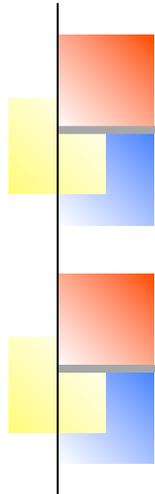


INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Física IV



Cap 43 – Física Nuclear

Prof. Daniel Jonathan

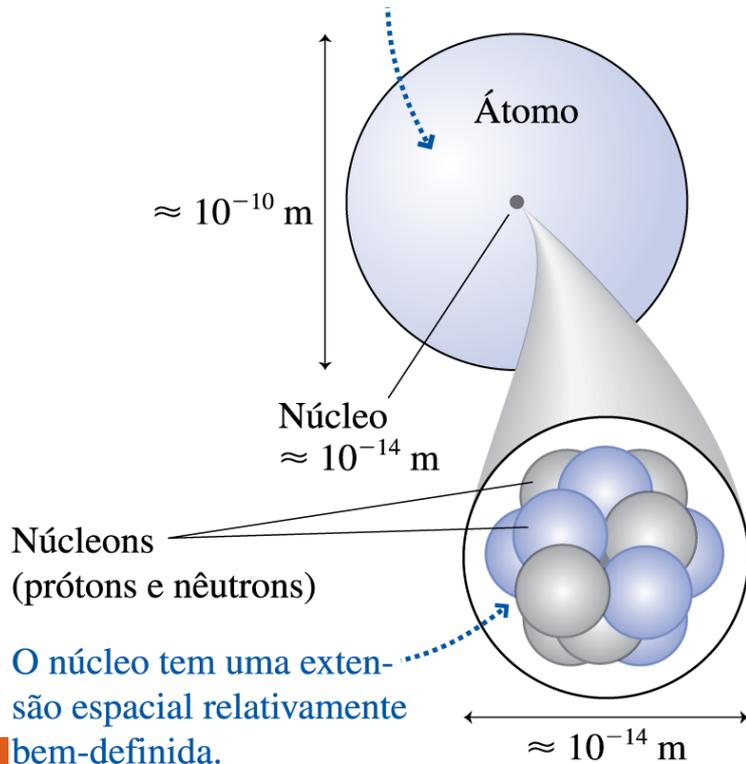
Niterói, Novembro 2014

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.

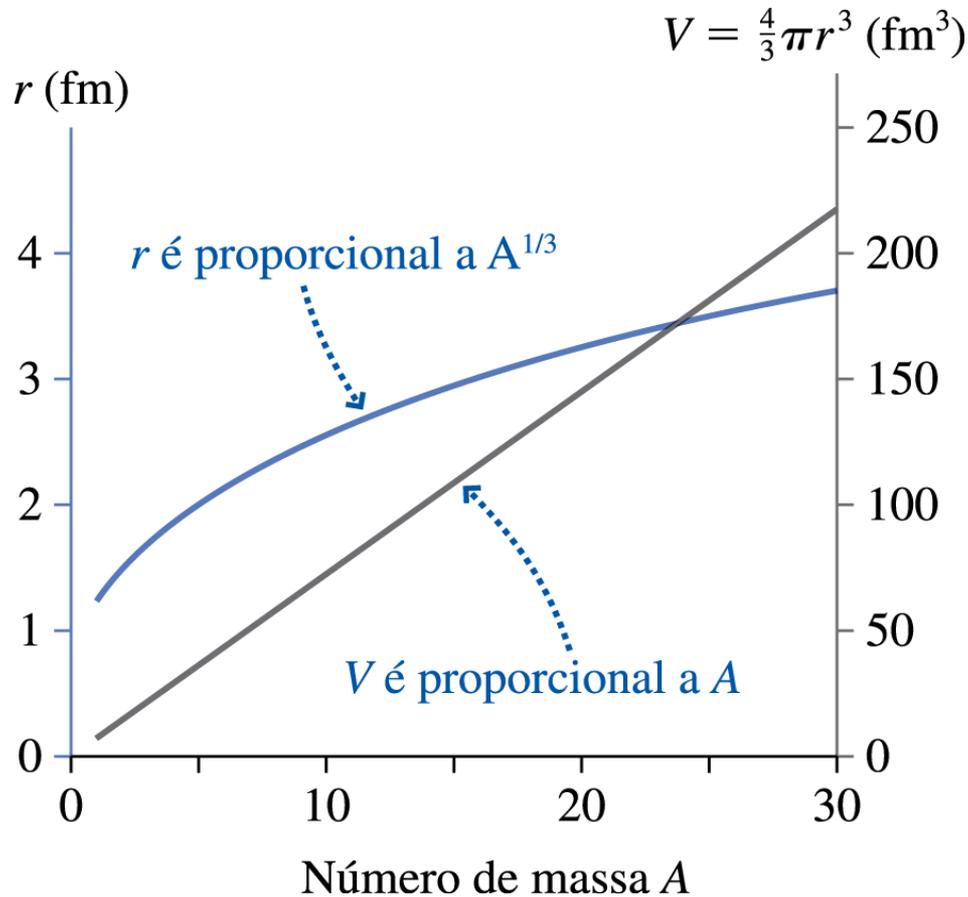
- *Número de massa* (A) = Número de prótons (Z) mais o de nêutrons (N)
 $A = Z + N$

- *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)

Tamanho Nuclear

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

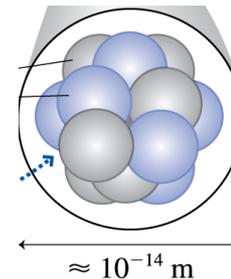


Implicações:

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*



Massas de núcleons e massa atômica

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

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

$$\bullet 1 u = 931,49 \text{ MeV}/c^2 \quad \text{Atenção para o n}^\circ \text{ de casas decimais de precisão!}$$

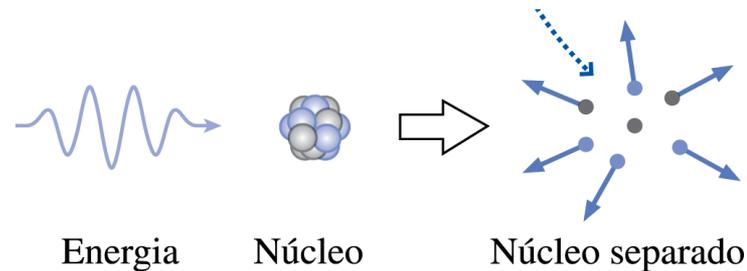
• A massa atômica de um elemento na tabela periódica é a *média ponderada* das massas de todos os isótopos que ocorrem naturalmente.

• 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	
		Massa (u)	(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) !

Energia de Ligação

Energia necessária para separar o núcleo em núcleons individuais.



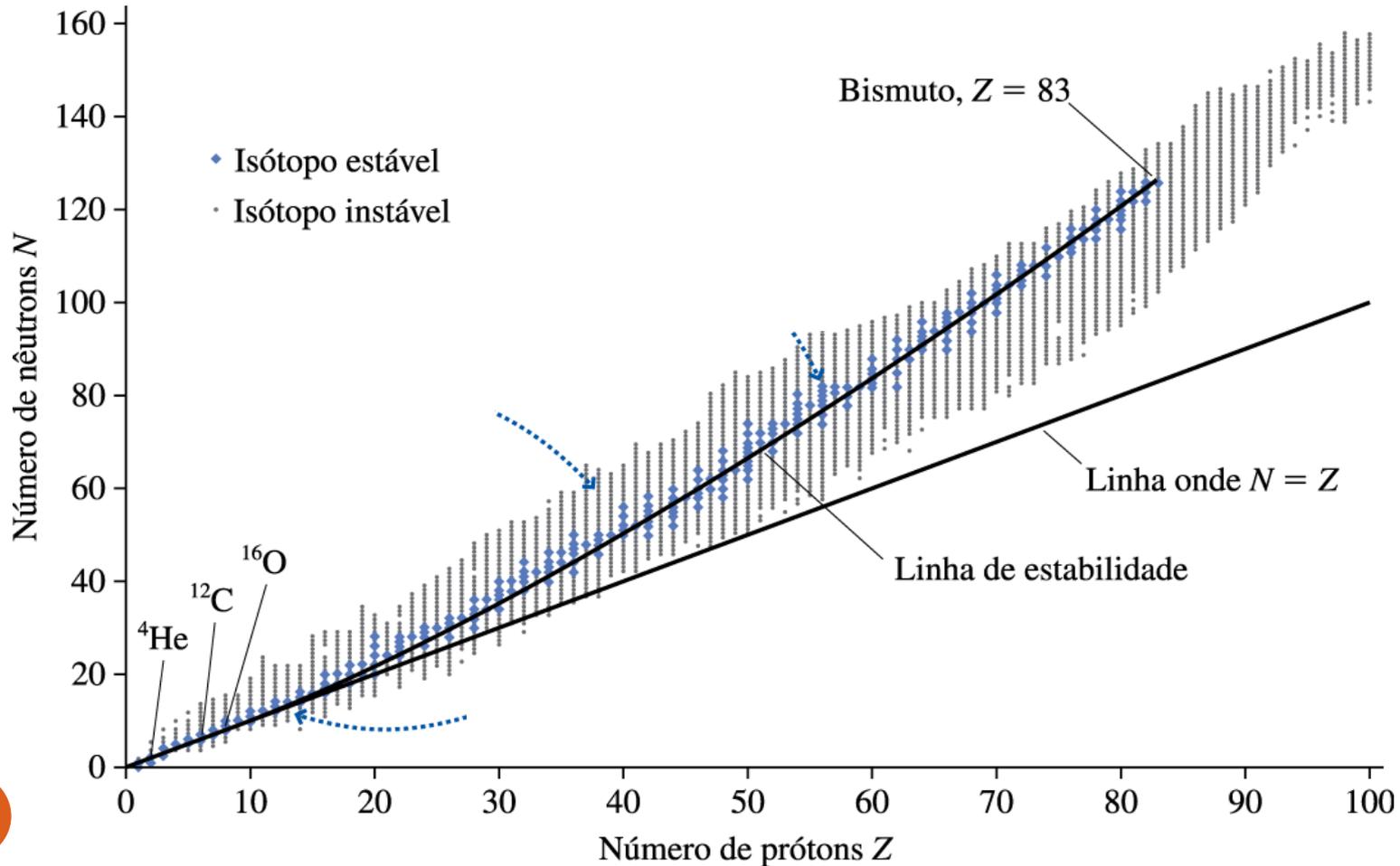
$$B + m_{\text{nuc}}c^2 = (Zm_p + Nm_n)c^2$$

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

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) !

