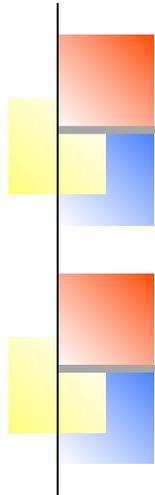


INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Física IV



Cap 43 – Física Nuclear

Prof. Daniel Jonathan

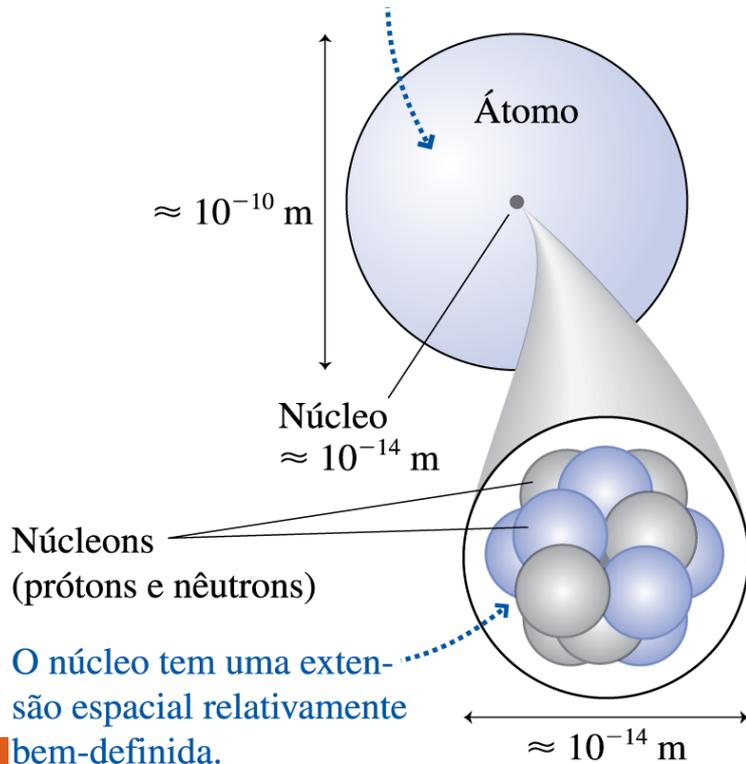
Niterói, Julho 2016

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

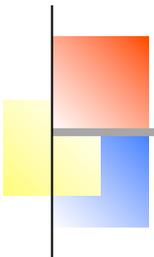


- *Número atômico (Z)* = número prótons no núcleo.

- *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

P: A massa de um núcleo formado por Z prótons mais N nêutrons é maior, menor ou igual à massa de Z prótons separados mais a massa de N nêutrons separados?

- A) Maior, pois é preciso investir energia para formar o núcleo a partir das partículas
- B) Menor, pois energia é liberada quando formamos o núcleo a partir das partículas
- C) Igual, pois em ambos os casos o número de partículas se mantém

Dica: pense ao contrário: se quisermos separar um núcleo em prótons e nêutrons individuais, ganhamos ou perdemos energia? Ou nenhum dos dois?

Massas de núcleons e massa atômica

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

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

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

Atenção para o nº. de casas decimais de precisão!

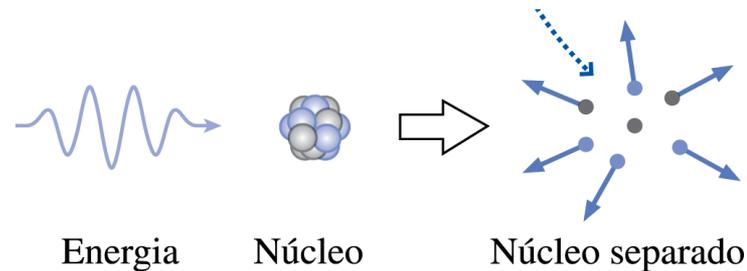
• A massa atômica de um elemento na tabela periódica é a *média ponderada* das massas de todos os isótopos que ocorrem naturalmente.

• 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 < $m(^1\text{H}) + m(n)$! |
| Hélio | ^4He | 4,00260 | 3728,40 < $2 m(^2\text{H})$! |

Energia de Ligação

Energia necessária para separar o núcleo em núcleons individuais.



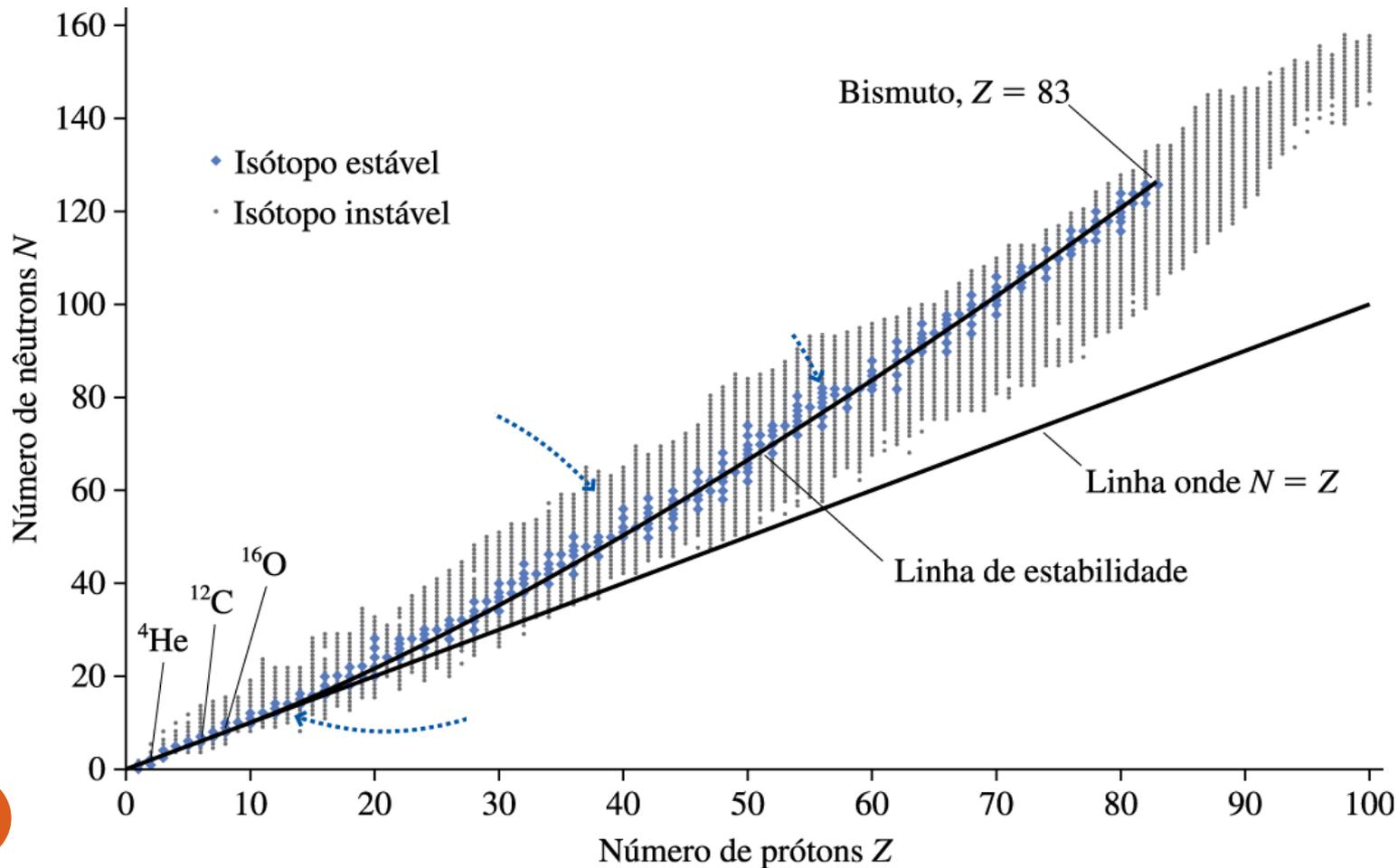
$$B + m_{\text{nuc}}c^2 = (Zm_p + Nm_n)c^2$$

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

| Partícula | Símbolo | Massa (u) | Massa | |
|------------|-----------------|-----------|-----------|-------------------------------|
| | | | 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 | 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) ! |

