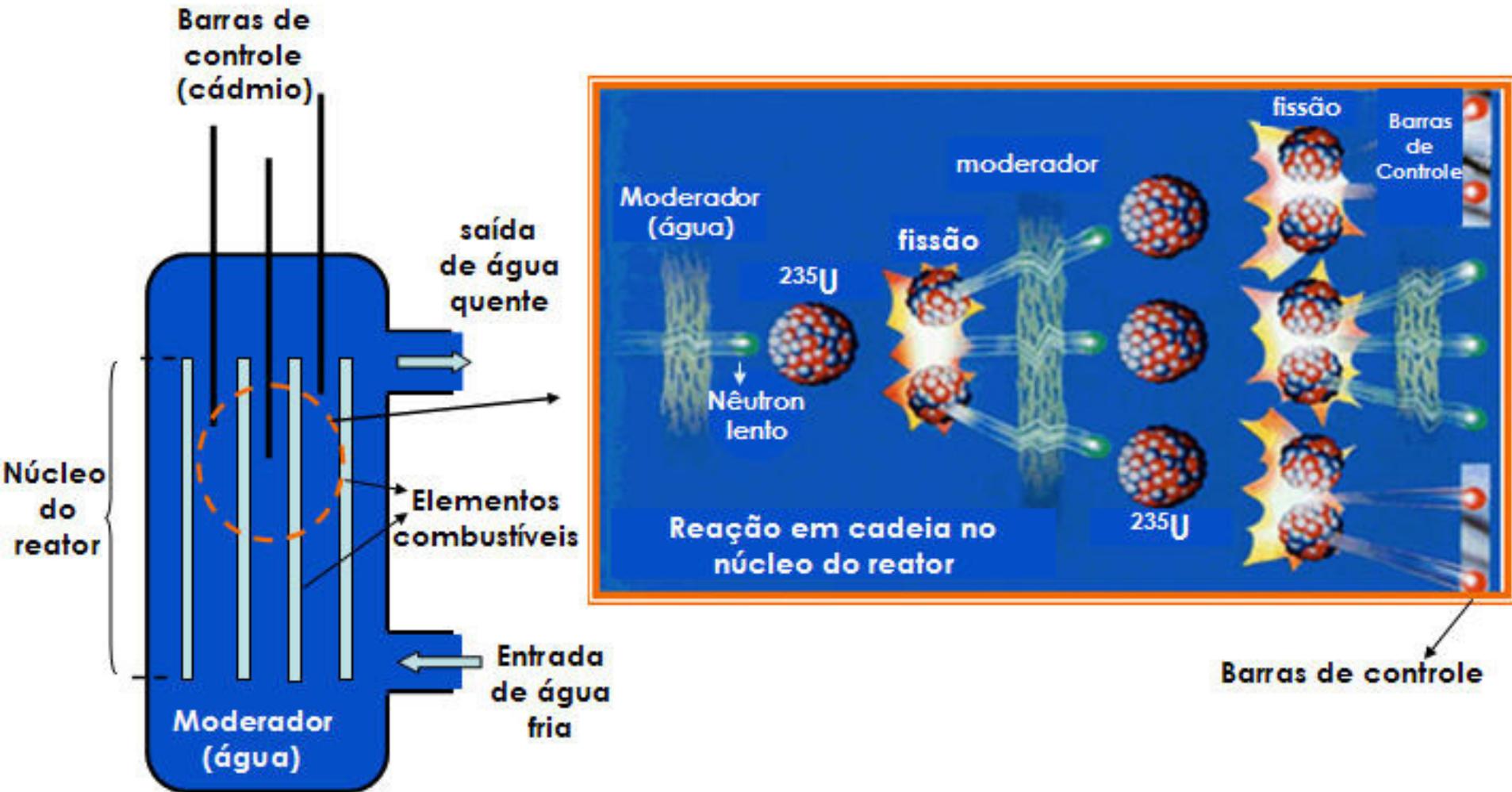
Aumentar a % de ^{235}U , enriquecimento de urânio até chegar a 3%.