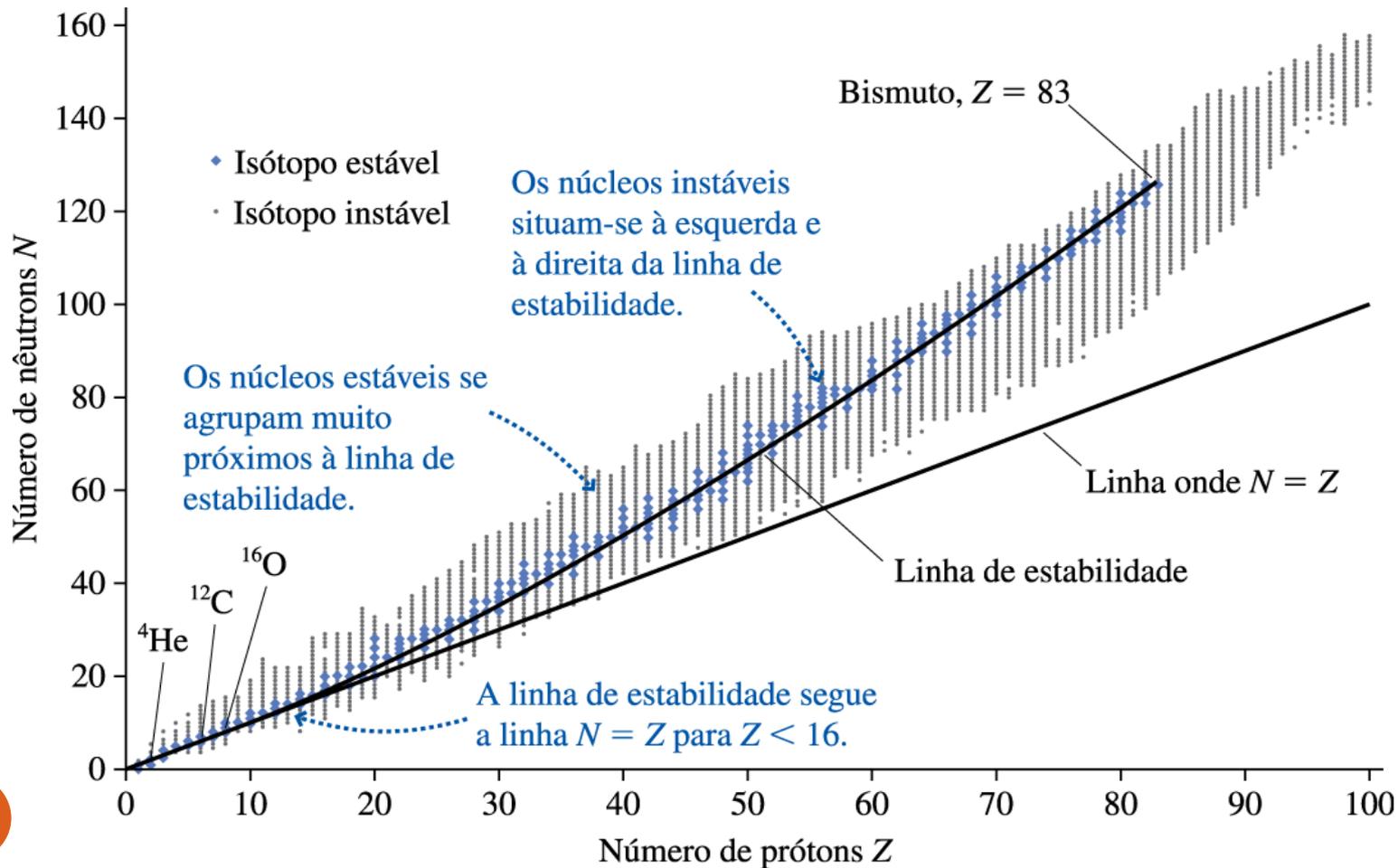
Estabilidade Nuclear

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



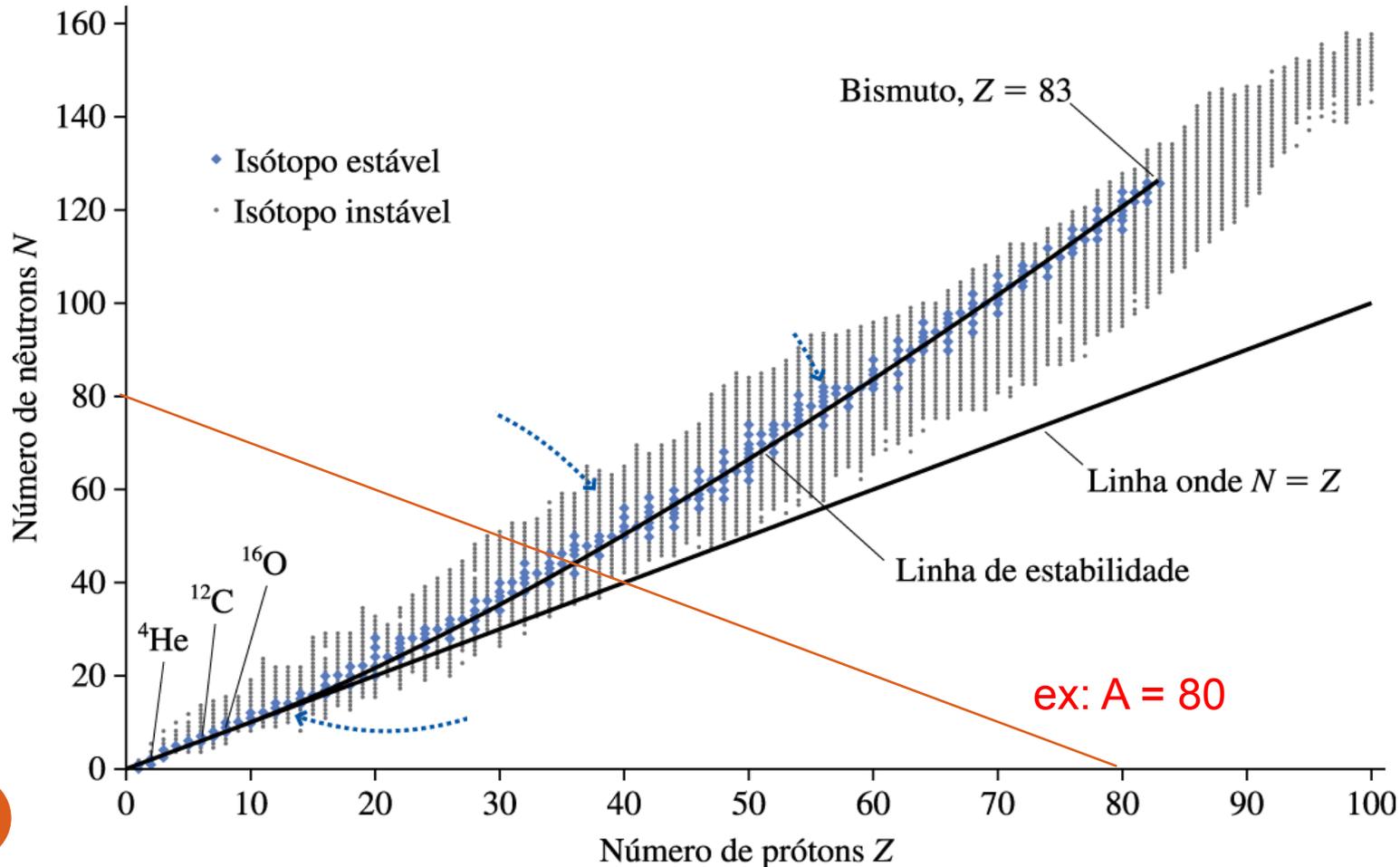
Estabilidade Nuclear

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



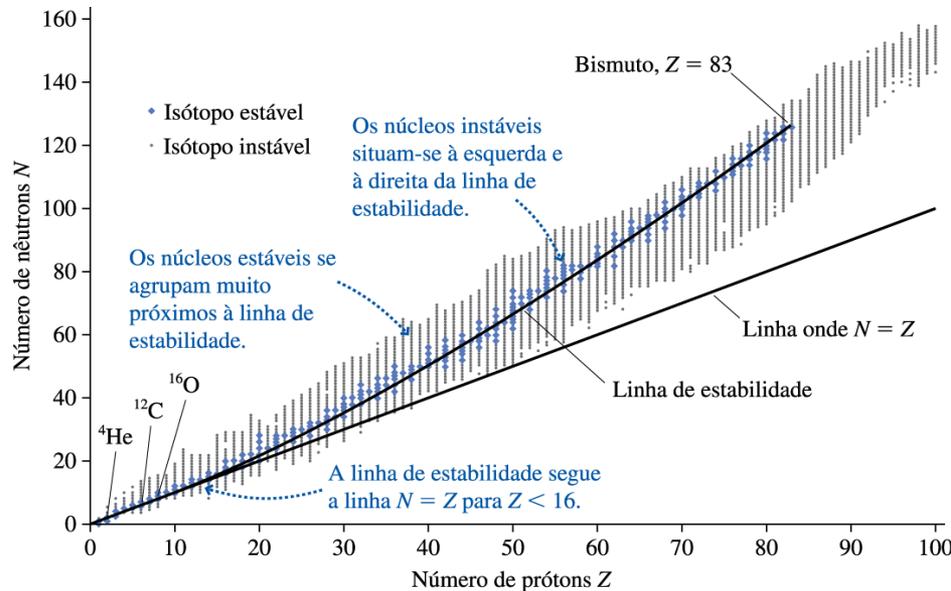
Estabilidade Nuclear

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!)

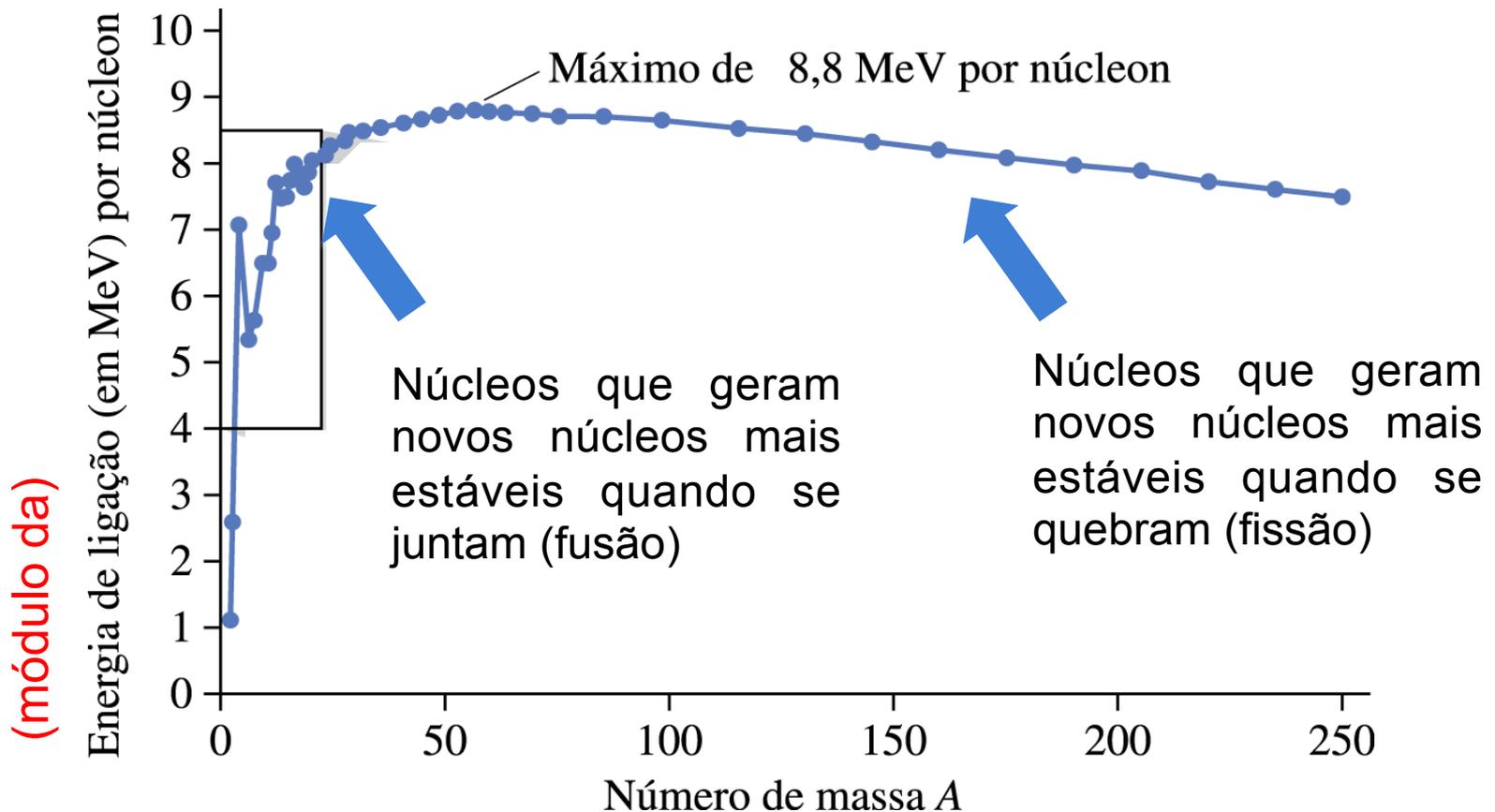


- Núcleos estáveis estão próximos à linha de estabilidade.
- Núcleos instáveis estão agrupados em bandas situadas à esquerda e à direita da linha de estabilidade.
- Os elementos mais leves, com $Z < 16$, são estáveis quando $N \cong Z$.