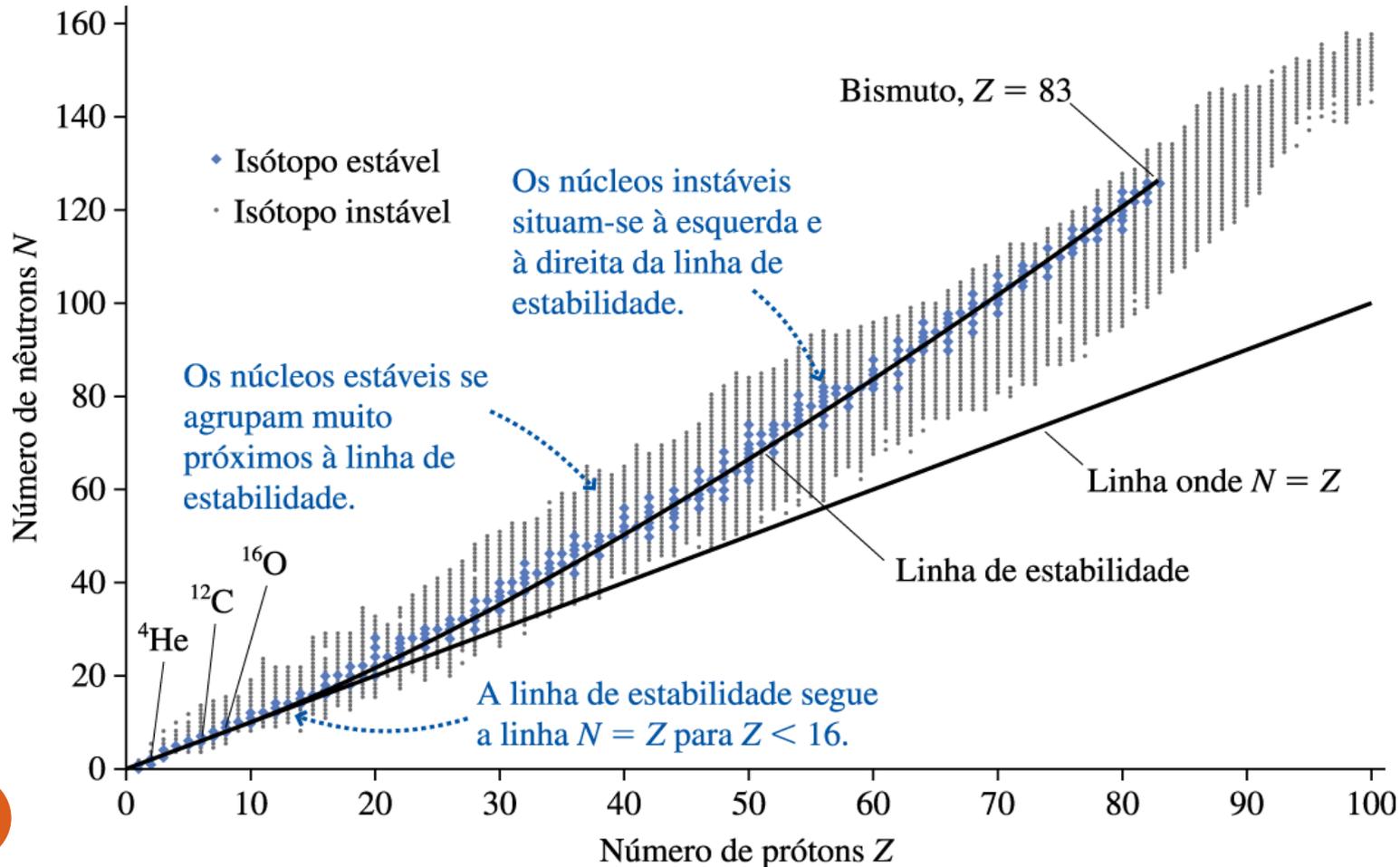
Estabilidade Nuclear

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



Estabilidade Nuclear

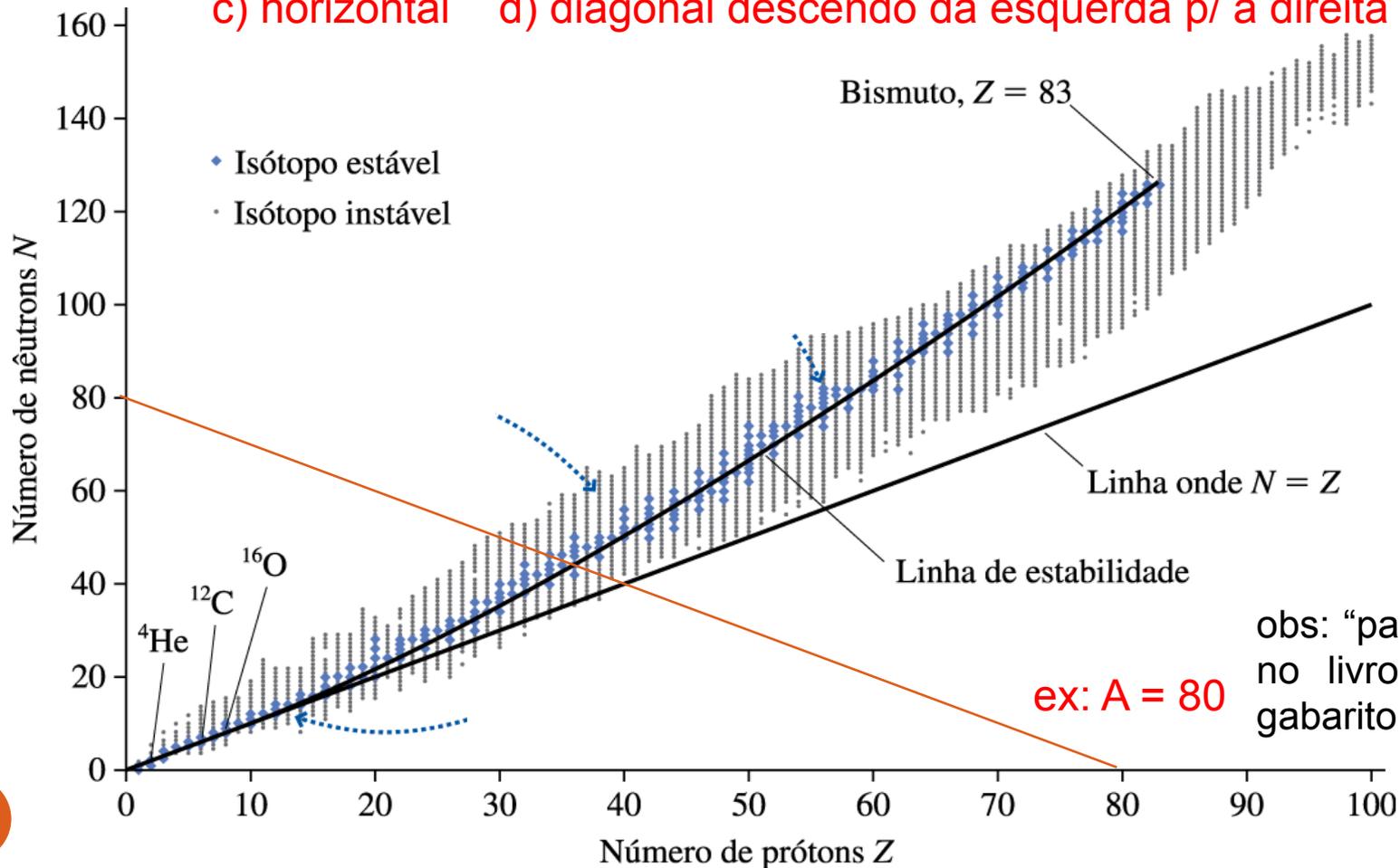
Menos de 10 % dos núcleos conhecidos são estáveis
(Os demais são radioativos)



Estabilidade Nuclear

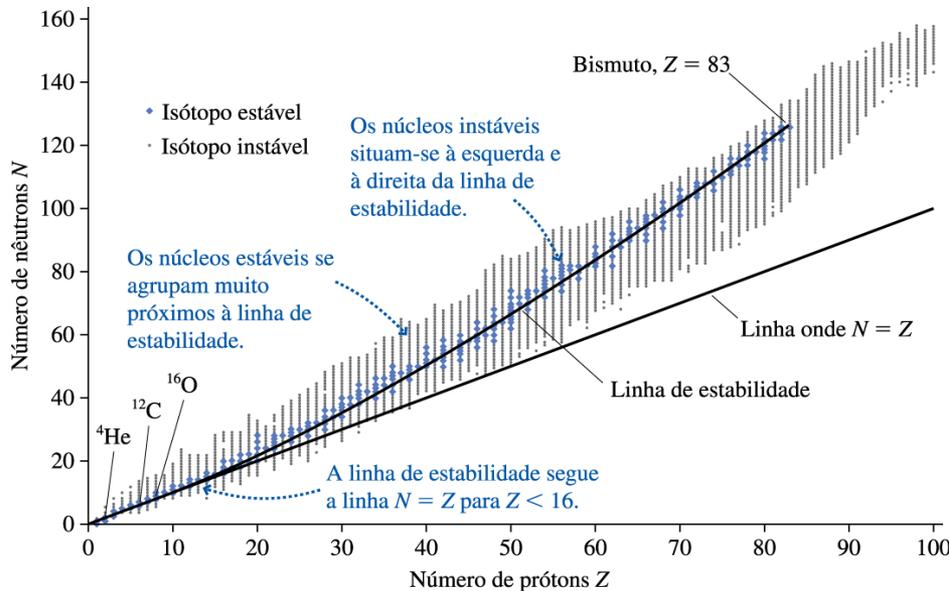
P: como é uma linha formada por um conjunto de núcleos *isóbaros* (com mesmo $A = Z + N$)?

- a) vertical
- b) diagonal subindo da esquerda p/ a direita
- c) horizontal
- d) diagonal descendo da esquerda p/ a direita



Estabilidade Nuclear

Observações do gráfico (precisam de explicação!)

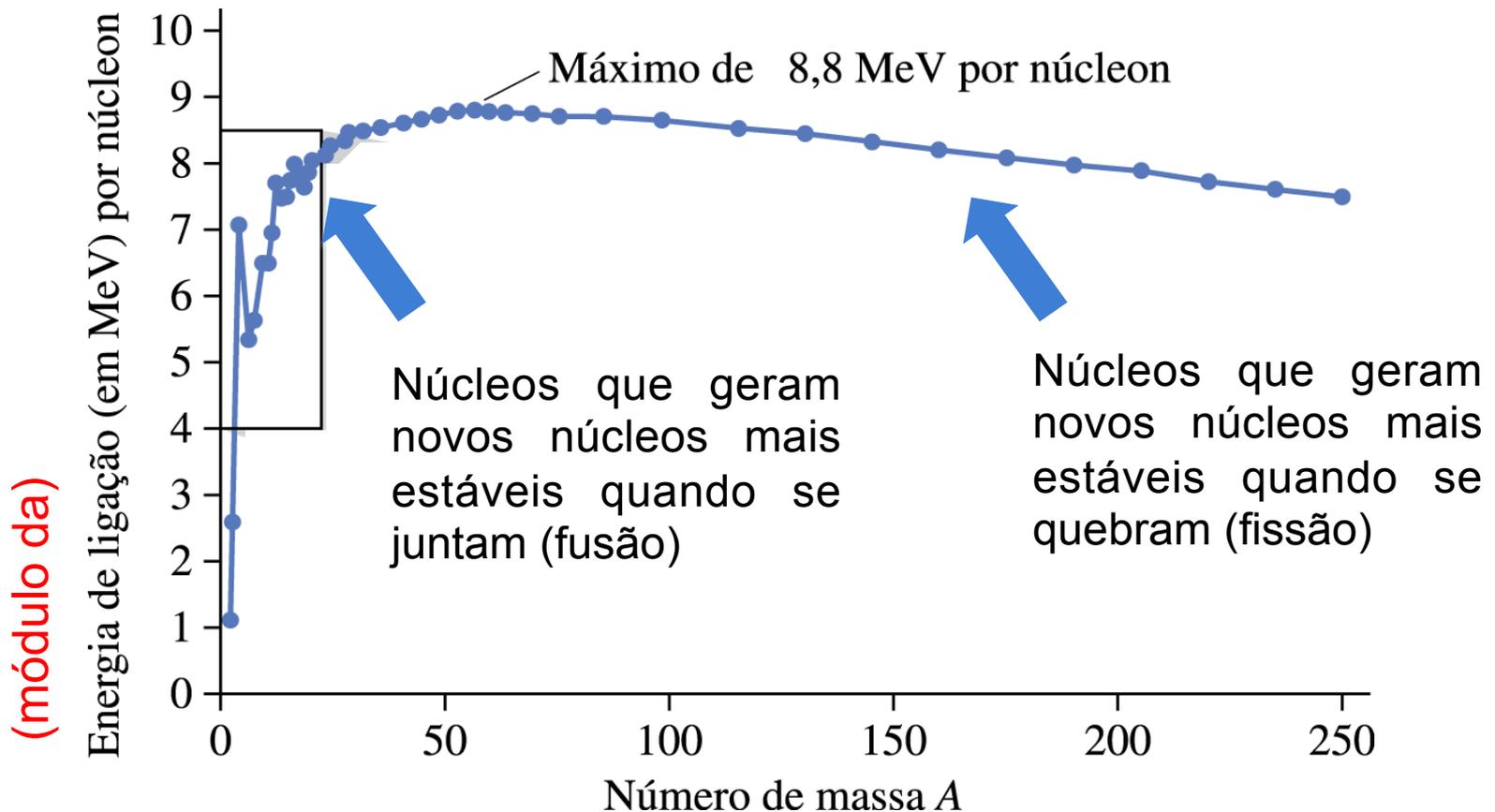


- Núcleos estáveis estão próximos à linha de estabilidade.
- Núcleos instáveis estão agrupados em bandas situadas à esquerda e a direita da linha de estabilidade.
- Os elementos mais leves, com $Z < 16$, são estáveis quando $N \cong Z$.