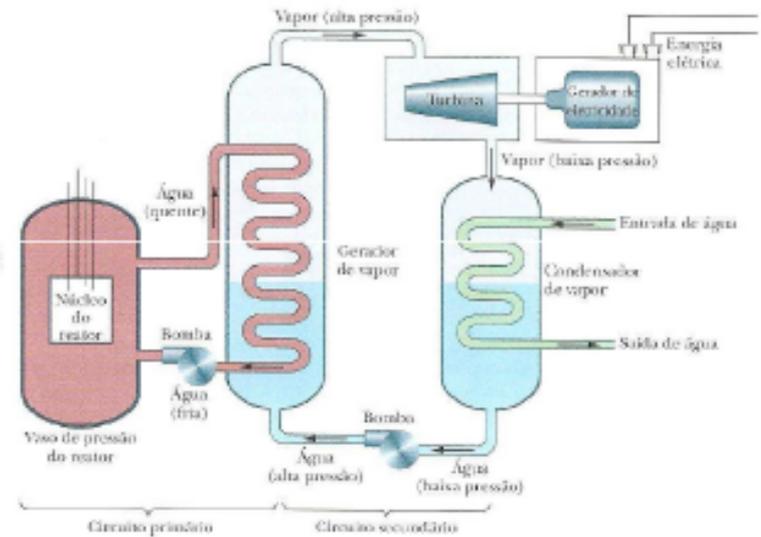
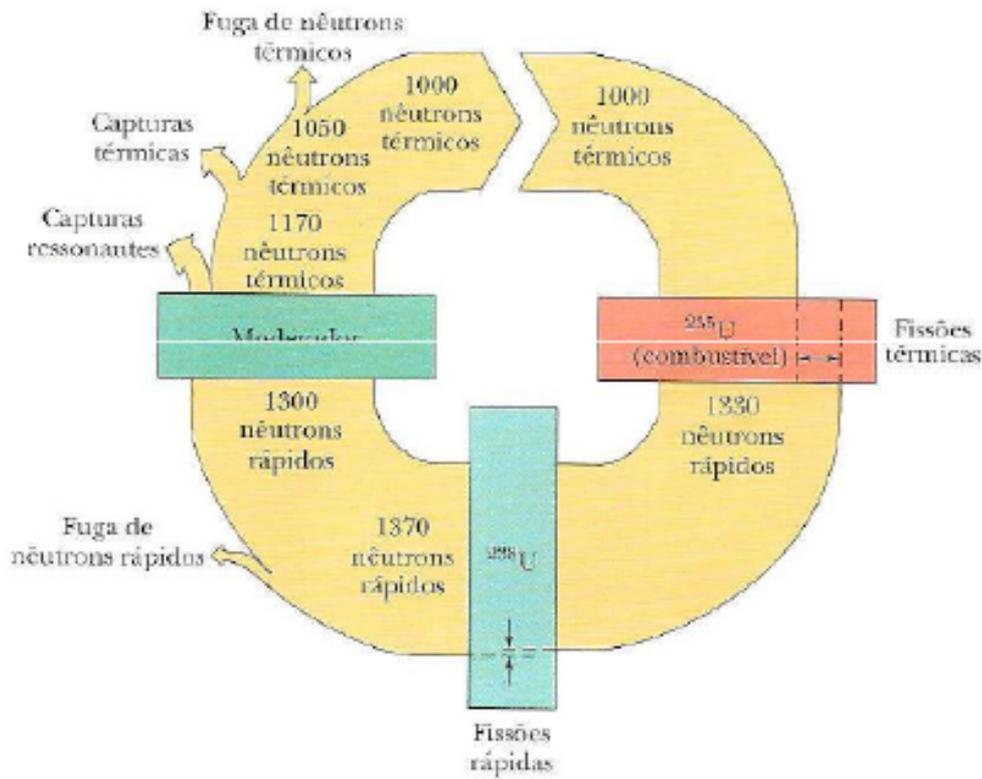
Problemas:

- 1) Fuga de nêutrons – aumenta-se a razão superfície volume.
- 2) Energia dos nêutrons – nêutrons ejetados tem energia de 2 MeV, necessita-se de um moderador (diminuir a energia de n sem absorve-lo). O mais utilizado é H_2O (colisão nêutron – próton).
- 3) Captura do nêutron - entre 1 e 100 eV existe uma grande probabilidade de ^{238}U absorver o nêutron (captura ressonante-emite um raio γ – remove o n da reação)