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

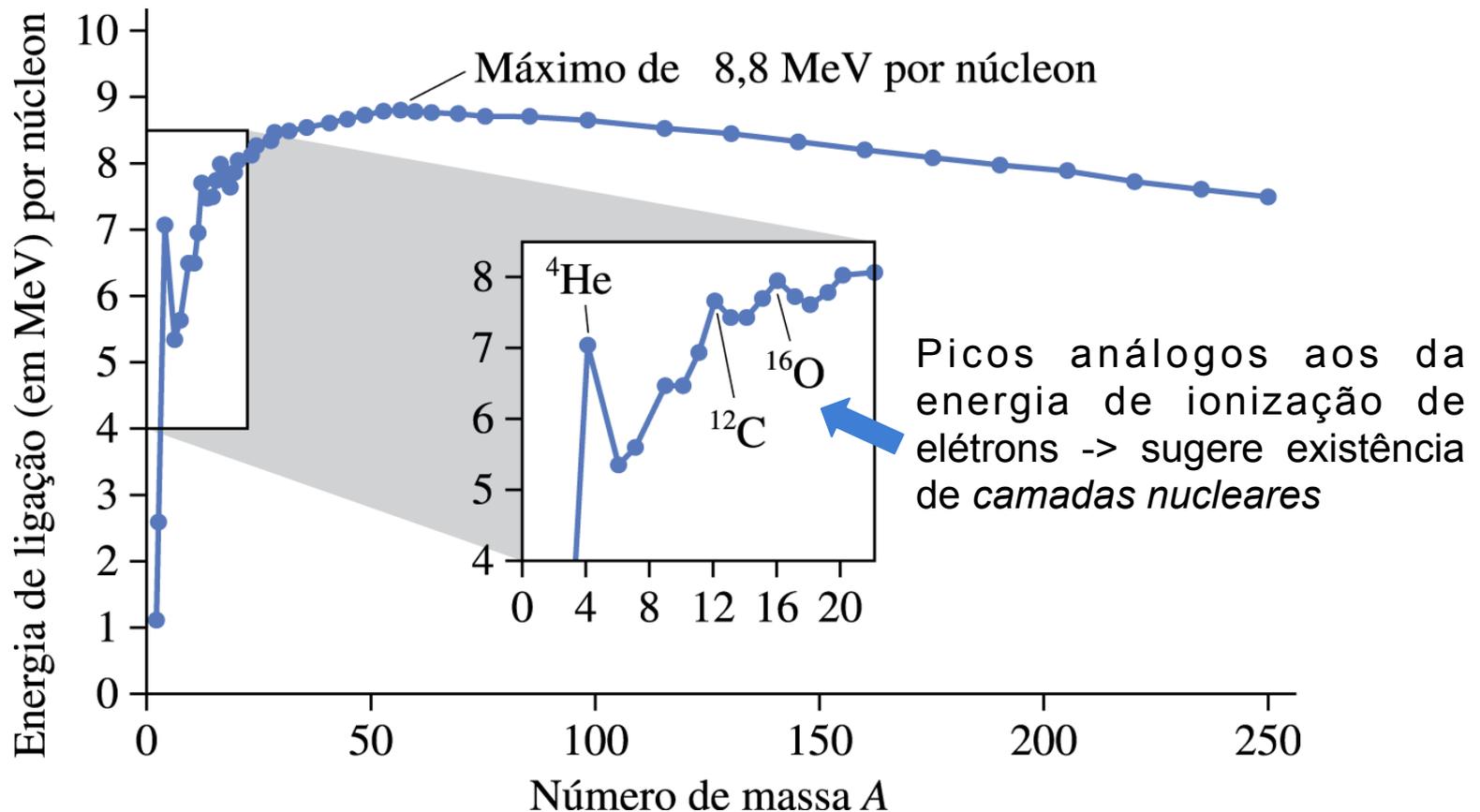
A Curva de Energia de Ligação

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



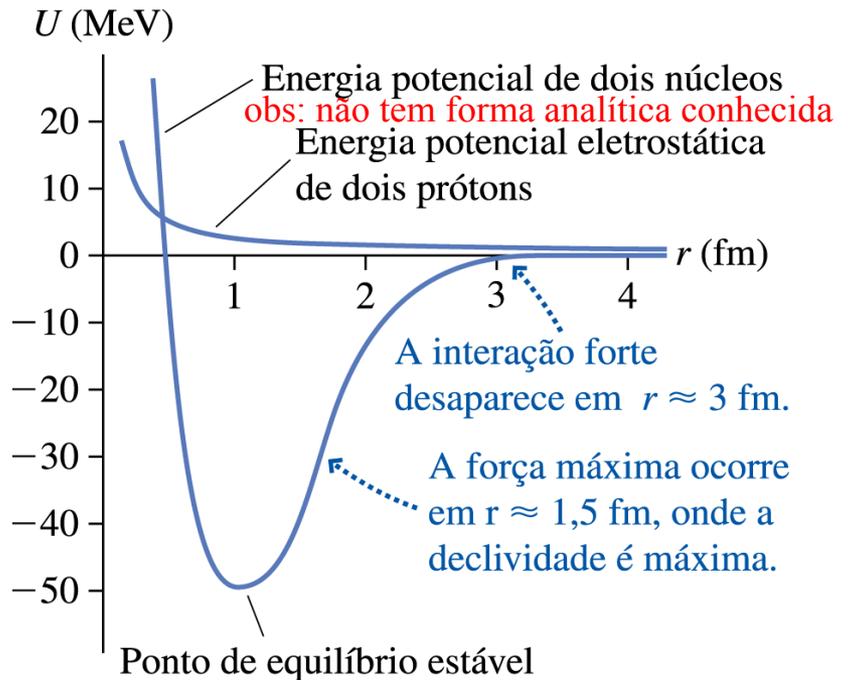
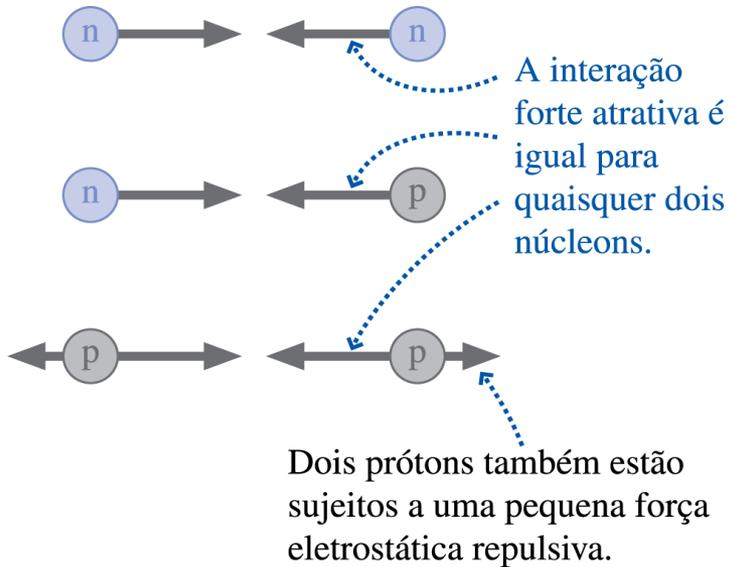
A Curva de Energia de Ligação

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? **R: Interação FORTE**



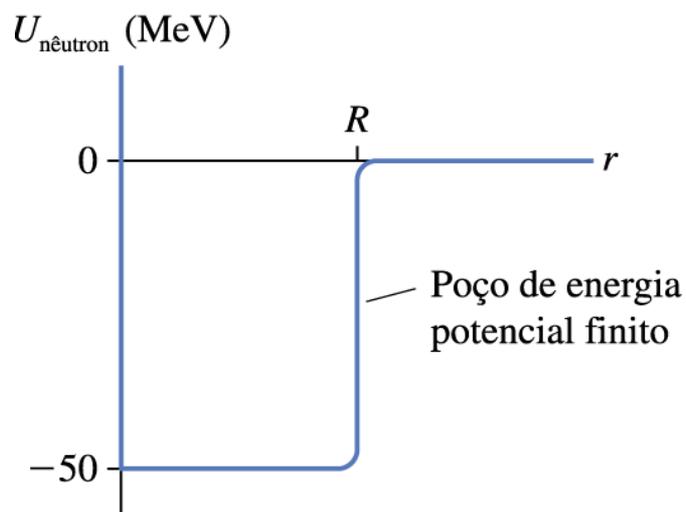
- Força atrativa entre núcleons
- Não é exercida sobre os elétrons.
- Força de curto alcance exercida em distâncias nucleares (alguns fm).

- 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 !**

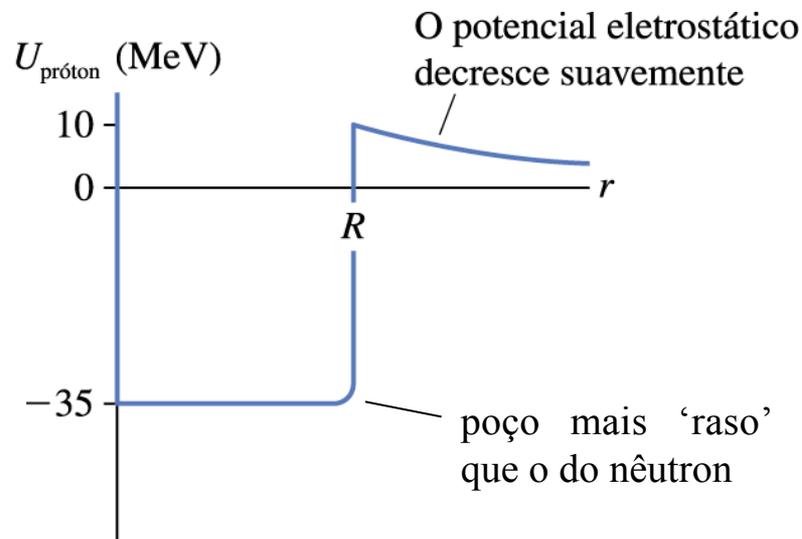
Modelo de camadas

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

Poços de Potencial do Nêutron e do Próton



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



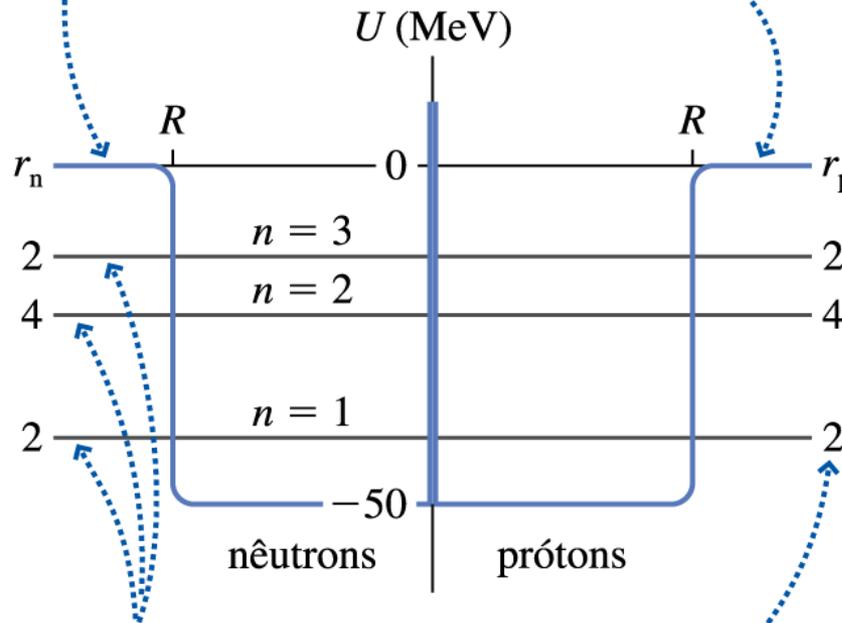
A energia potencial média de um próton se deve à interação forte e à força elétrica. Essa profundidade do poço de potencial é para $Z \approx 30$.

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

Modelo de camadas: 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.



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

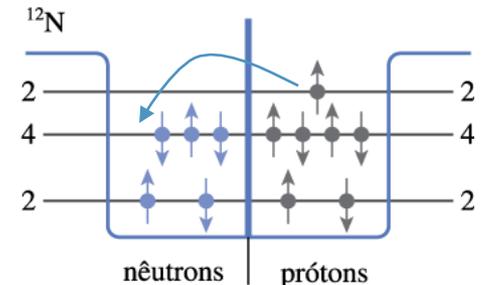
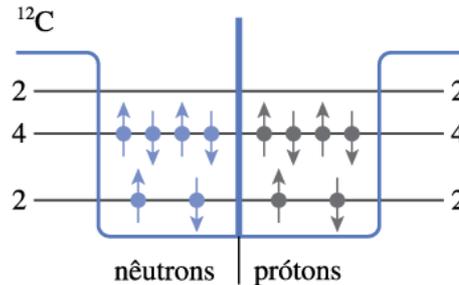
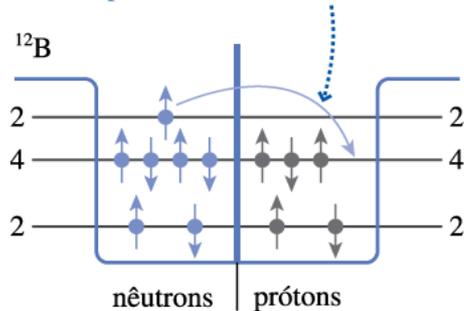
Estes são os três primeiros níveis de energia permitidos. Eles estão separados por muitos MeV.

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

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: 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^+

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

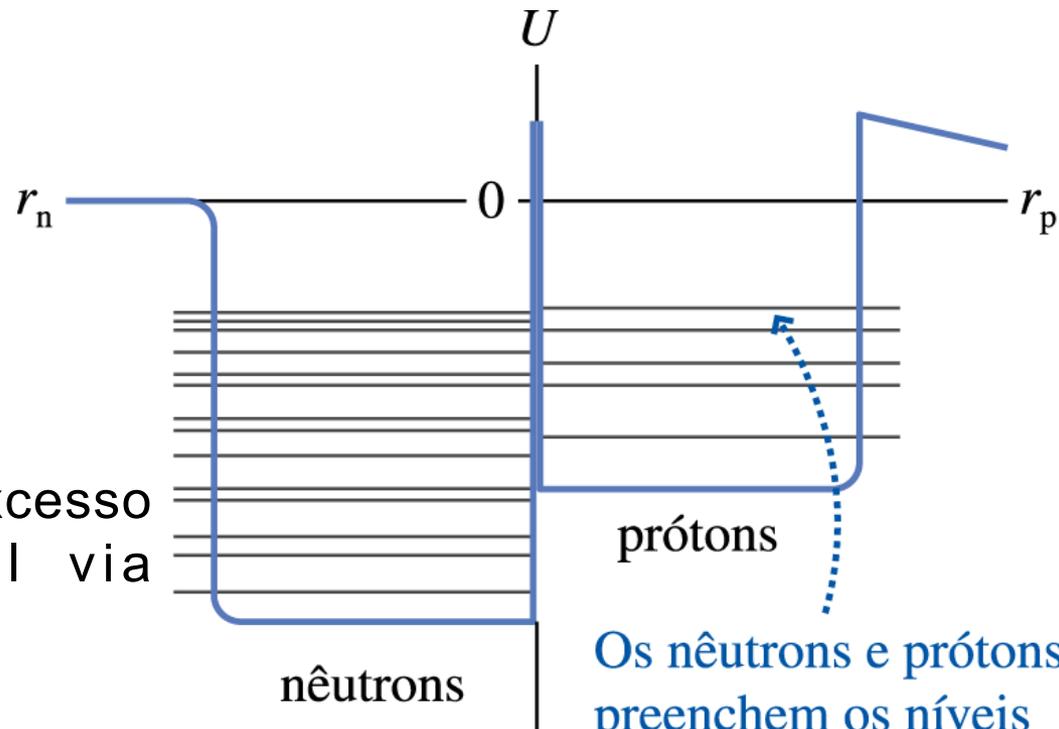
Modelo de camadas: Z Alto

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.



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

Radiação e Radioatividade

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

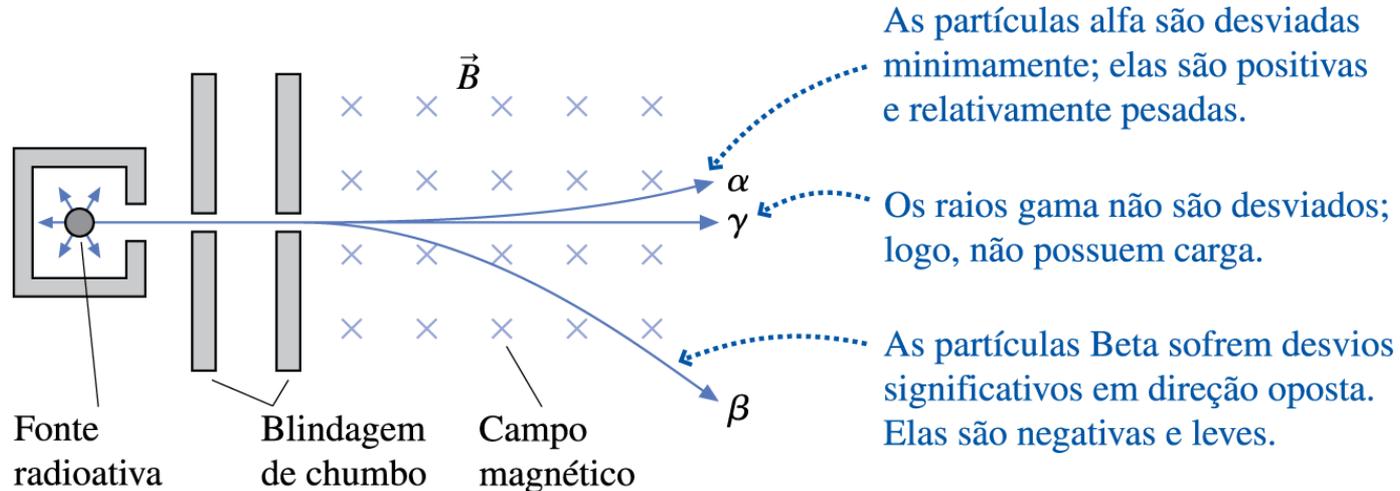
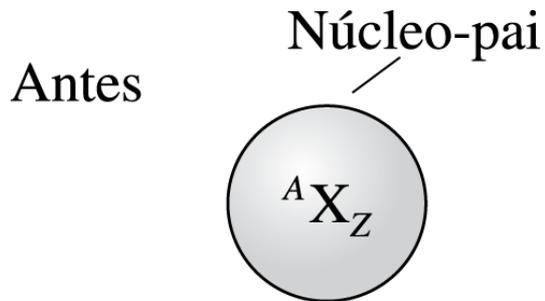


TABELA 43.3 Os três tipos de radiação

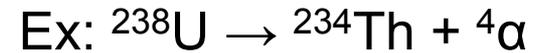
Radiação	Identificação	Carga	Blindada por
Alfa, α	Núcleo de ${}^4\text{He}$	$+2e$	Folha de papel
Beta, β	Elétron	$-e$	Folha de alumínio de alguns mm
Gama, γ	Fóton de alta energia	0	Muitos cm de chumbo

Decaimento alfa (α)

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



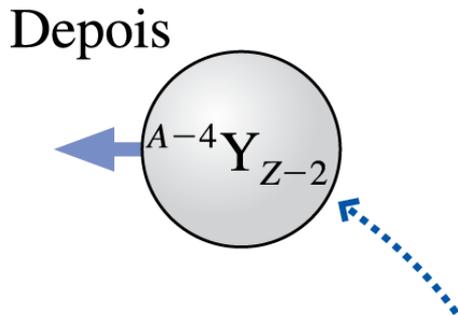
A partícula alfa, um núcleo rápido de hélio, leva consigo a maior parte da energia liberada durante o decaimento.