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

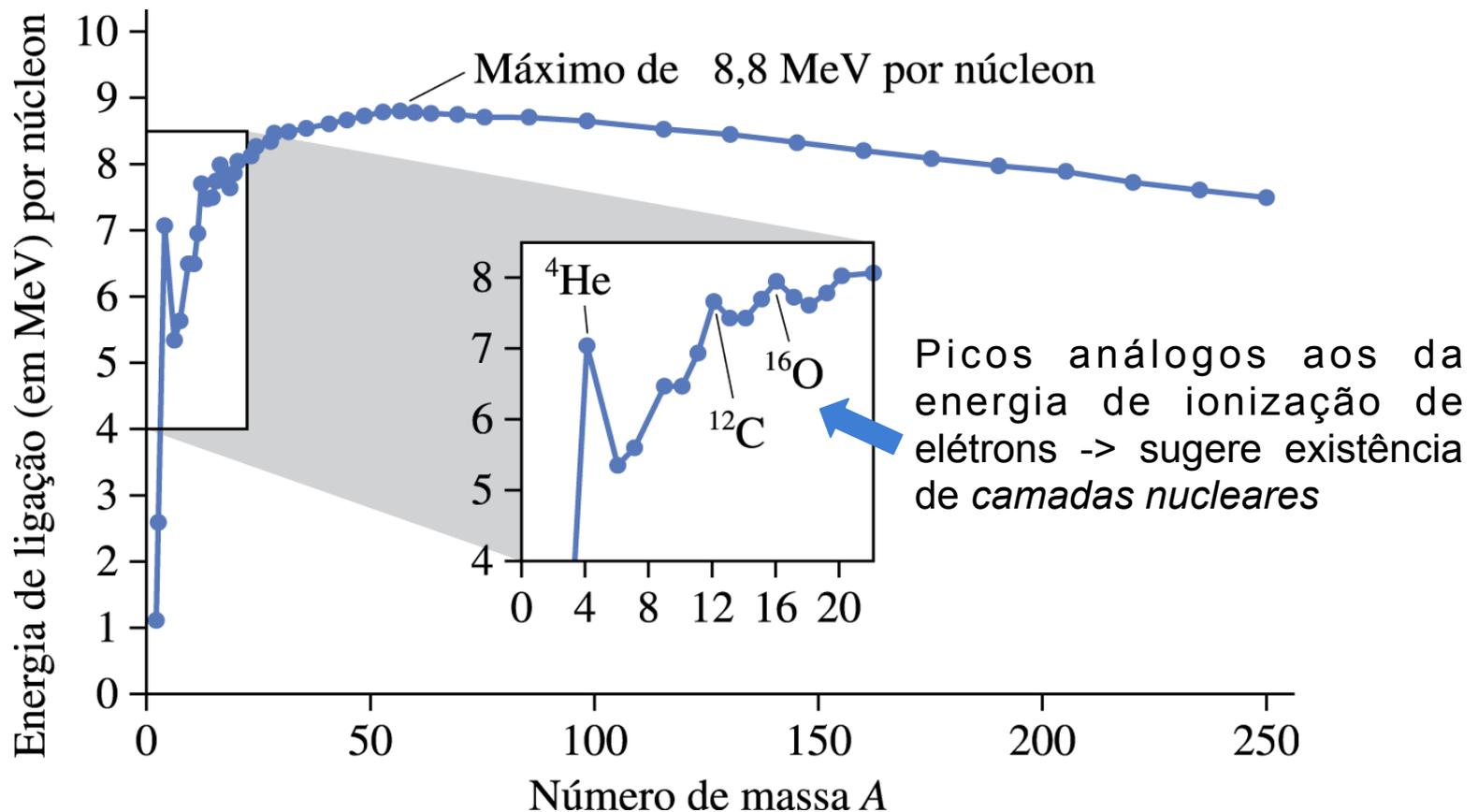
A Curva de Energia de Ligação

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



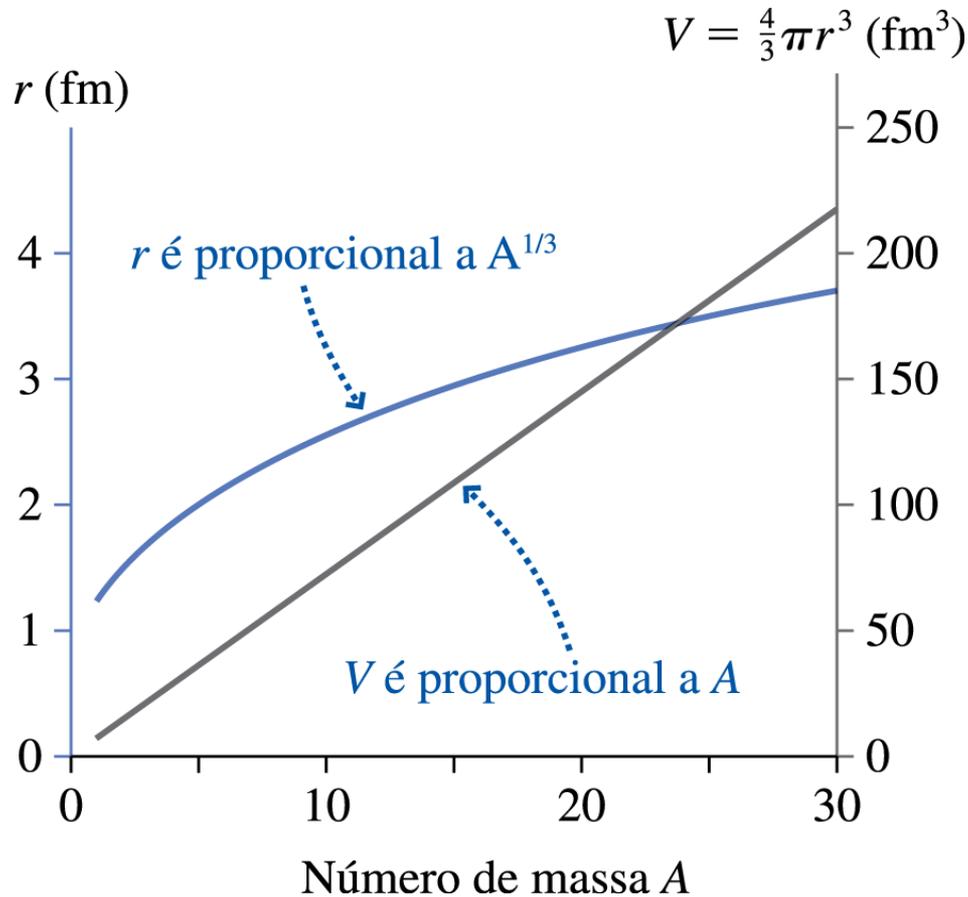
A Curva de Energia de Ligação

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



Tamanho Nuclear

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



Implicações:

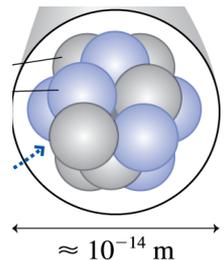
1. *Todo núcleo tem aprox. a mesma densidade*

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

P: Quanto pesaria uma quantidade de matéria nuclear suficiente para encher uma colher de chá?

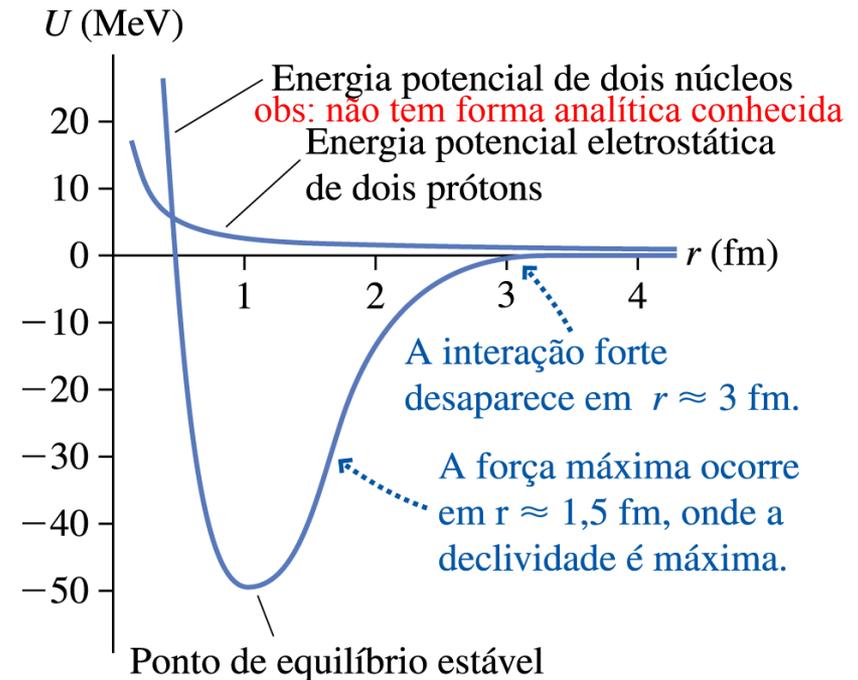
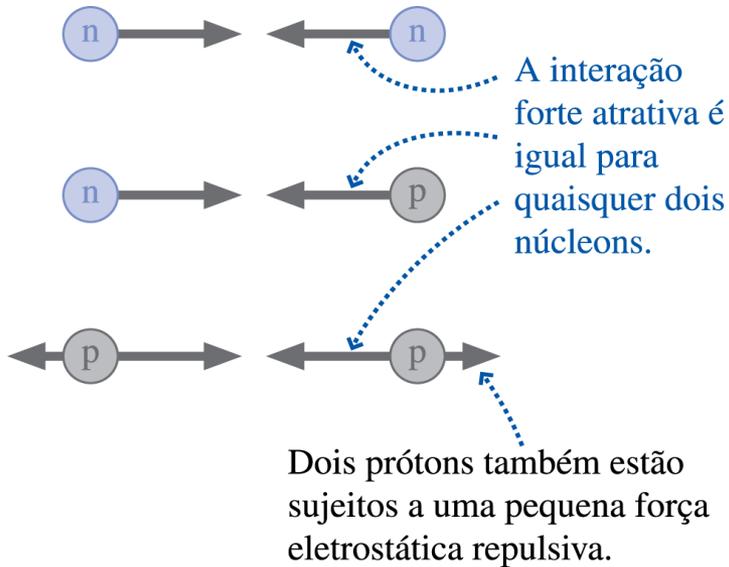
A) 10^3 kg B) 10^6 kg C) 10^9 kg D) 10^{12} kg

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



A Interação Nuclear Forte

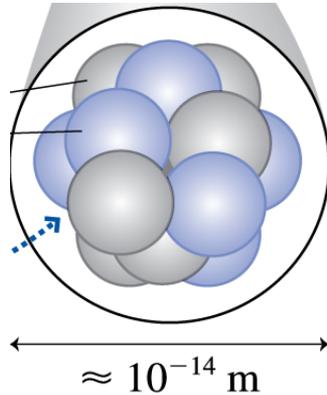
• O que mantém os núcleos compactos, já que os prótons se repelem? **R: Interação FORTE**



- Força de curto alcance, exercida em distâncias nucleares (alguns fm).
- Força atrativa a curtas distâncias, mas passa a repulsiva a curtíssimas distâncias.

- Dentro de seu alcance ela é muito mais forte que a força eletrostática.
- Não é sentida pelos elétrons.