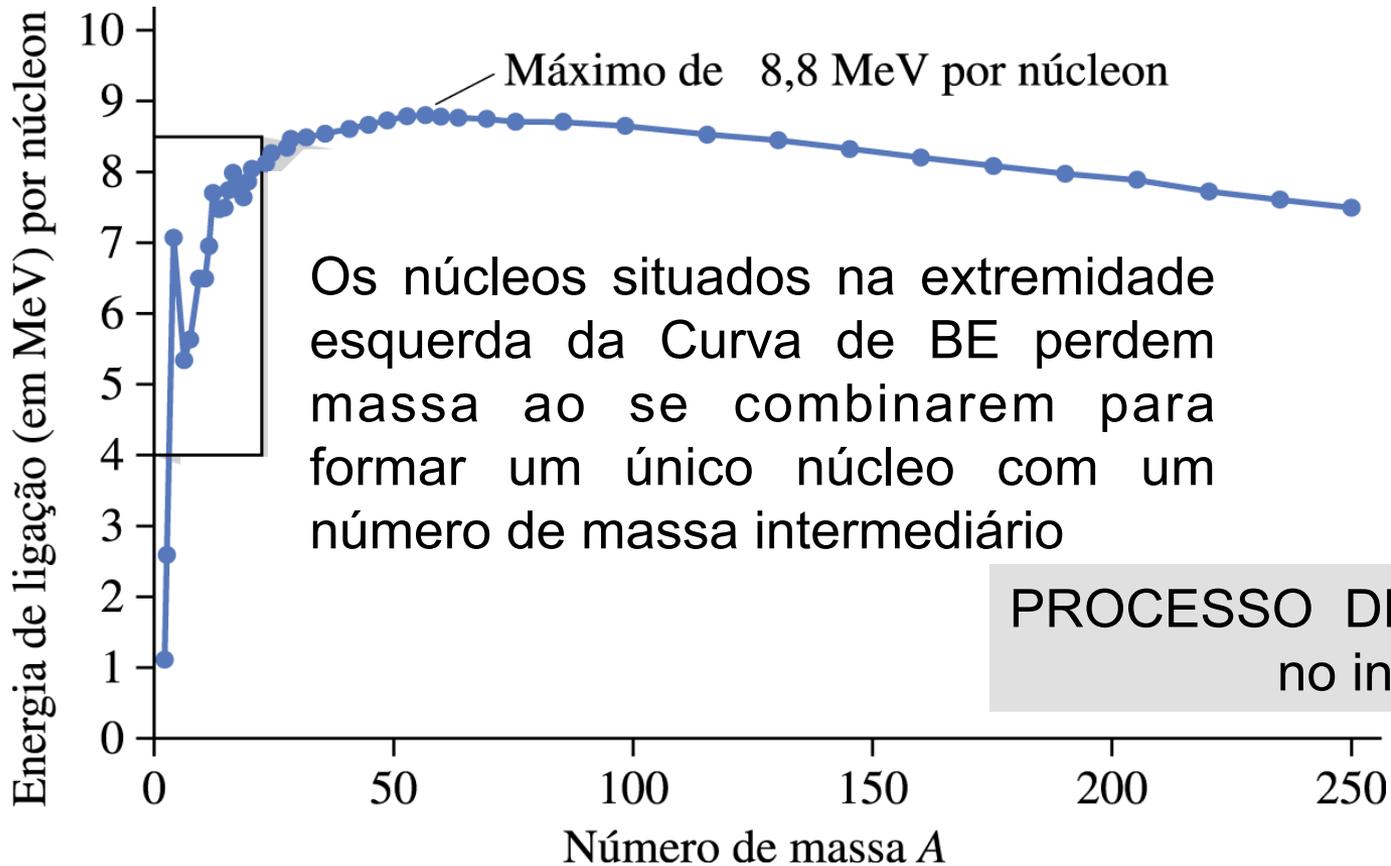


REATOR NUCLEAR (FISSÃO)





FUSÃO TERMONUCLEAR



FUSÃO TERMONUCLEAR

Condições normais: processo impedido devido a repulsão Coulombiana (2 partículas de mesma carga) – impede que os núcleos se aproximem o suficiente para que a Interação forte predomine – promovendo a fusão

Falamos que existe uma barreira de potencial que tem que ser vencida (no caso de 2 prótons a barreira =400keV)

Forma de dar energia para que os núcleos vençam a barreira de potencial – TEMPERATURA – agitação térmica – FUSÃO TERMONUCLEAR