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

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

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



O núcleo-filho, com dois prótons e quatro núcleons a menos, pouco recua.

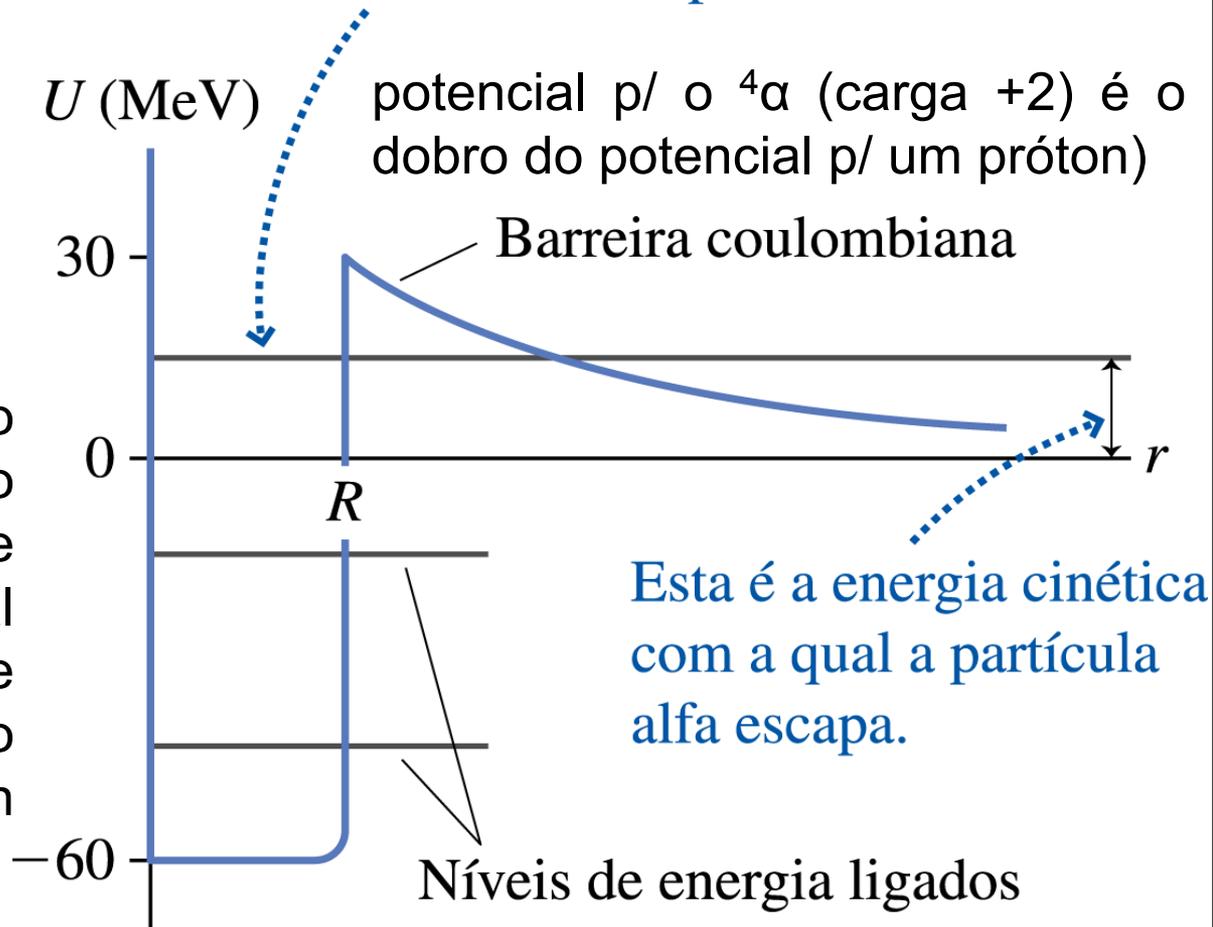
$$\begin{aligned} \Delta E &= (m_{\text{U}} - m_{\text{Th}} - m_{\text{He}})c^2 \\ &= 0,0046\text{u} = 4,3\text{MeV} \sim K_{\alpha} \end{aligned}$$

Decaimento alfa (α)

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

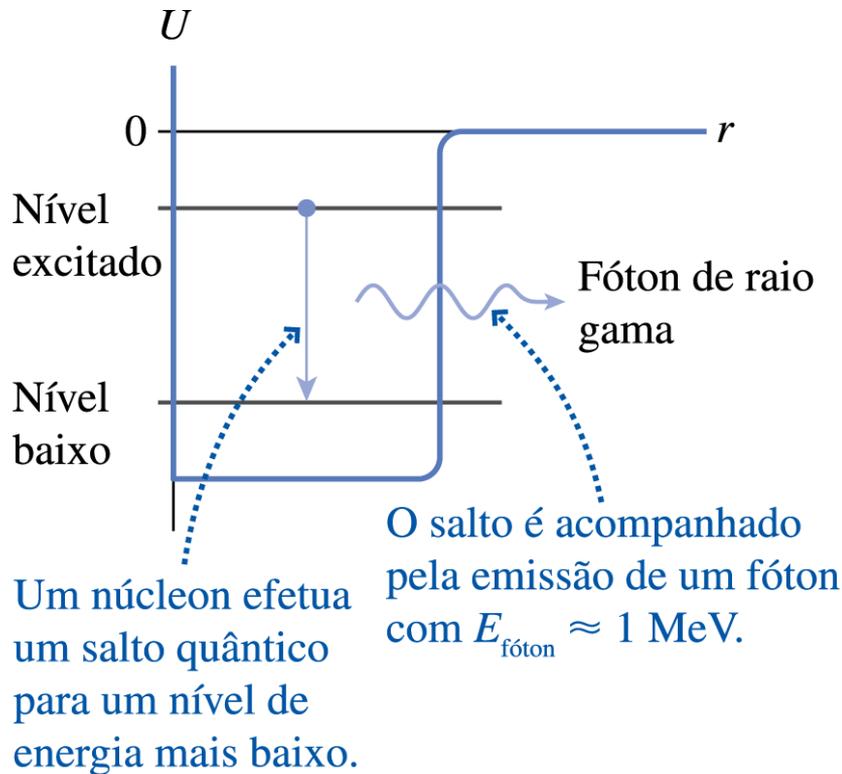
Mecanismo: **tunelamento** através da barreira Coulombiana

Os núcleos de Hélio são fortemente ligados (v. pico na curva de energia de ligação), então é em geral mais energeticamente favorável emitir um núcleo inteiro do que um próton sozinho!

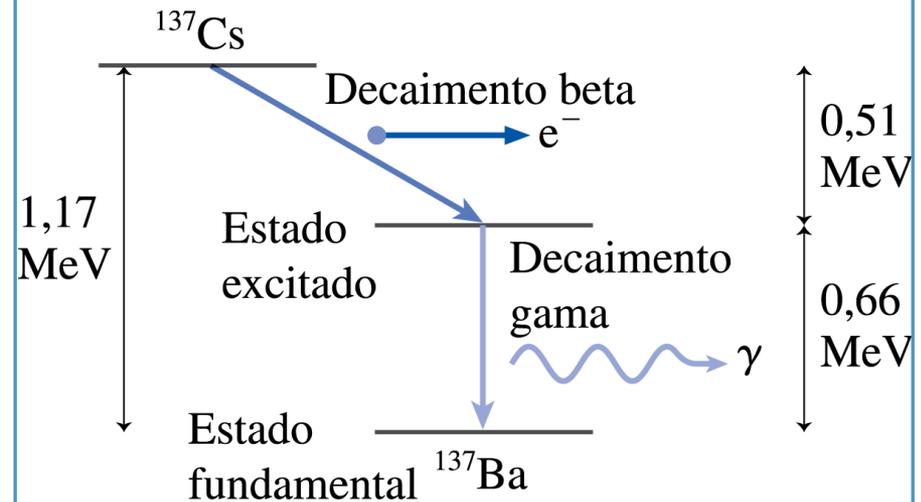


Decaimento Gama (γ)

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



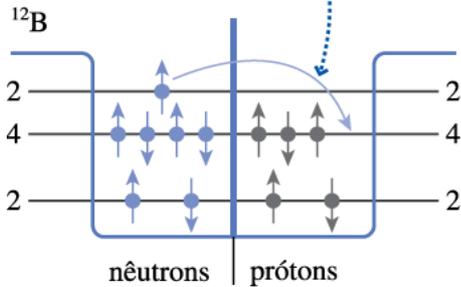
Em geral ocorre logo após um decaimento α ou β que deixa o núcleo 'filho' num estado excitado



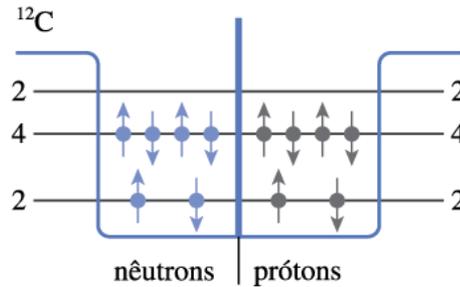
Decaimento Beta (β)

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

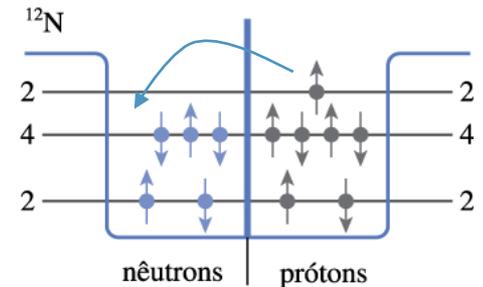
e pode! Decaimento Beta



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

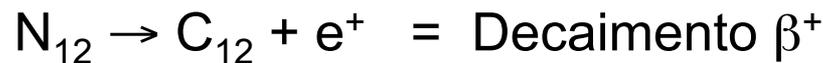
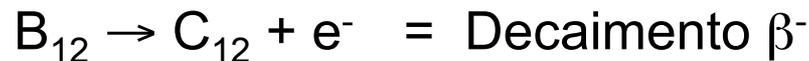


$$m_{\text{C}_{12}} = 12.0000 \text{ u}$$

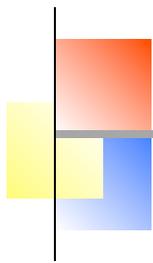


$$m_{\text{N}_{12}} = 12.01861 \text{ u}$$

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)



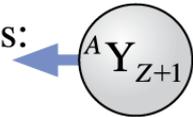
(a) Decaimento beta-menos

Antes:



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

Depois:



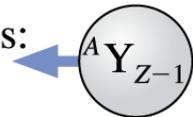
(b) Decaimento beta-mais

Antes:



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

Depois:



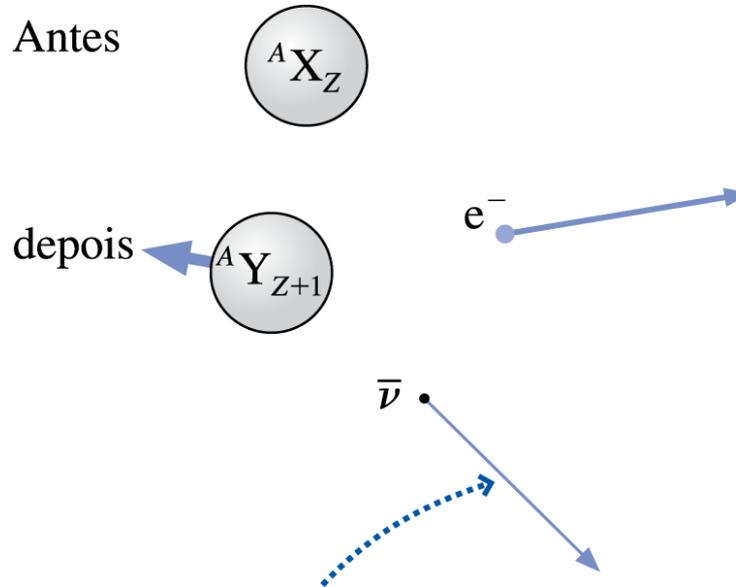
Partícula	Símbolo	Massa (u)	Massa (MeV/c^2)
Elétron	e	0,00055	0,51
Próton	p	1,00728	938,28
Nêutron	n	1,00866	939,57

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

- 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 e a força nuclear fraca

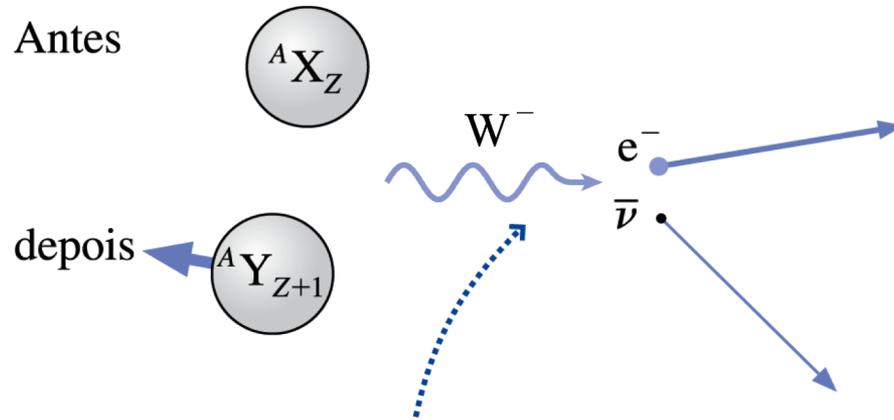
Na realidade é mais complicado....



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.