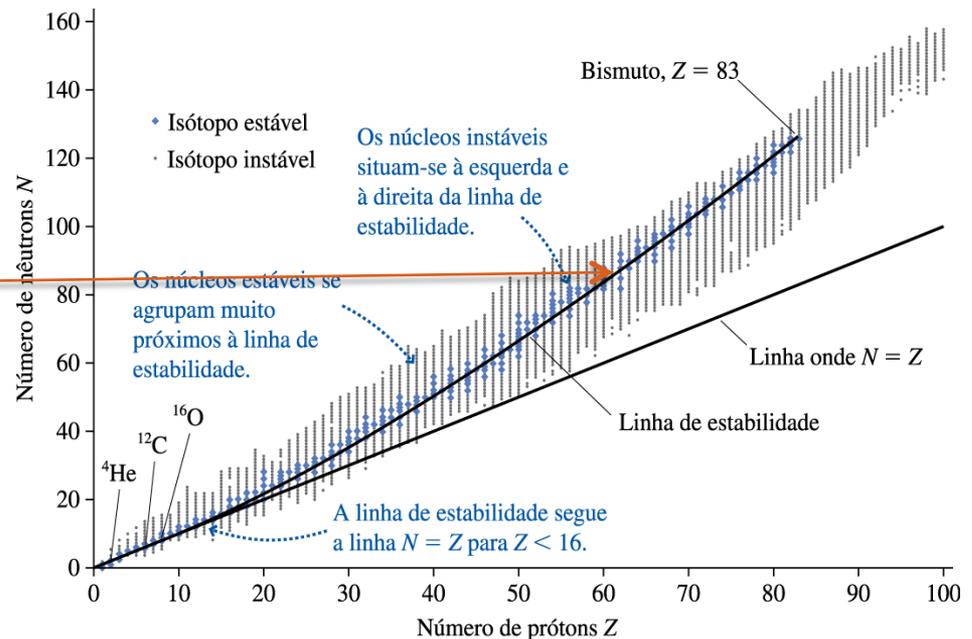
A Interação Nuclear Forte



Todos os prótons se repelem, mas apenas os núcleons vizinhos se atraem

À medida em que Z cresce, a força repulsiva vai aumentando, mas a atrativa permanece igual

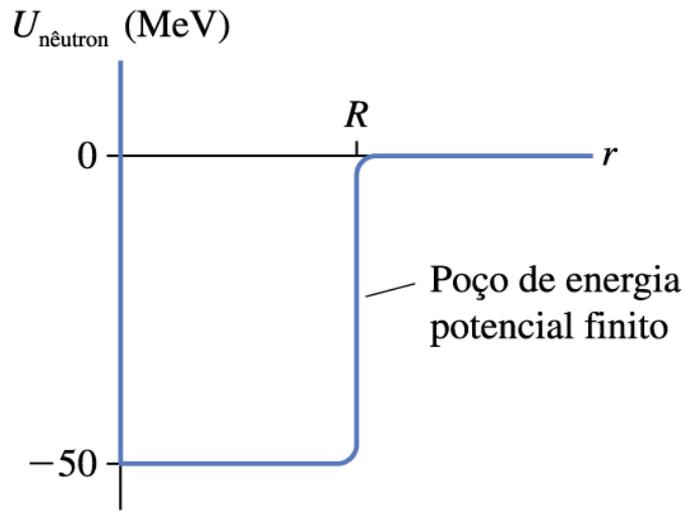
isso explica por que para Z grande é preciso $N > Z$ para o núcleo ser estável !



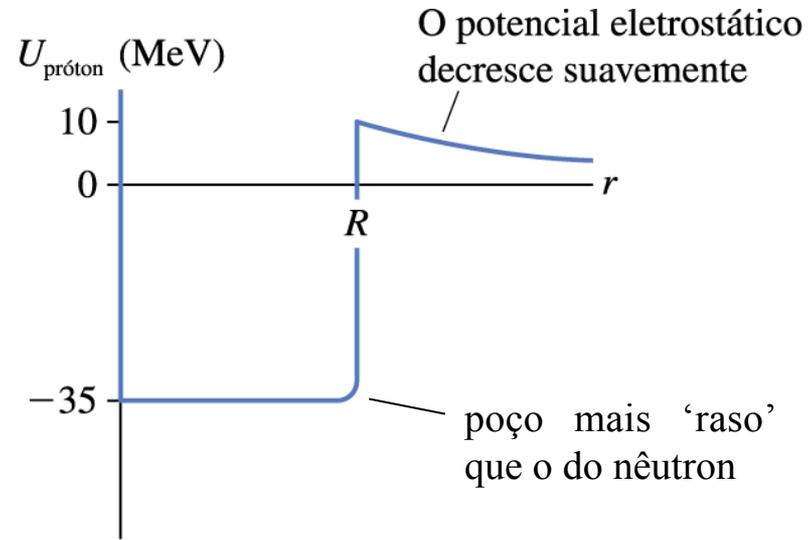
Modelo de camadas: Mayer (1949)

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.

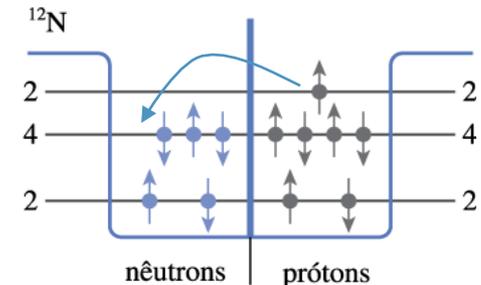
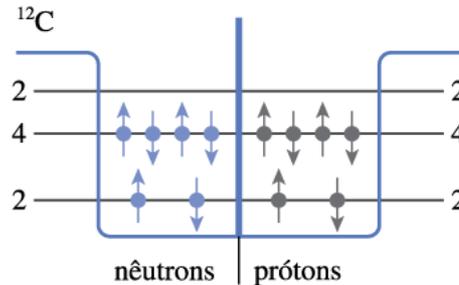
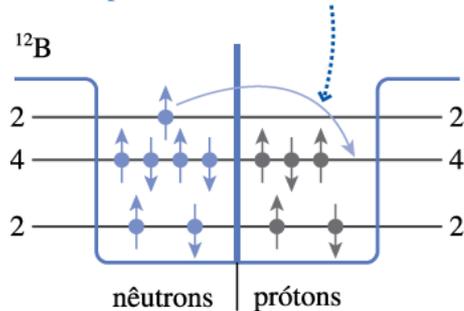


A energia potencial média de um próton se deve à interação forte e à força elétrica. Essa profundidade do poço de potencial é para $Z \approx 30$.

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)

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^+)



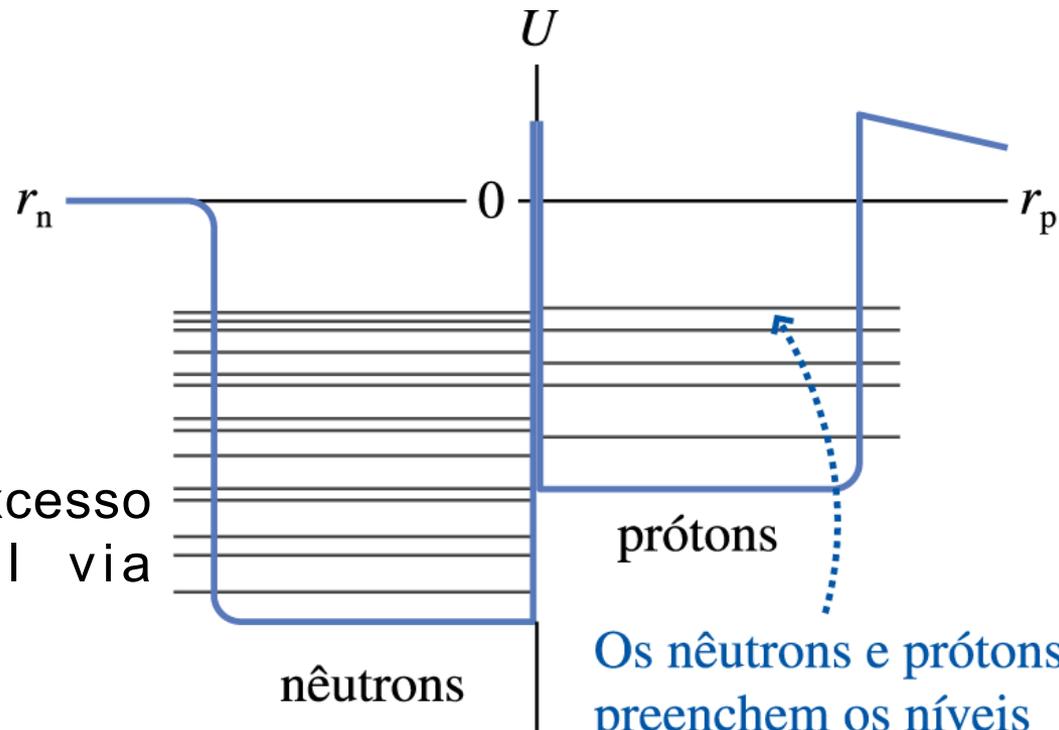
Modelo de camadas: Z Alto

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

- descoberta da radioatividade por Becquerel (1896)
- diversos cientistas ajudaram a desvendar sua natureza. Entre eles destaca-se o casal **Pierre e Marie Curie** (Nobel Física 1903)
- Descobriram vários novos elementos radioativos como o Rádio e o Polônio.
- Marie Curie depois ganhou ainda o Nobel de Química - a única pessoa até hoje a conseguir isso.



Radiação e Radioatividade

J. J. Thomson e Rutherford realizaram o experimento abaixo.

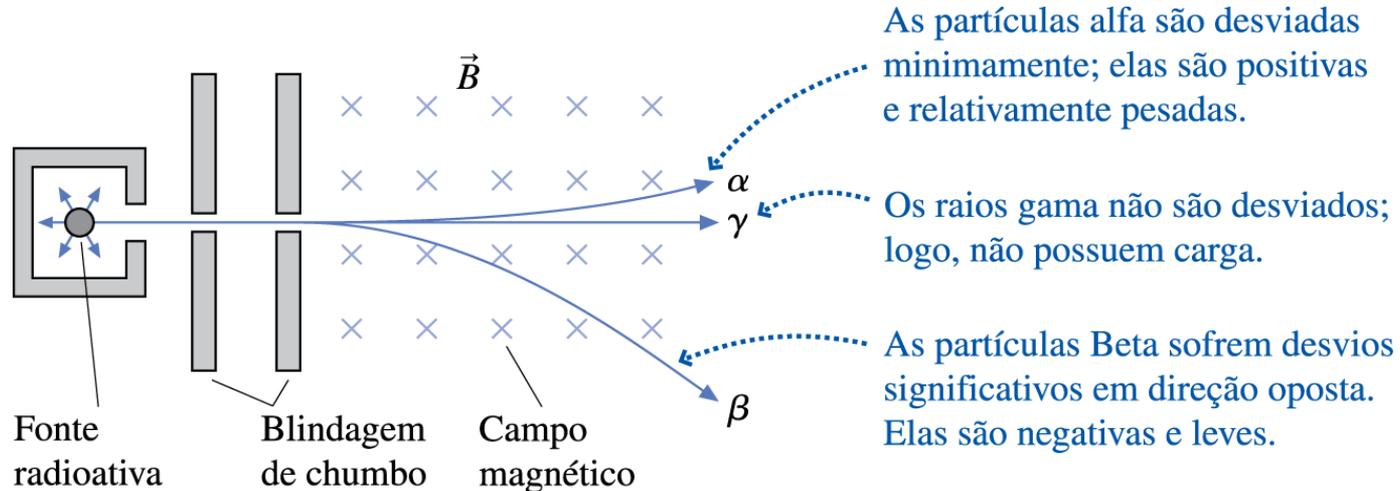


TABELA 43.3 Os três tipos de radiação

| 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 |

Radiação e Radioatividade

P: Você tem 3 pílulas radioativas, uma emite raios α , outra raios β e outra raios γ . Você precisa engolir uma, colocar uma no bolso, e segurar uma na mão. Qual combinação é mais segura?