$$K = kT$$

T no centro do Sol = $1,5 \times 10^7$ K a temperatura é de 1,3 keV

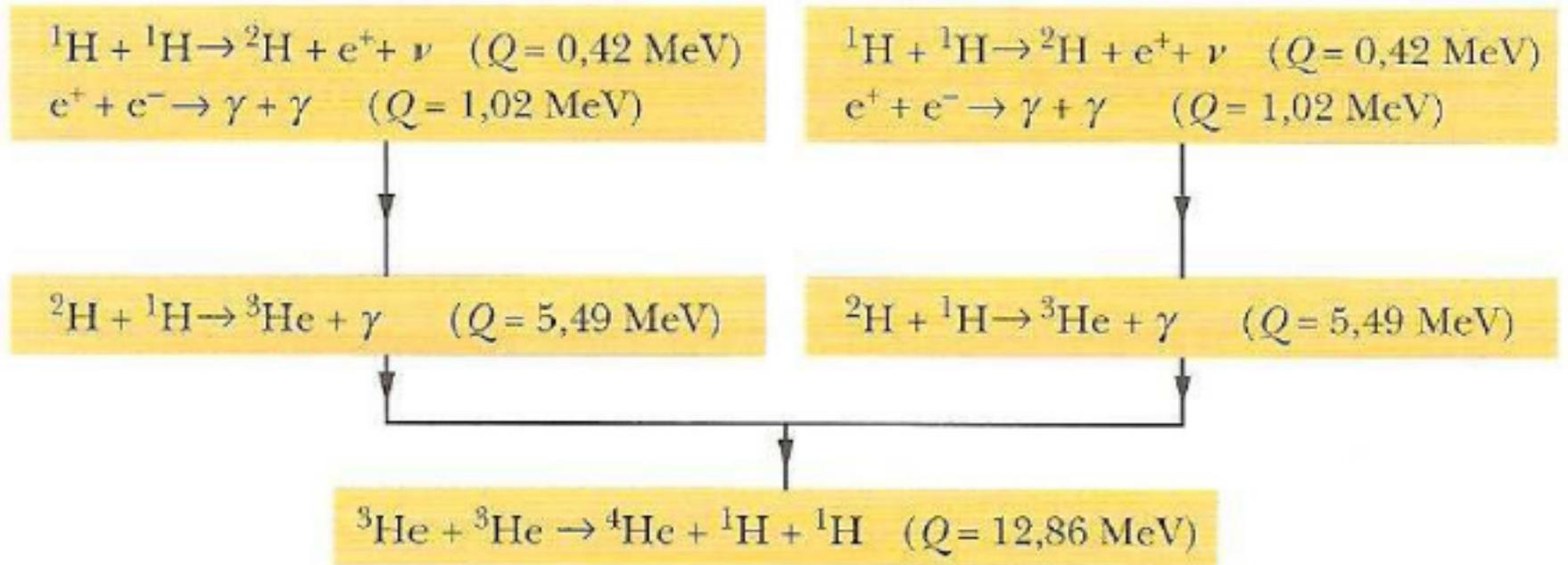
Fusão nuclear ocorre no centro do sol e de qq estrela – processo mais importante da geração de energia

$$P \text{ de irradiação do sol} = 3.9 \times 10^{26} \text{ w}$$



FUSÃO TERMONUCLEAR (o sol)

CICLO PRÓTON- PRÓTON – pp o H é o combustível



Energia liberada pela FUSÃO: 26,7 MeV – incorporada ao sol na forma de energia térmica – irradiada para o espaço – ondas eletromagnéticas

1. **EVENTO RARO:** Uma em cada 10^{26} colisões acontece a fusão pp - 10^{12} kg/s
2. 10^5 anos = tempo para que ${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$ se encontrem e se fundam



FUSÃO TERMONUCLEAR (o sol)

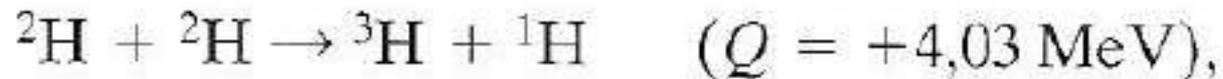
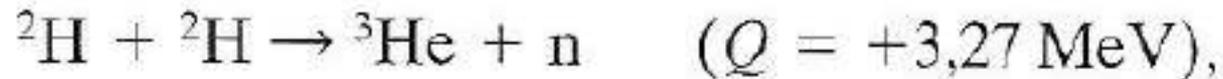
SOL = Gigante Vermelha



3. A queima de H - ocorre cerca de 5 bilhões de anos. Acabando o H, o sol começará a se esfriar e encolher (própria gravidade), aquecendo e expandindo as camadas externas (gigante vermelha)
4. Quando acabar o H, e se a T do sol voltar a ser da ordem de 108K, o processo de fusão recomeçará mas será de ^4H para formar carbono



FUSÃO TERMONUCLEAR CONTROLADA



Condições necessárias:

- 1) Alta concentração de partículas, para que colisões/s seja grande.
- 2) Alta temperatura do plasma $T = 10^9 \text{ K}$.
- 3) Longo tempo de confinamento.
- 4) $n\tau > 10^{20} \text{ s/m}^3$ (critério de Lawson, para que produza mais energia do que a consumida).



REATOR NUCLEAR (FISSÃO)



Acidente de Chernobyl (1986)

Até agora 56 mortes.

47 trabalhadores e 9 crianças
com câncer.

Erro na inserção das barras de
controle.