Decaimento β e a força nuclear fraca

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

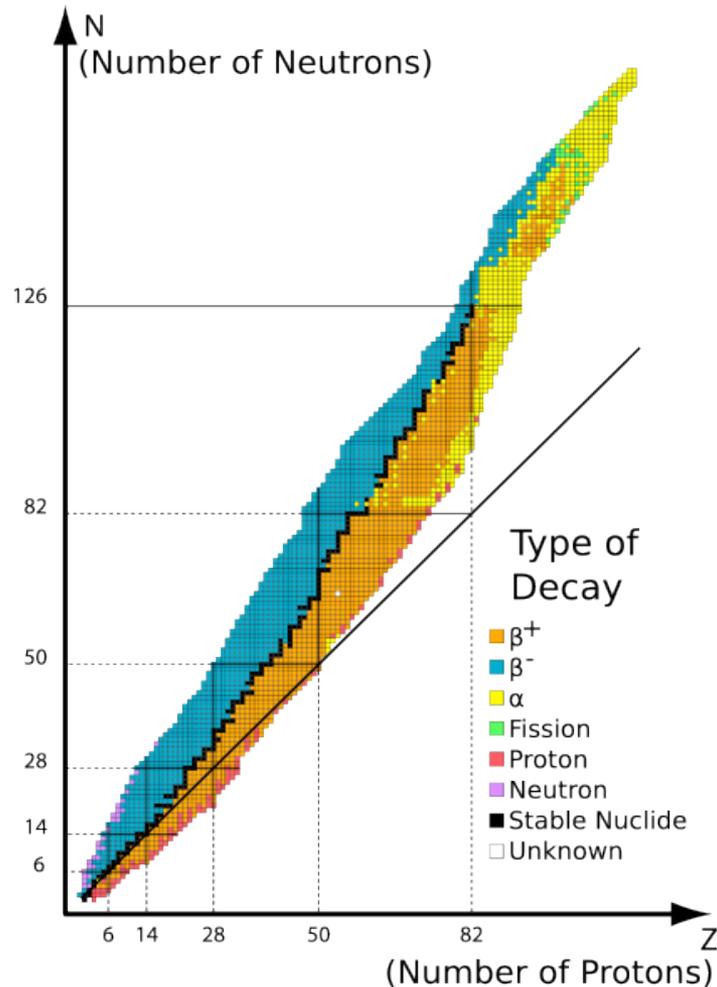


emissão de uma partícula W^- , a qual rapidamente decai no e^- e no $\bar{\nu}$

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.

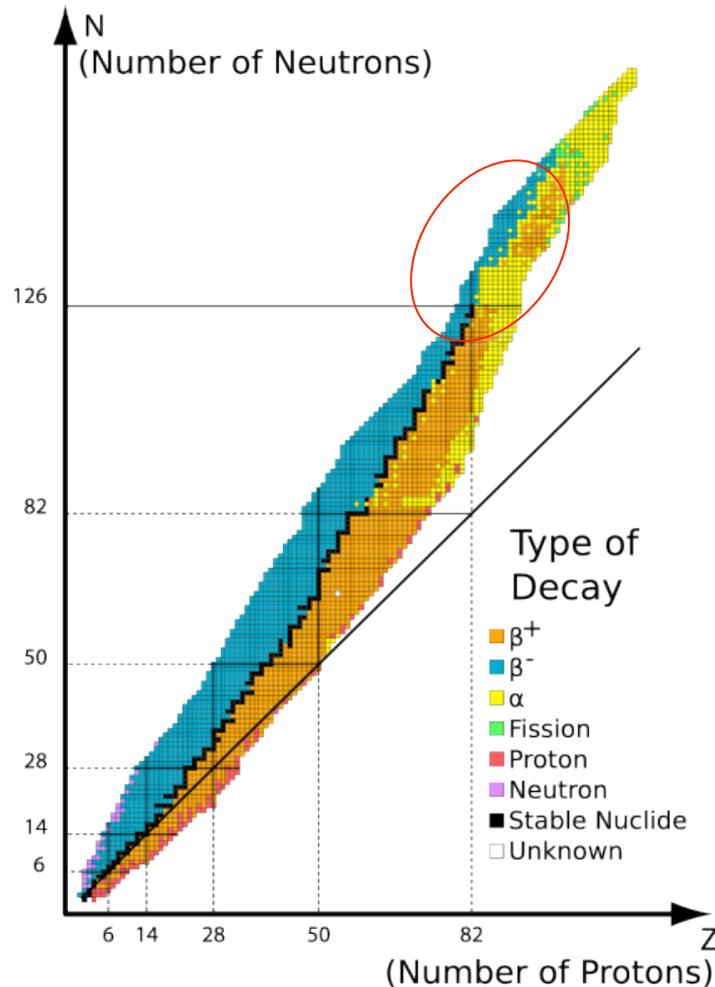
Decaimento nuclear: visão global

Classificação dos núcleos de acordo com seu mecanismo principal de decaimento



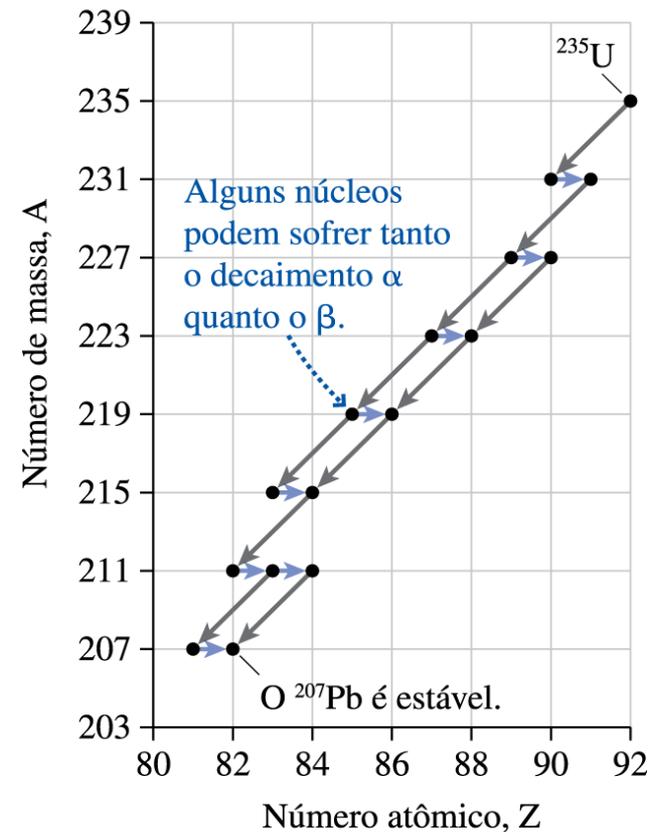
Decaimento nuclear: visão global

Classificação dos núcleos de acordo com seu mecanismo principal de decaimento

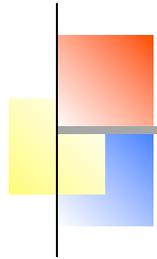


Sequências de decaimentos

O decaimento alfa reduz o valor de A em 4, e o de Z, em 2. O decaimento beta aumenta o valor de Z em 1.



Recordando: vida média de um elétron

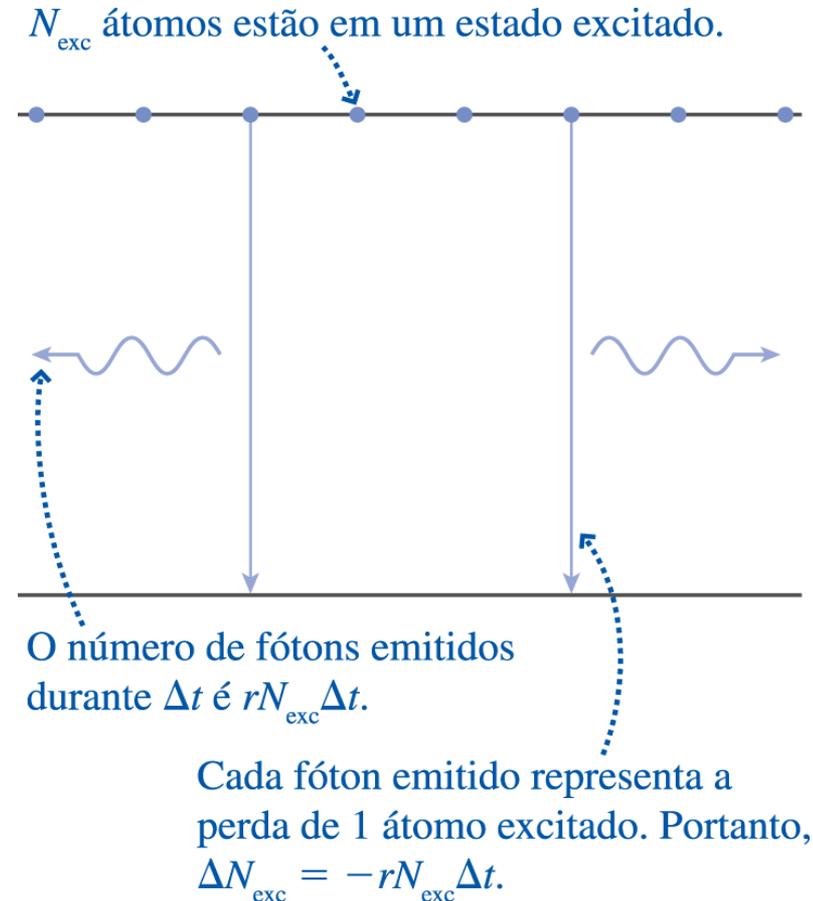


- Um átomo excitado emitirá um fóton espontaneamente, em um instante **aleatório**
- Se o átomo ainda não tiver emitido até o instante t , a **probabilidade** de emitir no intervalo dt seguinte é **$P = r dt$** , sendo **r** uma **taxa de relaxação** que varia de transição p/ transição.

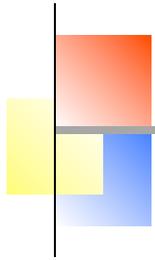
Eq. de Relaxação:
$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

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

tipicamente: desde ms até ns.



Decaimento nuclear: vida média

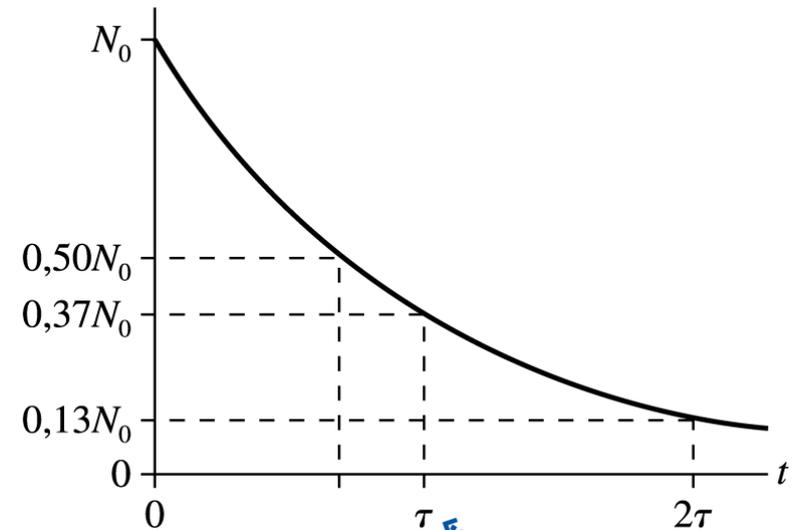


- Um **núcleo instável** emitirá uma **partícula α, β ou γ** espontaneamente, em um instante **aleatório**
- Se o núcleo ainda não tiver emitido até o instante t , a **probabilidade** de emitir no intervalo dt seguinte é **$P = r dt$** , sendo r uma **taxa de relaxação** que varia de transição p/ transição.

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

onde $\tau = \frac{1}{r}$ = tempo de vida **médio** (ou 'constante de tempo') do núcleo

Número de núcleos restantes

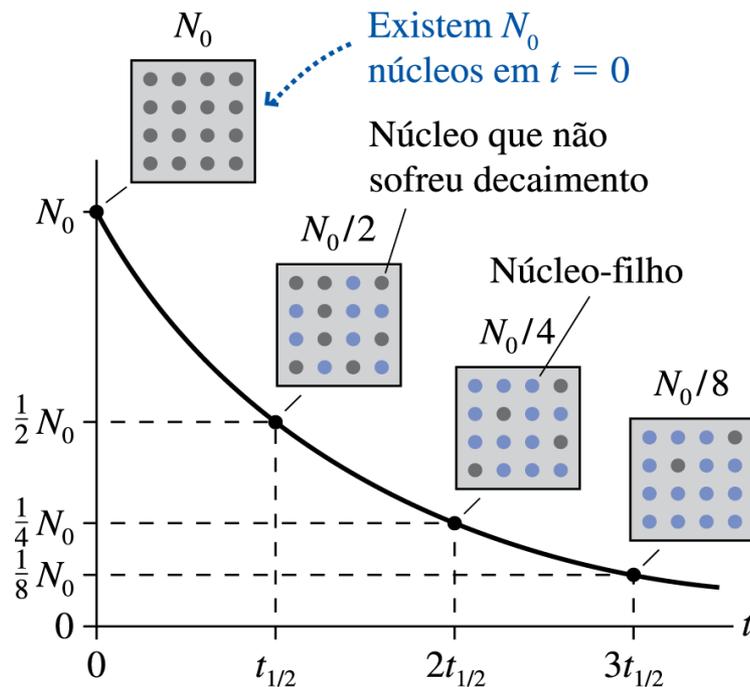


A constante de tempo é o instante de tempo em que o número de núcleos é e^{-1} , ou 37% do número inicial.

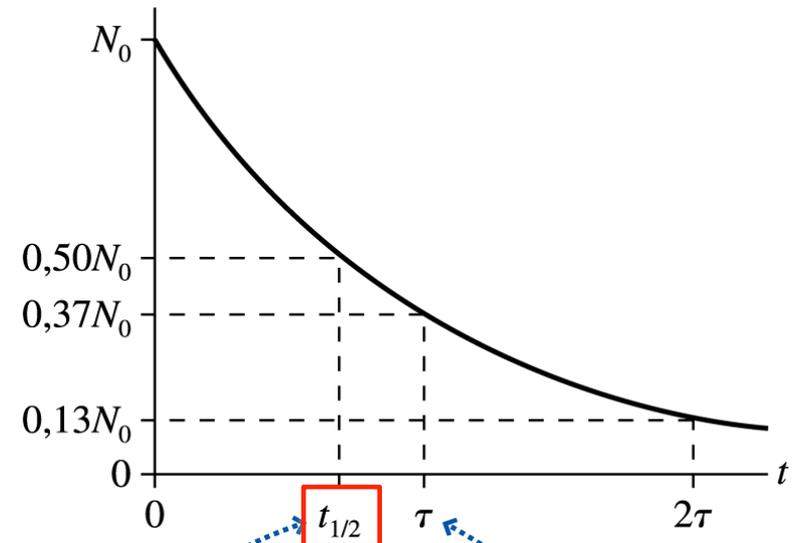
Decaimento nuclear: meia vida

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.