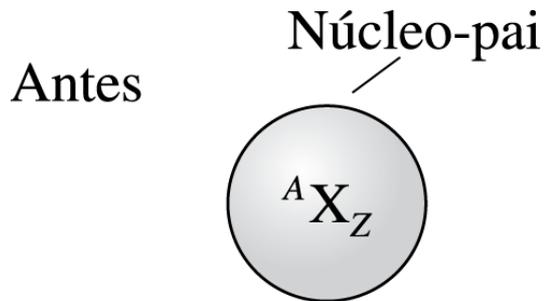
| Engole | Bolso | Mão |
|----------|----------|----------|
| α | β | γ |
| β | α | γ |
| β | γ | α |
| γ | α | β |

TABELA 43.3 Os três tipos de radiação

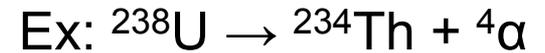
| Radiação | Identificação | Carga | Blindada por |
|----------------|---------------------------|-------|--------------------------------|
| Alfa, α | Núcleo de ${}^4\text{He}$ | $+2e$ | Folha de papel |
| Beta, β | Elétron | $-e$ | Folha de alumínio de alguns mm |
| Gama, γ | Fóton de alta energia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



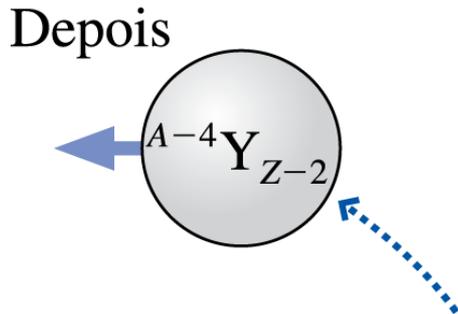
A partícula alfa, um núcleo rápido de hélio, leva consigo a maior parte da energia liberada durante o decaimento.



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

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

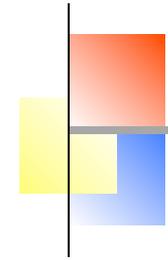
$$m_{\text{He}} = 4,0026\text{u}$$



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

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

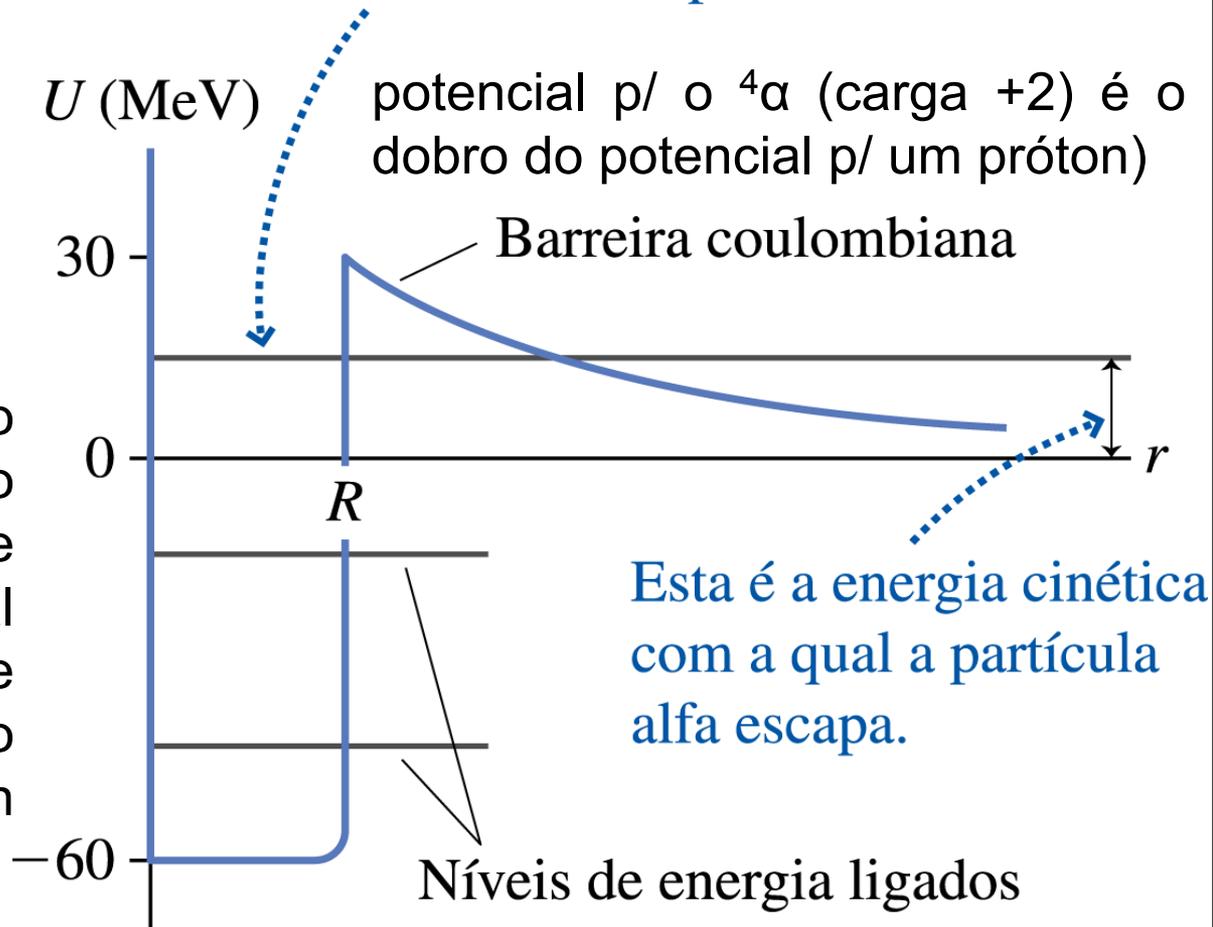
Decaimento alfa (α)



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

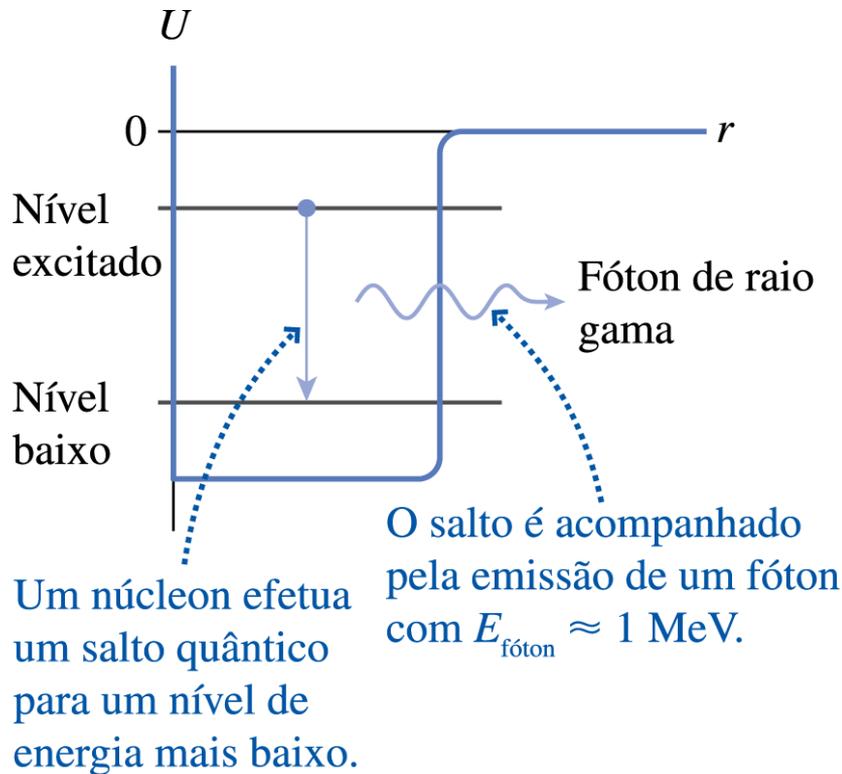
Mecanismo: **tunelamento** através da barreira Coulombiana

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!

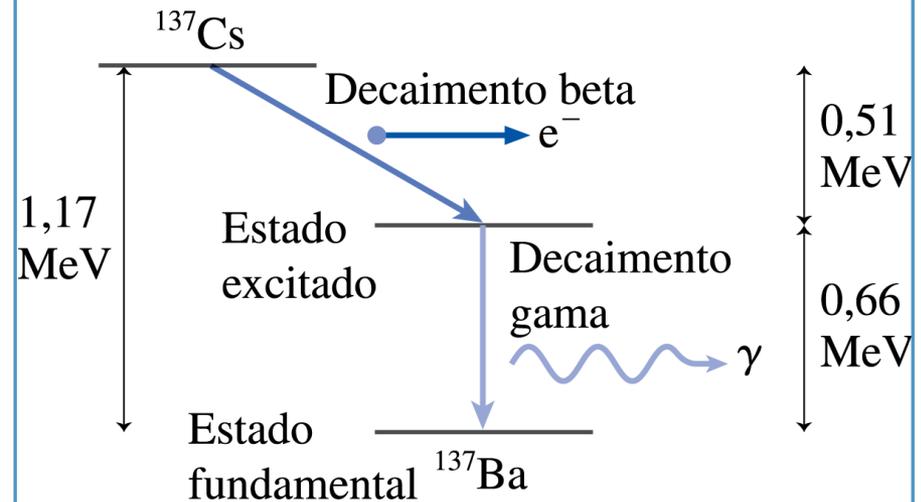


Decaimento Gama (γ)

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



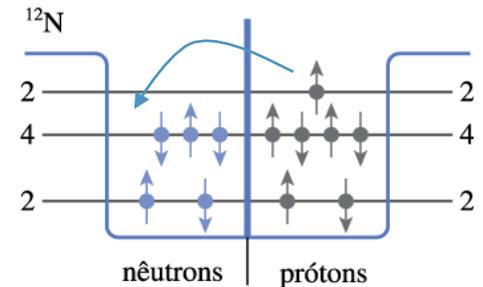
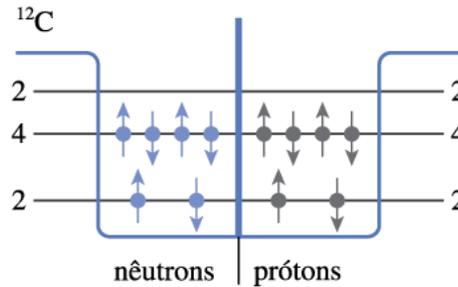
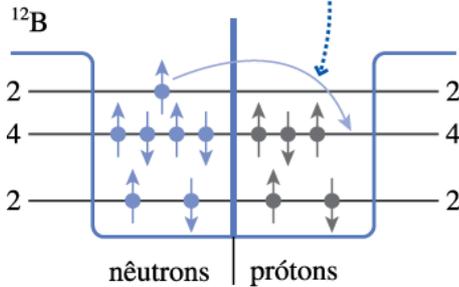
Em geral ocorre logo após um decaimento α ou β que deixa o núcleo 'filho' num estado excitado



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

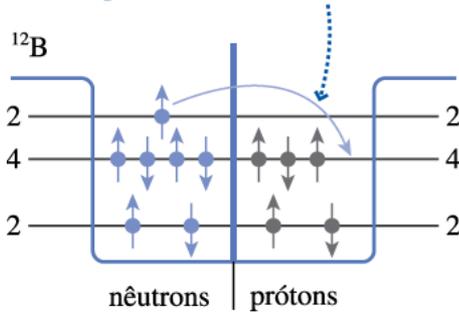


Como se comparam as massas do Nitrogênio 12 ($^{12}_7\text{N}$) e do Carbono 12 ($^{12}_6\text{C}$) ?

- A) A do Nitrogênio 12 é maior
- B) A do Carbono 12 é maior
- C) Os dois têm massas iguais

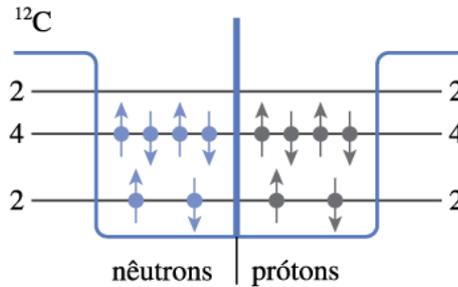
Decaimento Beta (β)

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

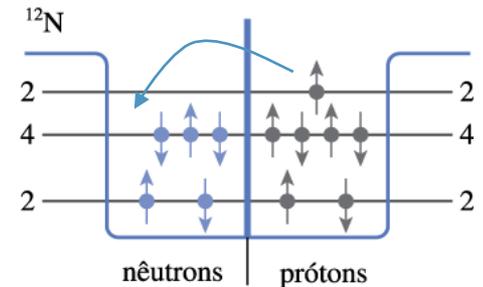


$$m_{\text{B}12} = 12.01435 \text{ u}$$

e pode! Decaimento Beta



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

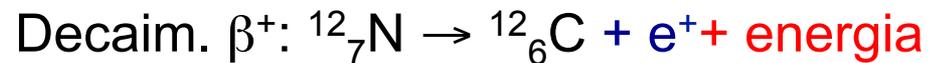
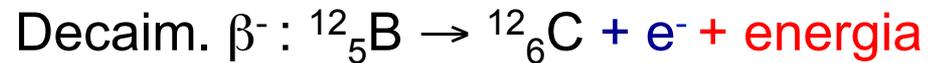


$$m_{\text{N}12} = 12.01861 \text{ u}$$

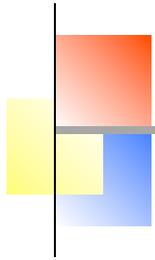
Como se comparam as massas do Nitrogênio 12 ($^{12}_7\text{N}$) e do Carbono 12 ($^{12}_6\text{C}$) ?

- A) A do Nitrogênio-12 é maior
- B) A do Carbono-12 é maior
- C) Os dois têm massas iguais

Decaimento Beta: emissão de um elétron (e^-), ou de um pósitron (e^+)



Decaimento Beta (β)



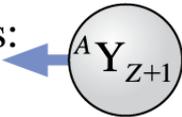
(a) Decaimento beta-menos

Antes:



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

Depois:



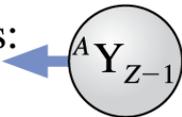
(b) Decaimento beta-mais

Antes:



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

Depois:

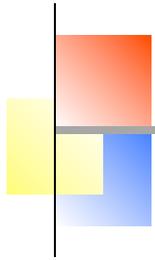


| Partícula | Símbolo | Massa (u) | Massa (MeV/c^2) |
|-----------|---------|-----------|----------------------------|
| Elétron | e | 0,00055 | 0,51 |
| Próton | p | 1,00728 | 938,28 |
| Nêutron | n | 1,00866 | 939,57 |

É possível ocorrer decaimento β^- de um nêutron isolado (fora de um núcleo)? E decaimento β^+ de um próton isolado?

- A) Sim e Sim C) Não e Sim
 B) Sim e Não D) Não e Não

Decaimento Beta (β)



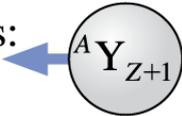
(a) Decaimento beta-menos

Antes:



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

Depois:



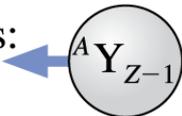
(b) Decaimento beta-mais

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 |

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

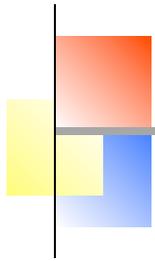
É possível ocorrer decaimento β^- de um nêutron isolado (fora de um núcleo)? E decaimento β^+ de um próton isolado?

- A) Sim e Sim C) Não e Sim
 B) Sim e Não D) Não e Não

Nêutrons isolados decaem após aprox. 10 minutos!

Mas prótons isolados são infinitamente estáveis (até onde se sabe) !

Decaimento Beta (β)

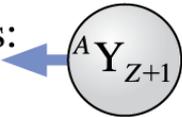


(a) Decaimento beta-menos

Antes:



Depois:



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

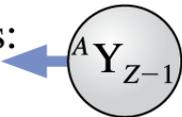


(b) Decaimento beta-mais

Antes:



Depois:



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



O decaimento β^+ de um núcleo A_ZX para ${}^A_{Z-1}Y$ só é possível se $m_X > m_Y + m_e$.

Como $m_p < m_n$, então para isto acontecer a energia de ligação de Y precisa ser bem maior que a de X

Compare ${}^{12}_7N$ e ${}^{12}_6C$:

$$m_{C12} = 12.0000 \text{ u}$$

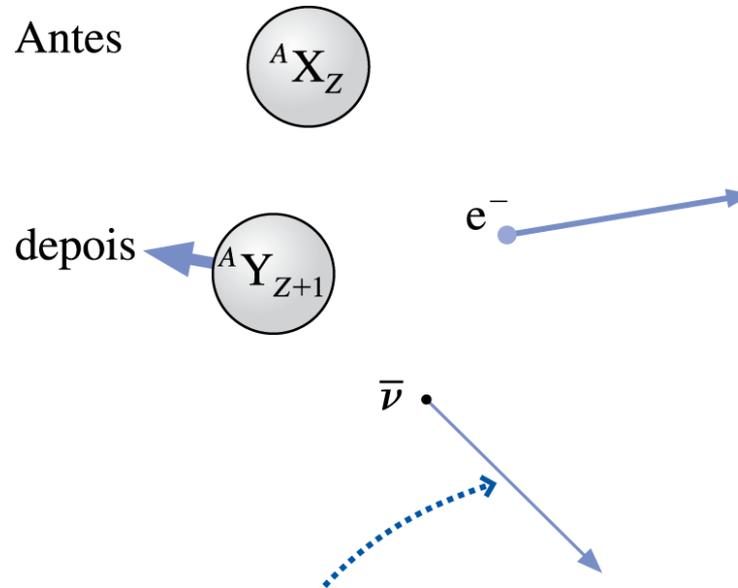
$$m_{N12} = 12.01861 \text{ u}$$

$$\begin{aligned} B_{N12} &= (7m_p + 5m_n - m_{N12})c^2 \\ &= (0,0757\text{u})c^2 = 70,5 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_{C12} &= (6m_p + 6m_n - m_{C12})c^2 \\ &= (0,0956\text{u})c^2 = 89 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Decaimento β e a força nuclear fraca

Na realidade é mais complicado....

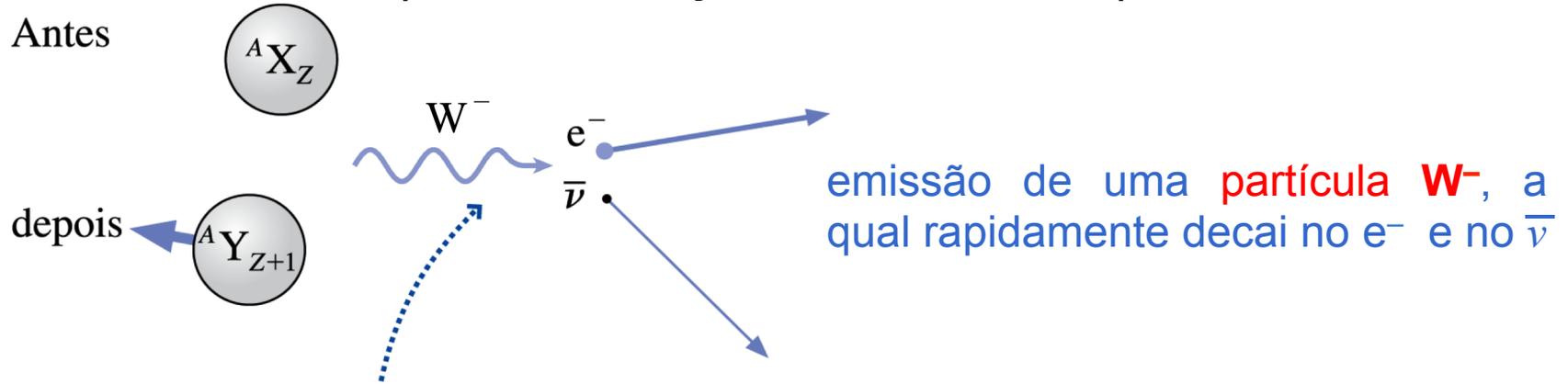


Um (*anti*)*neutrino* também é criado, levando parte da energia e momentum do nêutron original. Essa partícula é muito difícil de detectar, pois não tem carga e sua massa é (pelo menos) 100000 vezes menor que a do elétron.

Decaimento β e a força nuclear fraca

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

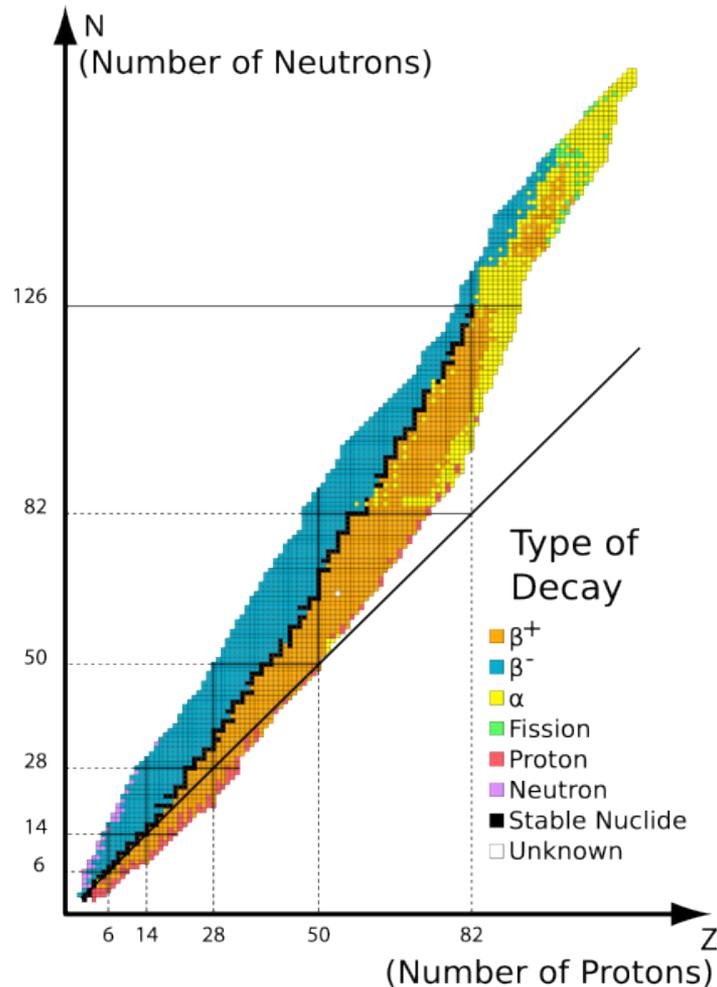
obs: este slide é para 'informação cultural', não é parte da matéria



- As partículas W^- são análogas aos fótons, mas ao invés de transmitirem a força eletromagnética, transmitem a chamada **força nuclear fraca**
- Existem outras duas 'versões' desta partícula, chamadas W^+ (positiva, emitida no decaimento β^+) e Z (neutra, responsável pela interação entre neutrinos e elétrons). A existência de todas elas foi confirmada em 1983, no CERN.
- Assim como as forças elétrica e magnética são aspectos de uma única interação (o eletromagnetismo), a força nuclear fraca e as forças eletromagnéticas também são aspectos de uma mesma interação unificada, chamada **interação eletrofraca** (mas isso já é outra história...).