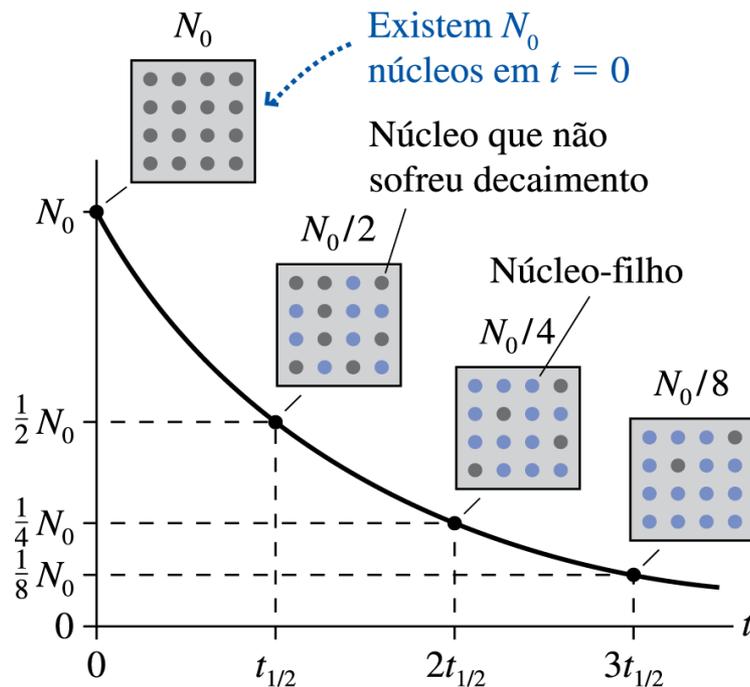
A constante de tempo é o instante de tempo em que o número de núcleos é e^{-1} , ou 37% do número inicial.

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

Decaimento nuclear: meia vida

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

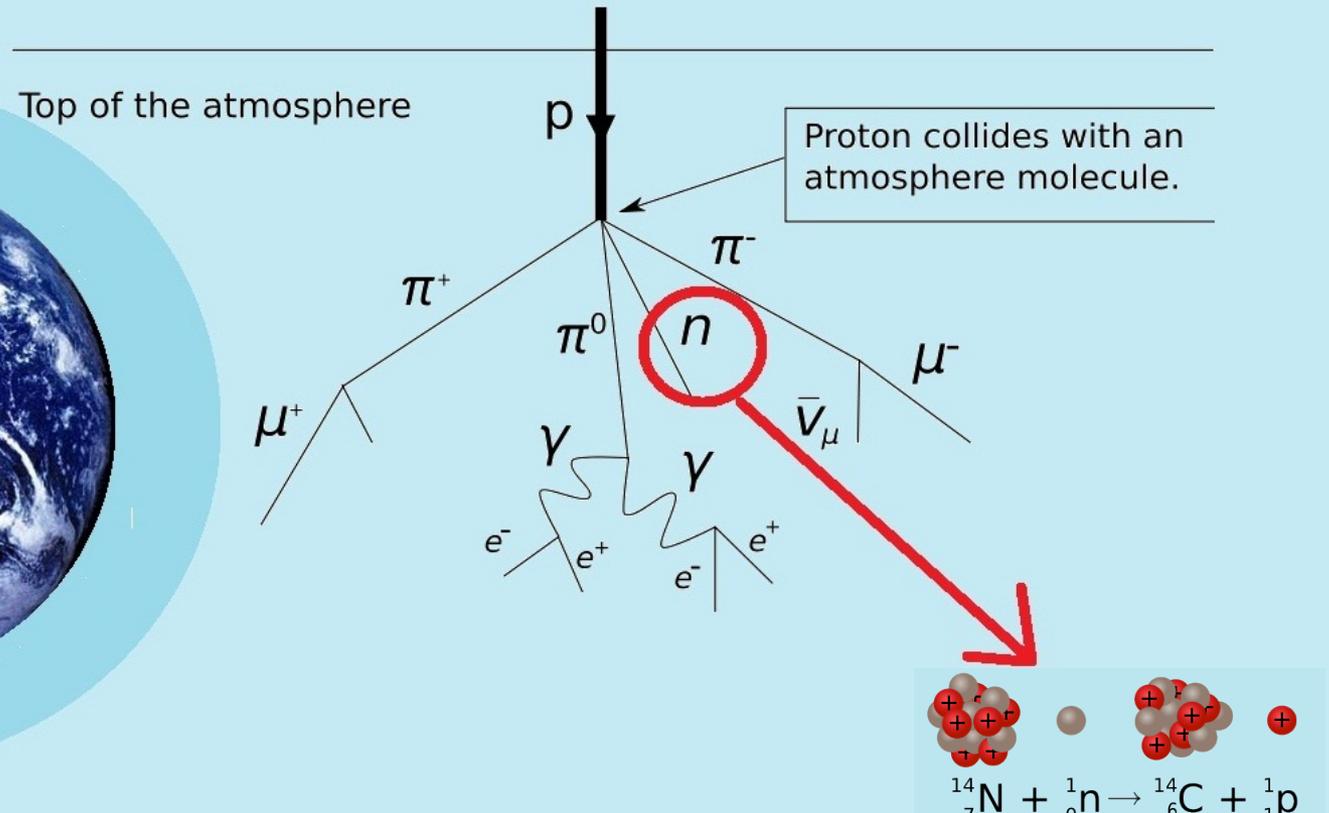
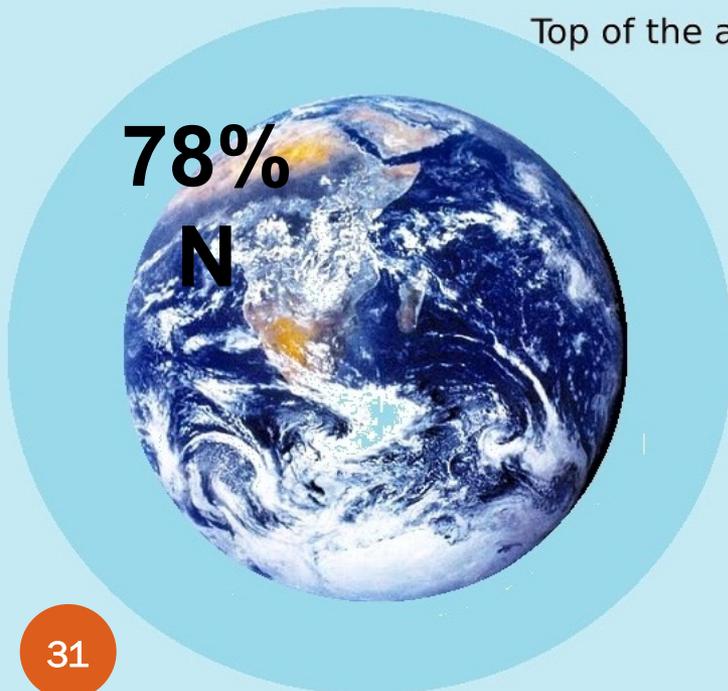
Carbono ^{14}C (usado para datação de objetos históricos): 5730 anos

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

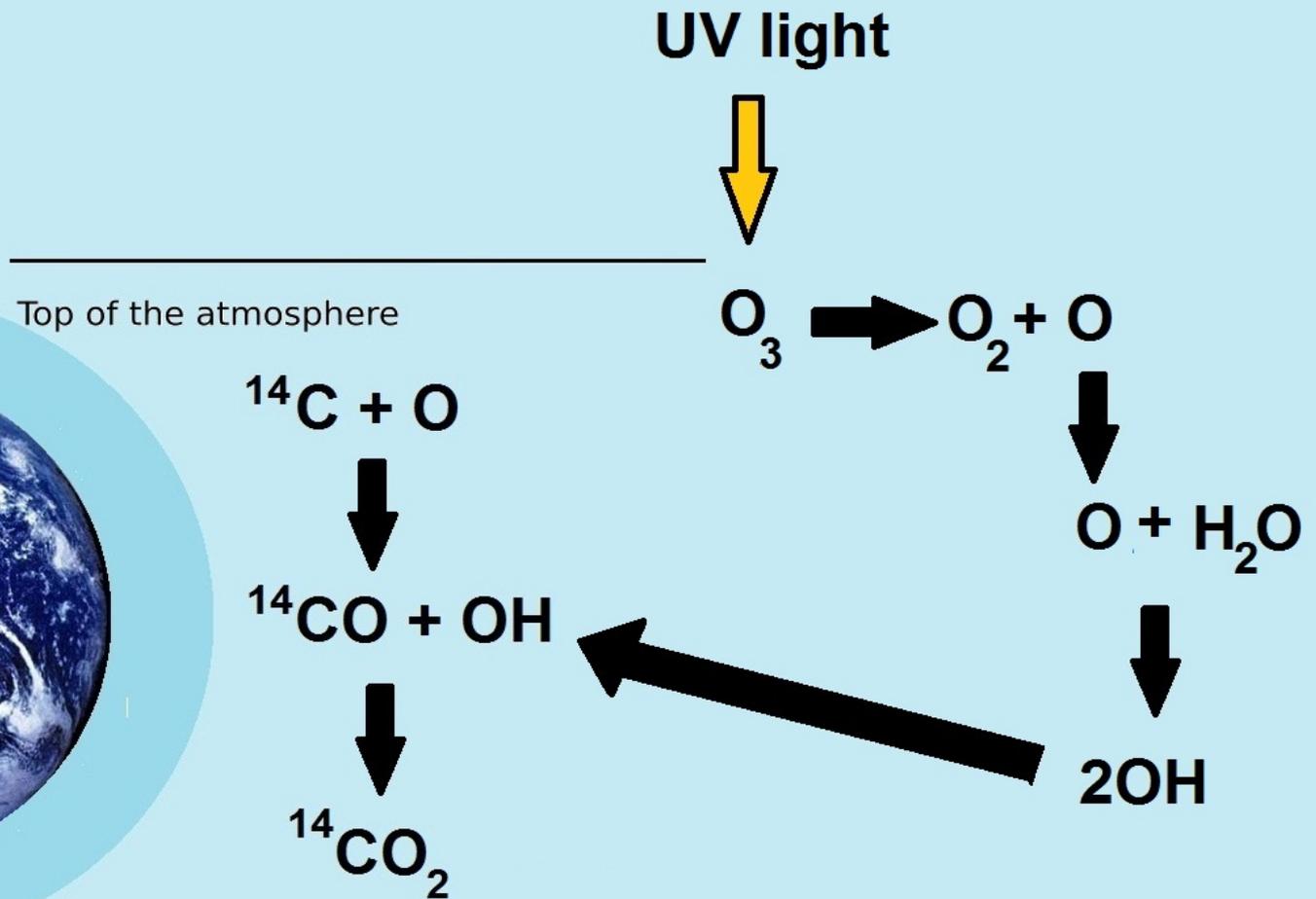
Urânio ^{238}U : 4,5 bilhões de anos

Produção de Radiocarbono (^{14}C)

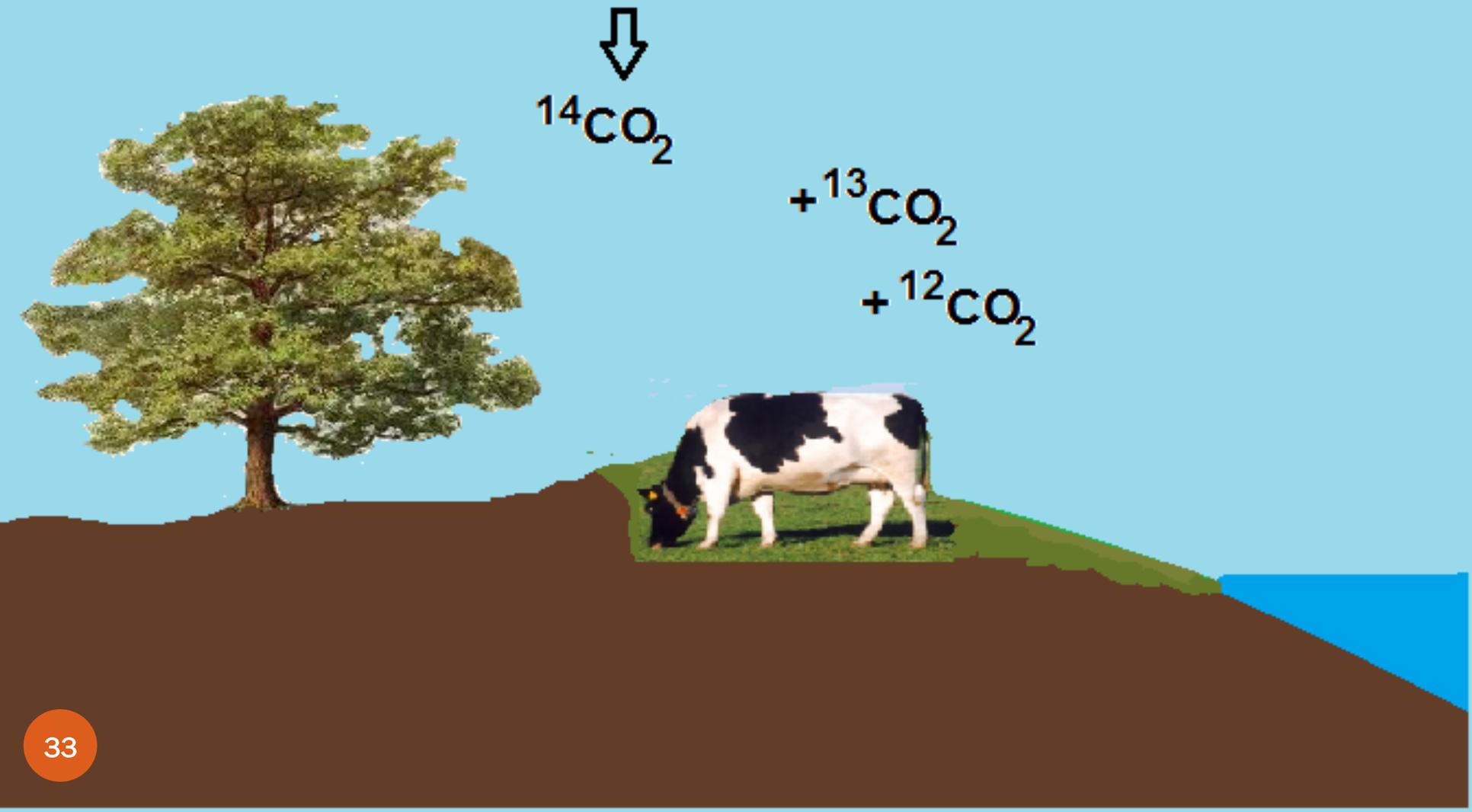
próton energético vindo do espaço profundo (“raio cósmico”)



Produção de dióxido de carbono



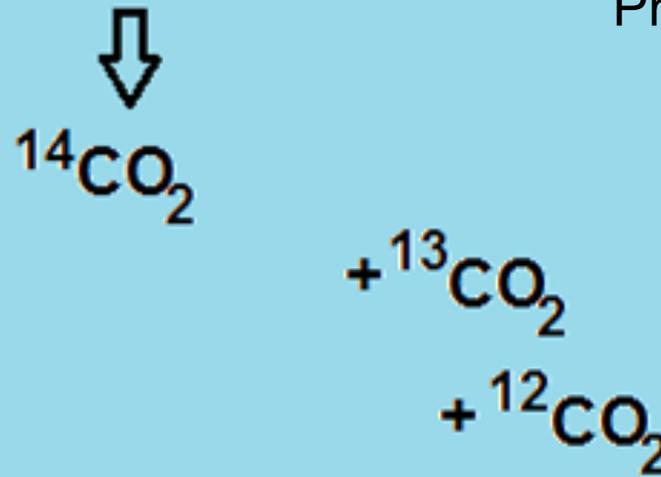
O ciclo do carbono



Equilíbrio: a produção compensa as perdas por decaimento

Proporção de equilíbrio:

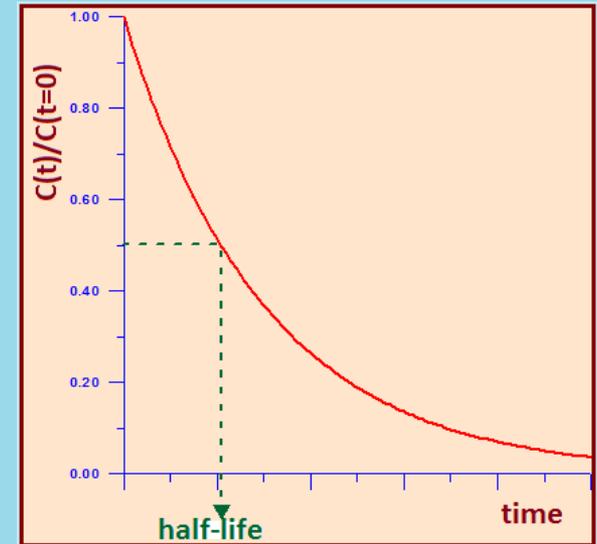
$$^{14}\text{C} / ^{12}\text{C} = 1,3 \times 10^{-12}$$



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: $N_{14}(t) = 0,35 / r = 9,1 \times 10^{10} \text{ núcleos}$

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 $N_{14}/N_{12}(t) = 3,6 \times 10^{-13}$

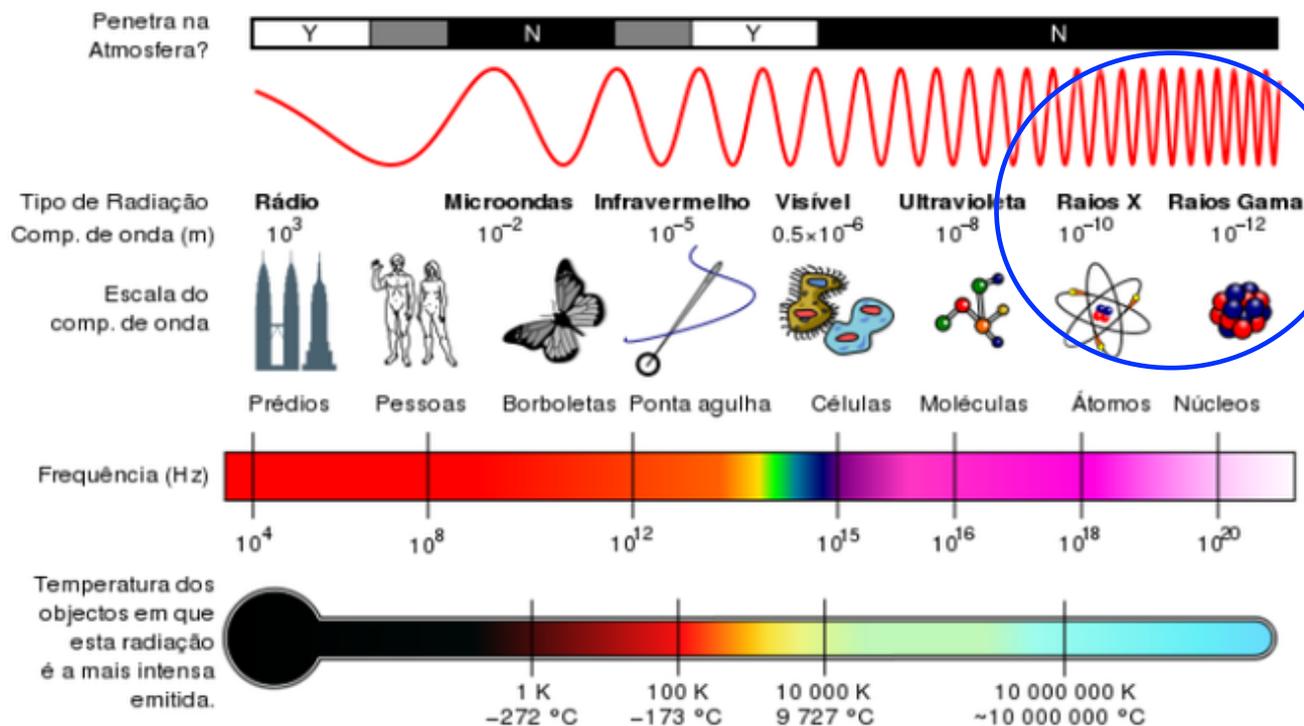
4. Assumimos que originalmente $N_{14}/N_{12}(0) = 1,3 \times 10^{-12}$. Substituindo todos os

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 :

Radiação Ionizante

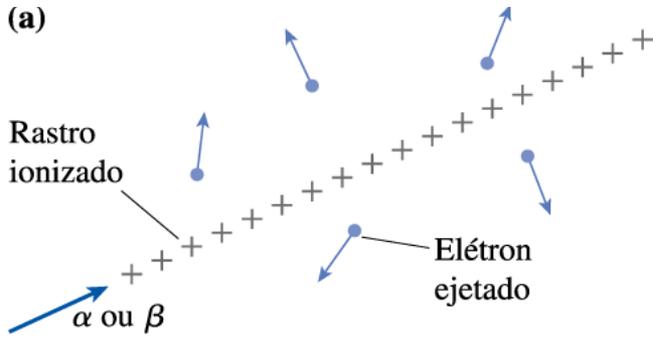
Raios-X e radiações nucleares α, β, γ são **Radiações ionizantes**: devido à sua alta energia, podem ionizar a matéria e romper ligações moleculares.

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

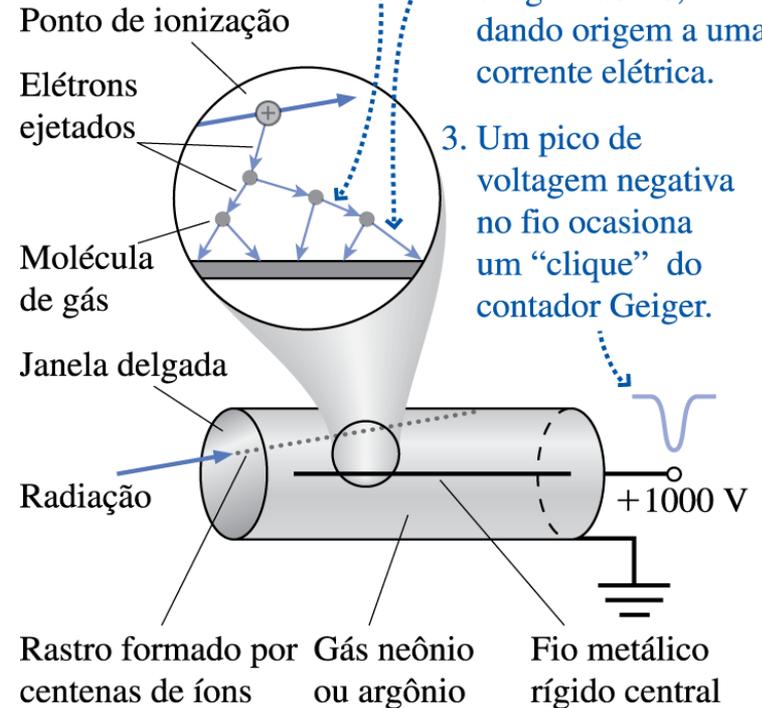


(raios- γ podem, de acordo com sua energia, gerar efeitos semelhantes, ou sofrer outros processos, como absorção)

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

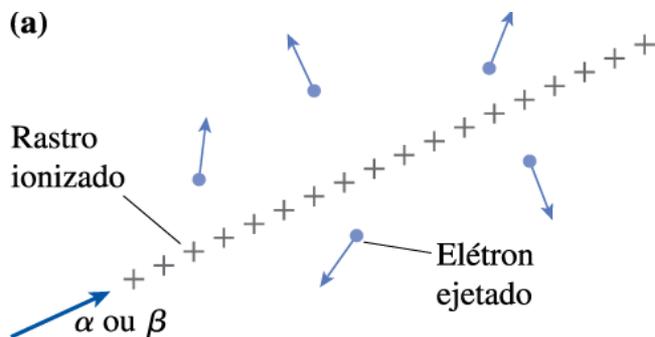
Detector (Contador Geiger):

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

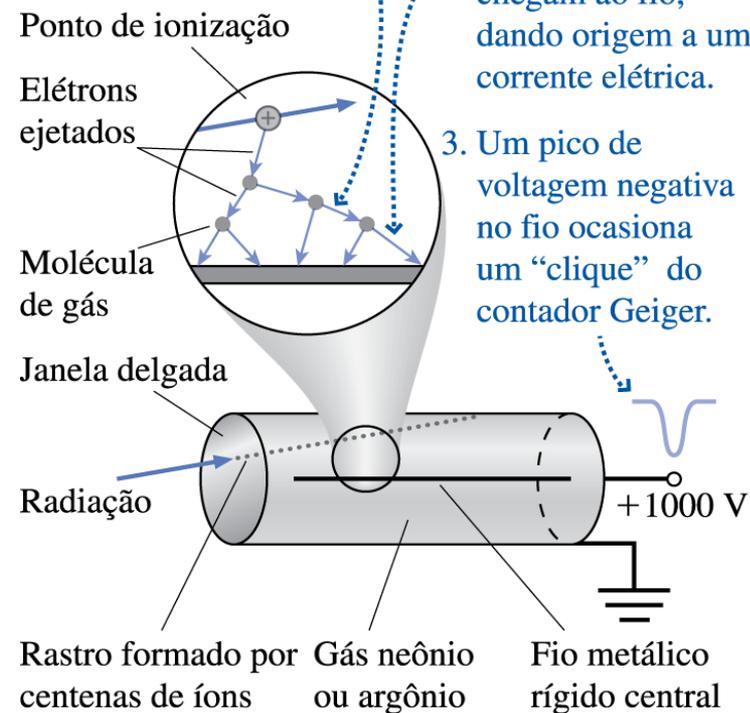


(raios- γ podem, de acordo com sua energia, gerar efeitos semelhantes, ou sofrer outros processos, como absorção)

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.



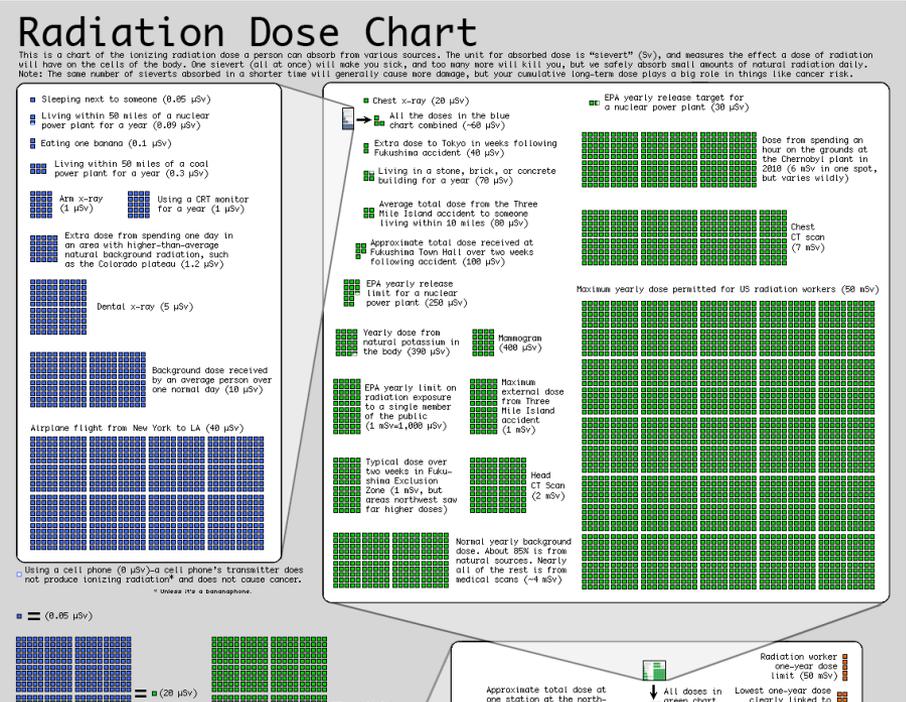
Doses de radiação

Unidades para medir a quantidade de dano de uma fonte radioativa em um ser vivo ('dose equivalente'): **Sievert (Sv) ou rem (= 0,01 Sv)**

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. V livro p/ detalhes

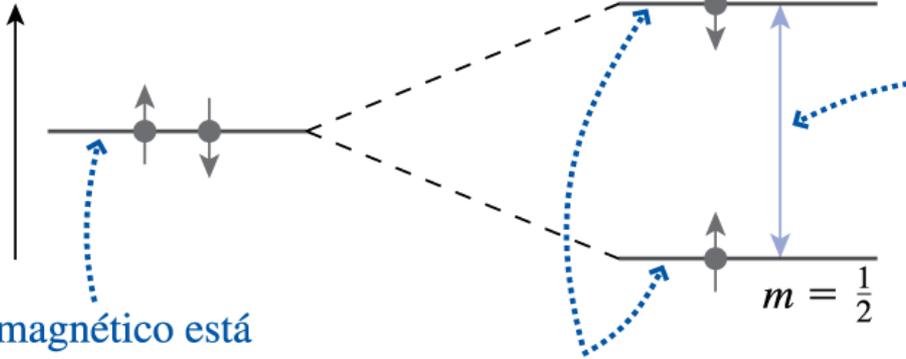
Um ótimo resumo visual do tamanho das doses de radiação que absorvemos ao fazer diversas atividades, desde prosaicas como comer uma banana ou voar de avião, até suicidas como visitar o interior do reator de Chernobyl, pode ser encontrado em

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



Ressonância Magnética (Nuclear)

(a) Aumento de energia



O campo magnético está desligado. Os prótons com *spin up* e com *spin down* possuem a mesma energia.