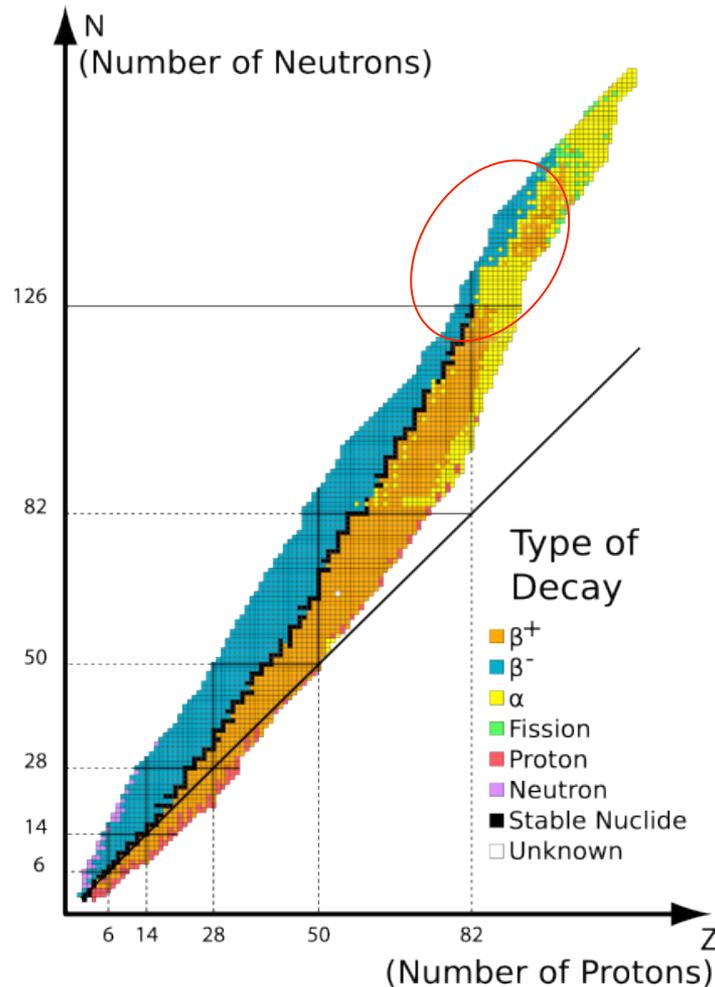
Decaimento nuclear: visão global

Classificação dos núcleos de acordo com seu mecanismo principal de decaimento



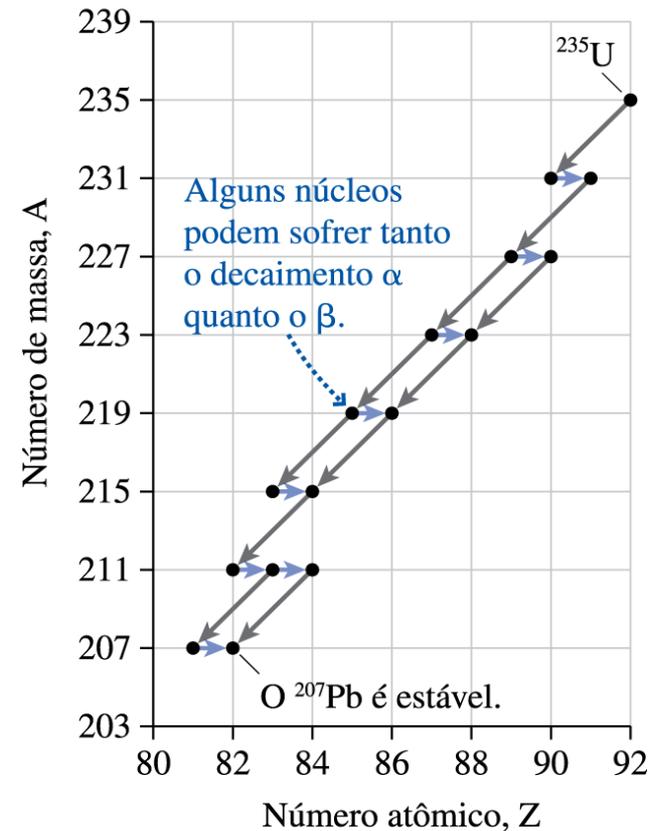
Decaimento nuclear: visão global

Classificação dos núcleos de acordo com seu mecanismo principal de decaimento

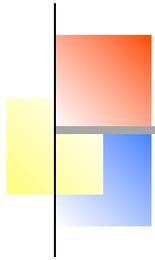


Sequências de decaimentos

↙ 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

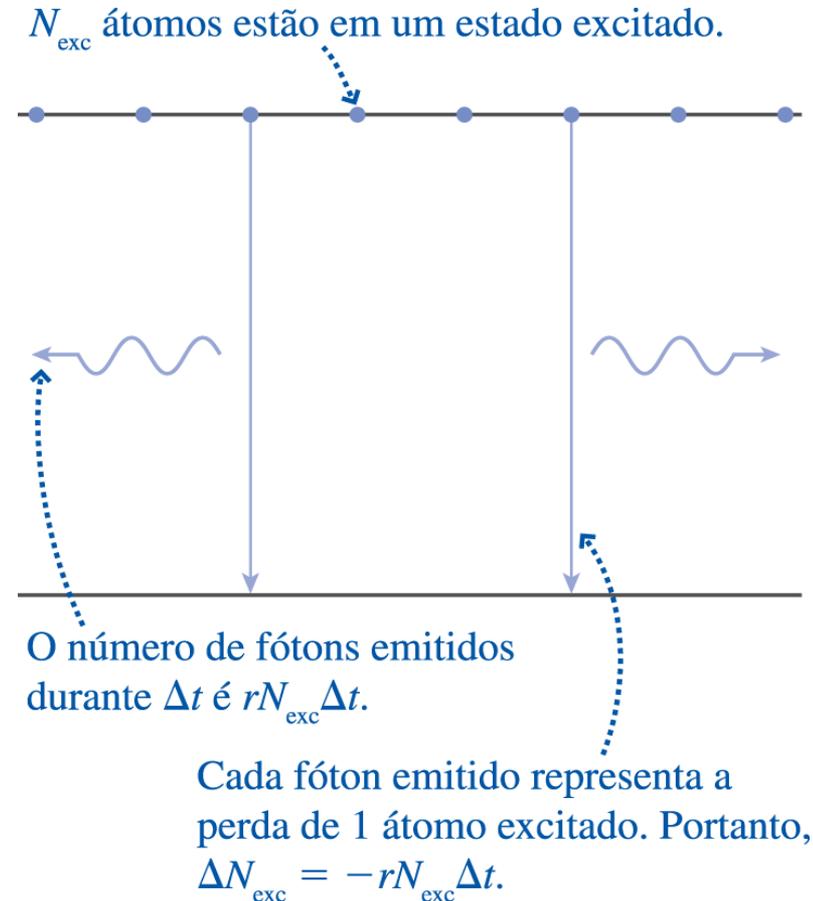


- Um átomo excitado emitirá um fóton espontaneamente, em um instante **aleatório**
- Se o átomo ainda não tiver emitido até o instante t , a **probabilidade** de emitir no intervalo dt seguinte é $\mathbf{P} = r dt$, sendo r uma **taxa de relaxação** que varia de transição p/ transição.

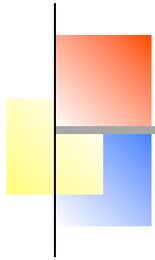
Eq. de Relaxação:
$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

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

tipicamente: desde ms até ns.



Decaimento nuclear: vida média

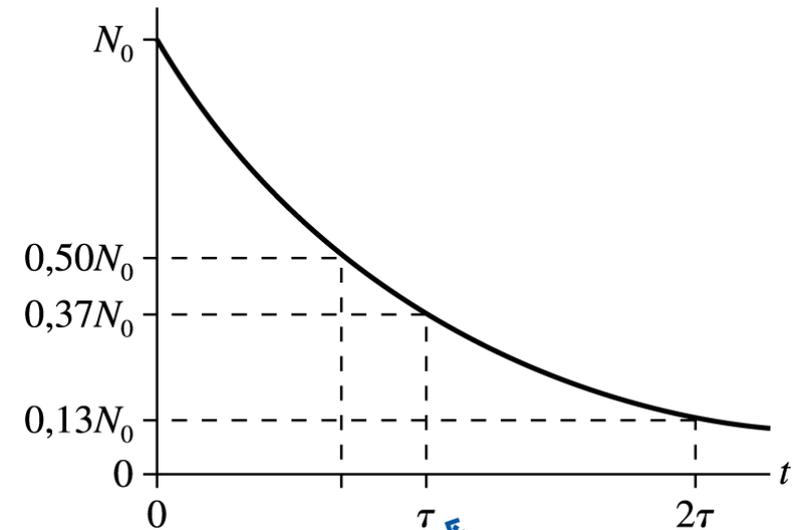


- Um **núcleo instável** emitirá uma **partícula α, β ou γ** espontaneamente, em um instante **aleatório**
- Se o núcleo ainda não tiver emitido até o instante t , a **probabilidade** de emitir no intervalo dt seguinte é **$P = r dt$** , sendo **r** uma **taxa de relaxação** que varia de transição p/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

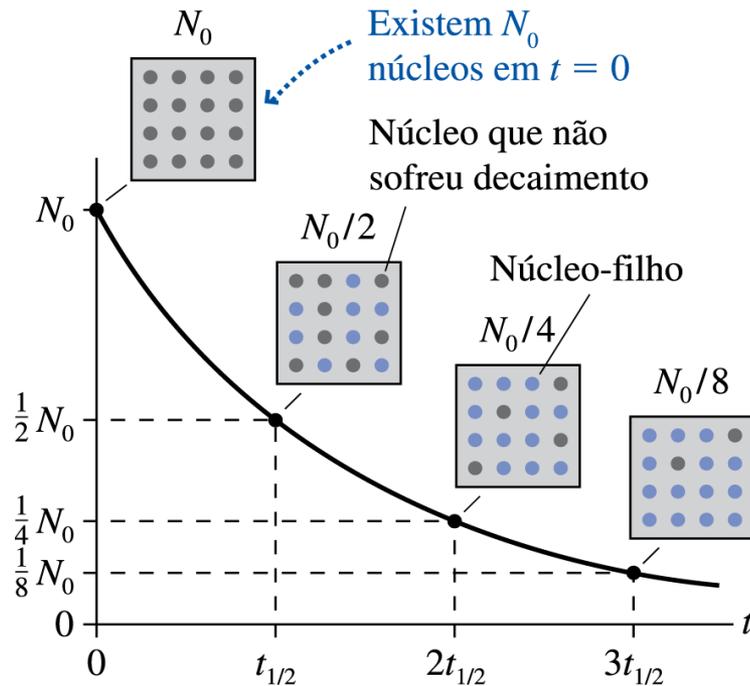


A constante de tempo é o instante de tempo em que o número de núcleos é e^{-1} , ou 37% do número inicial.