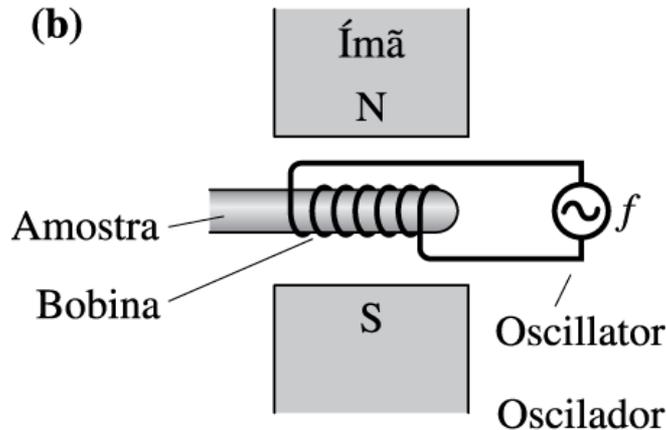
Estes são os níveis de energia quando o campo magnético está ligado.

Spin down, anti-alinhado com o campo

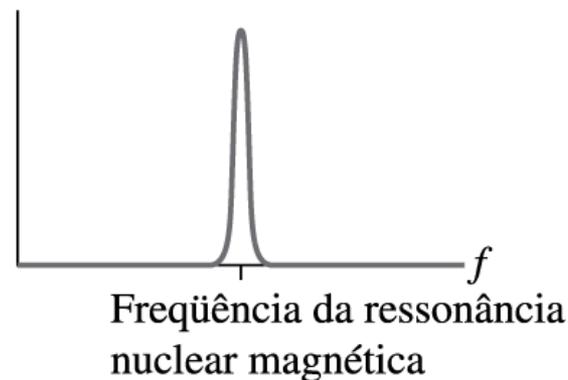
Fótons de radiofrequência fazem cada próton ir e vir entre estes dois níveis de energia.

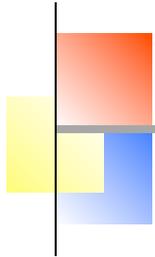
Spin up, alinhado com o campo

(b)



Absorção



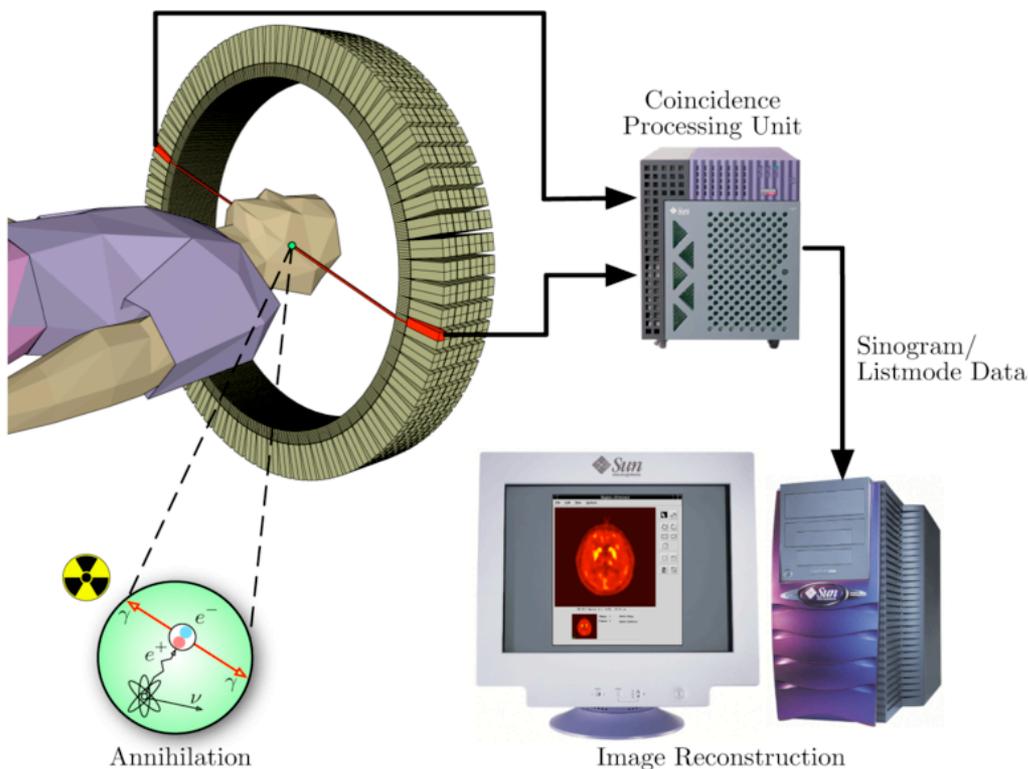


Ressonância Magnética (Nuclear)

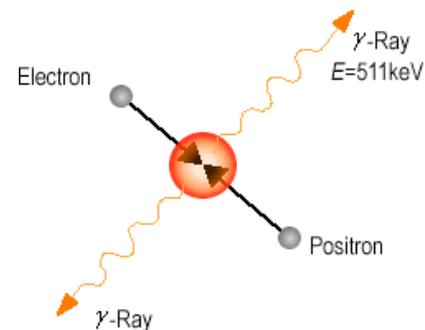
Cada tecido tem frequências ressonantes ligeiramente diferentes (conhecidas). Além disso, colocando o corpo como um todo em um campo magnético estático inhomogêneo, essas frequências passam também a variar ligeiramente de ponto para ponto. Assim é possível se determinar precisamente qual parte do corpo está absorvendo qual frequência, e mapear os tecidos. Um programa de computador interpreta os dados e gera uma imagem



Tomografia por emissão de pósitrons



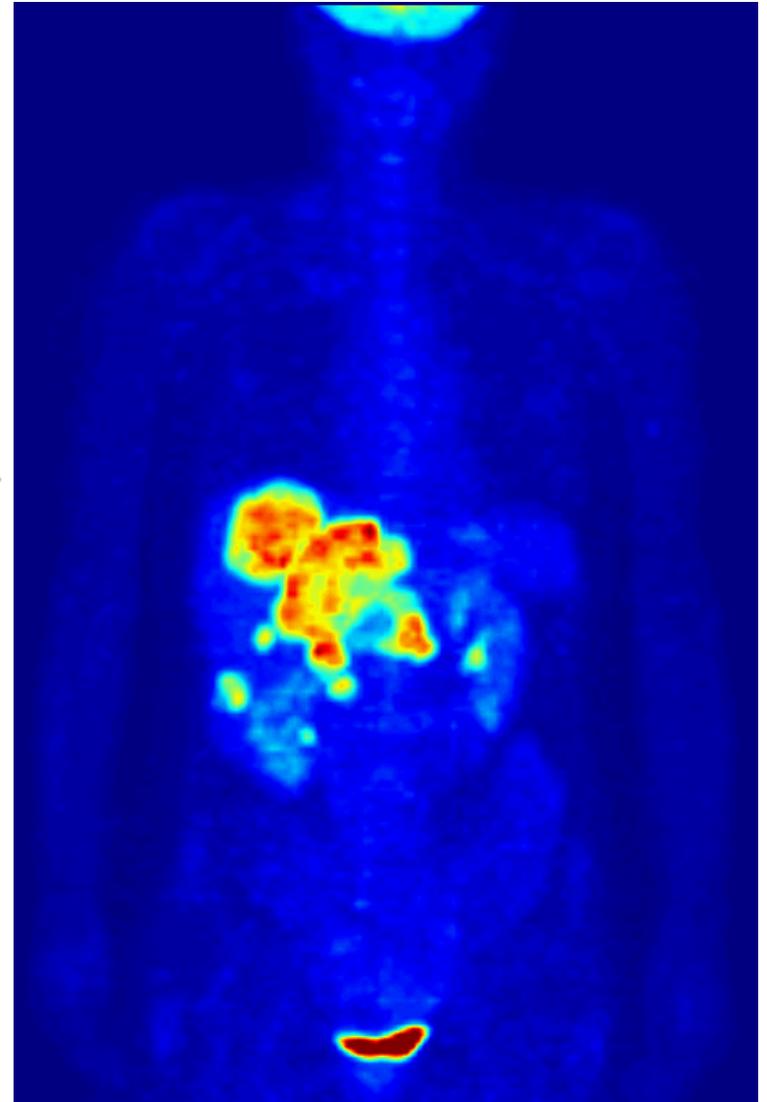
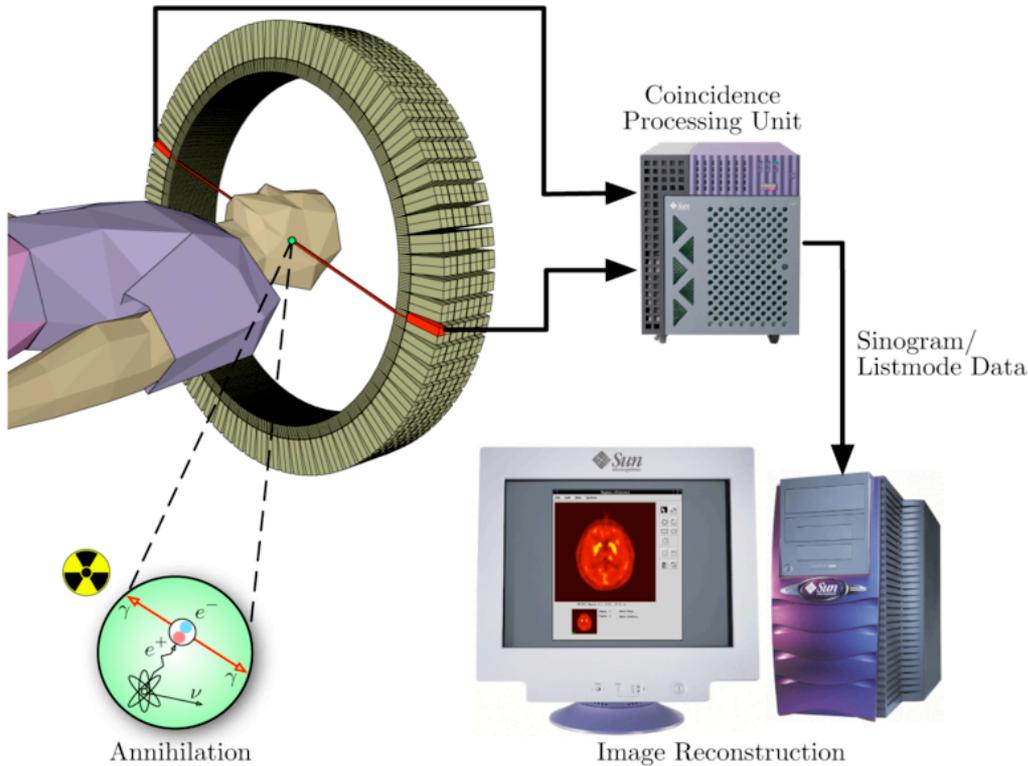
- A pessoa ingere um composto radioativo ('traçador') que se acumula preferencialmente em certos tecidos.
- Após o traçador sofrer decaimento β^+ , o pósitron e^+ produzido se aniquila com um elétron do corpo, produzindo um sinal característico de 2 raios- γ .



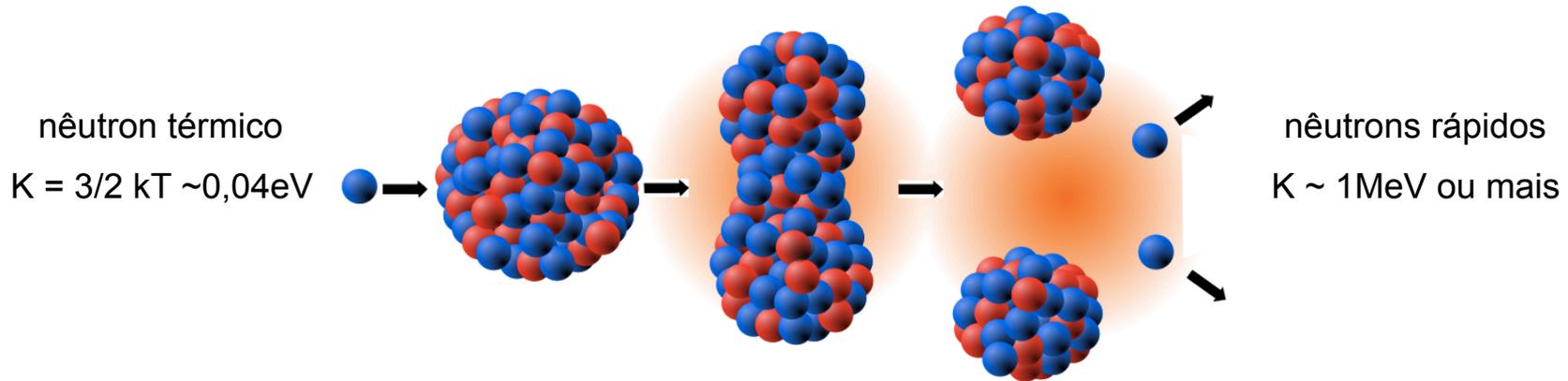
obs: não confundir com tomografia computadorizada, que é baseada em raios-X

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

Tomografia por emissão de pósitrons



Fissão Nuclear

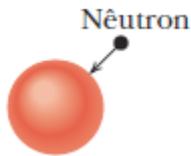


Como os núcleos produzidos na fissão têm excesso de nêutrons, sofrem em seguida uma série de decaimentos (em geral β^-), p. ex:

	^{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

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.



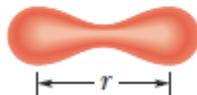
(c)

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.



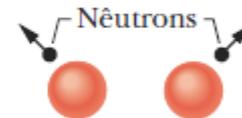
(f)

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