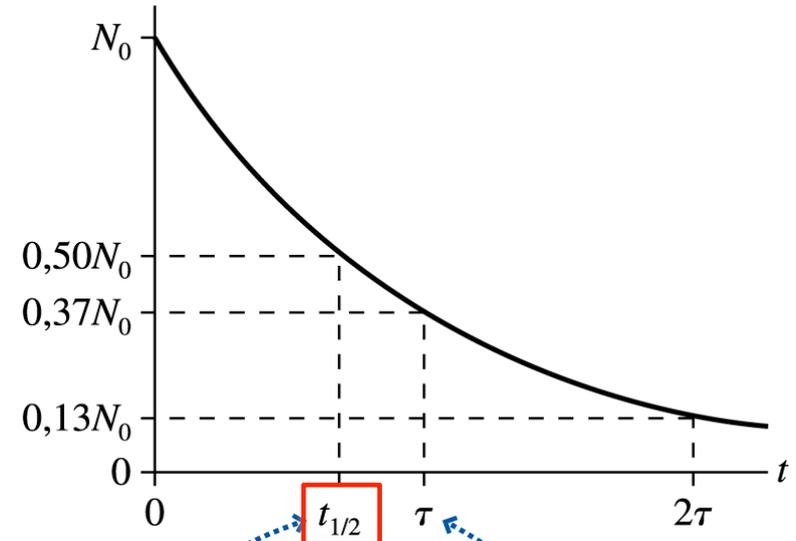
Decaimento nuclear: meia vida

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.

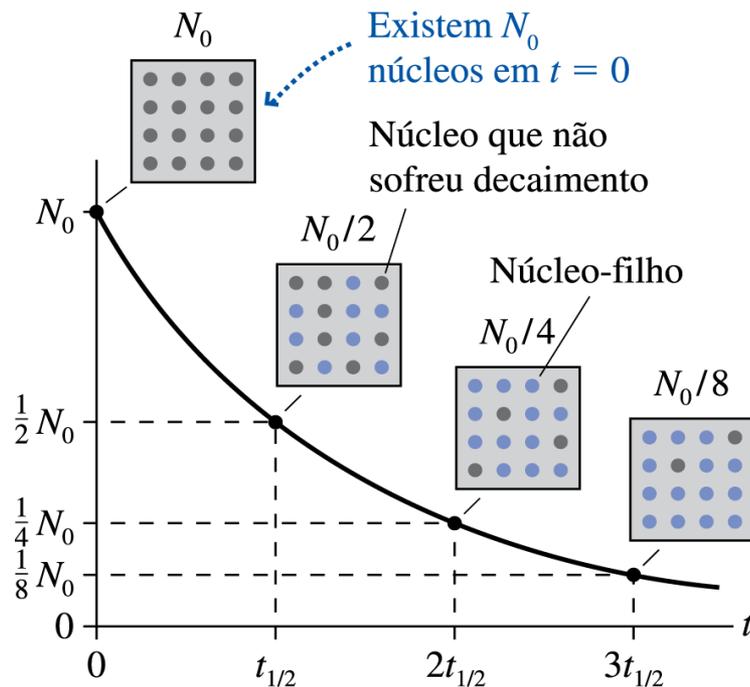
A constante de tempo é o instante de tempo em que o número de núcleos é e^{-1} , ou 37% do número inicial.

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

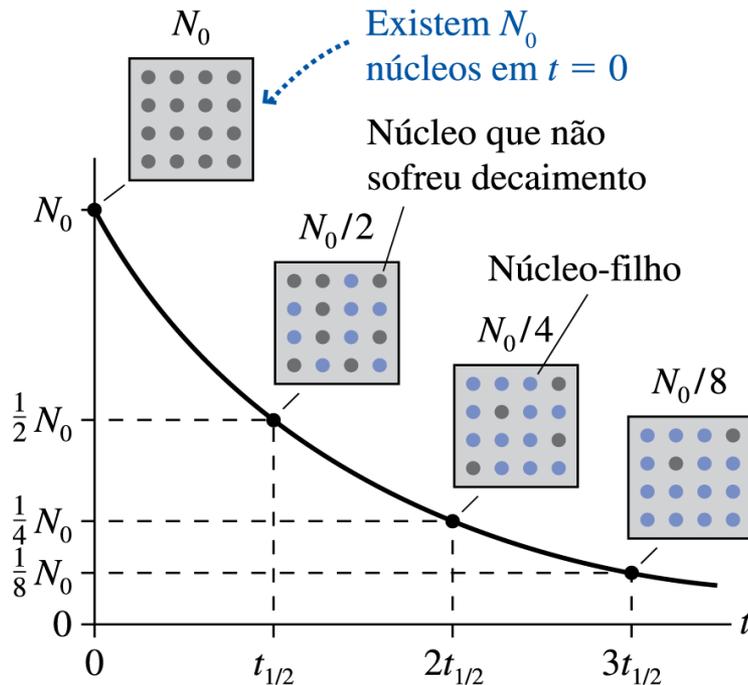
Urânio ^{238}U : 4,5 bilhões de anos

Obs: a atividade **A** de uma amostra = num. de decaimentos/s = $r N(t)$.
Unidade: 1 Bequerel (Bq) = 1 decaimento/s)

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

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

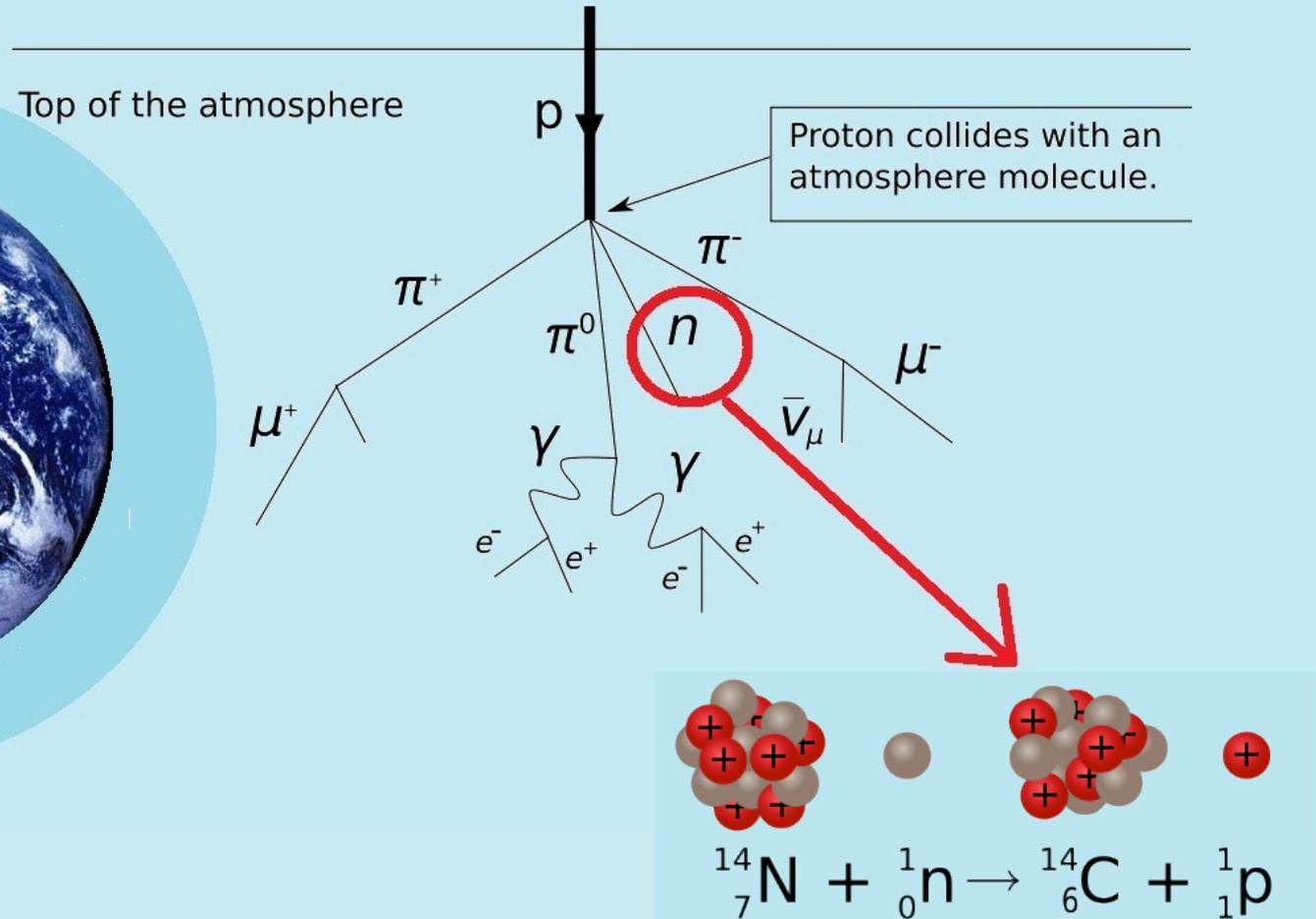
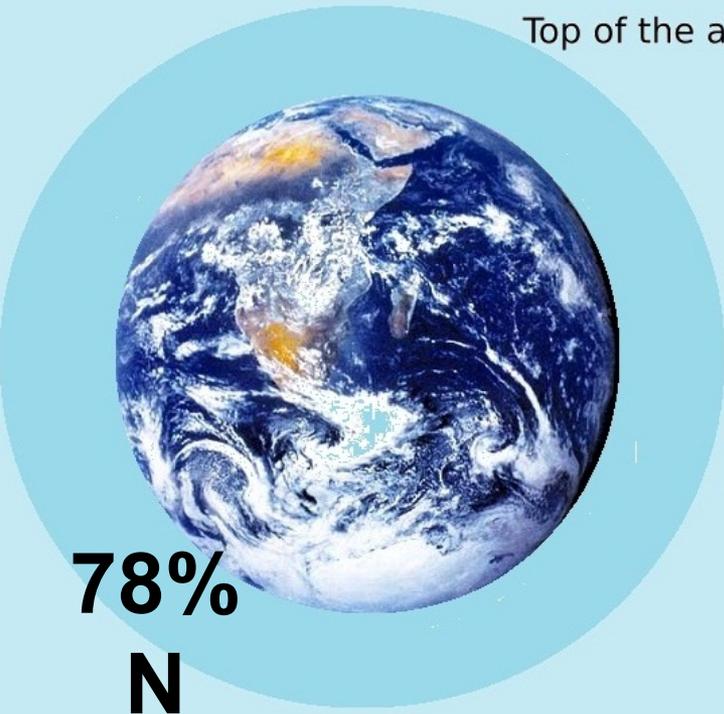
Se um detector mede hoje uma certa atividade A numa amostra de ^{137}Cs produzida há 15 anos, qual era sua atividade original?

- A) $2A$
- B) $Ae^{1/2}$
- C) $A/\sqrt{2}$
- D) $A \times \sqrt{2}$

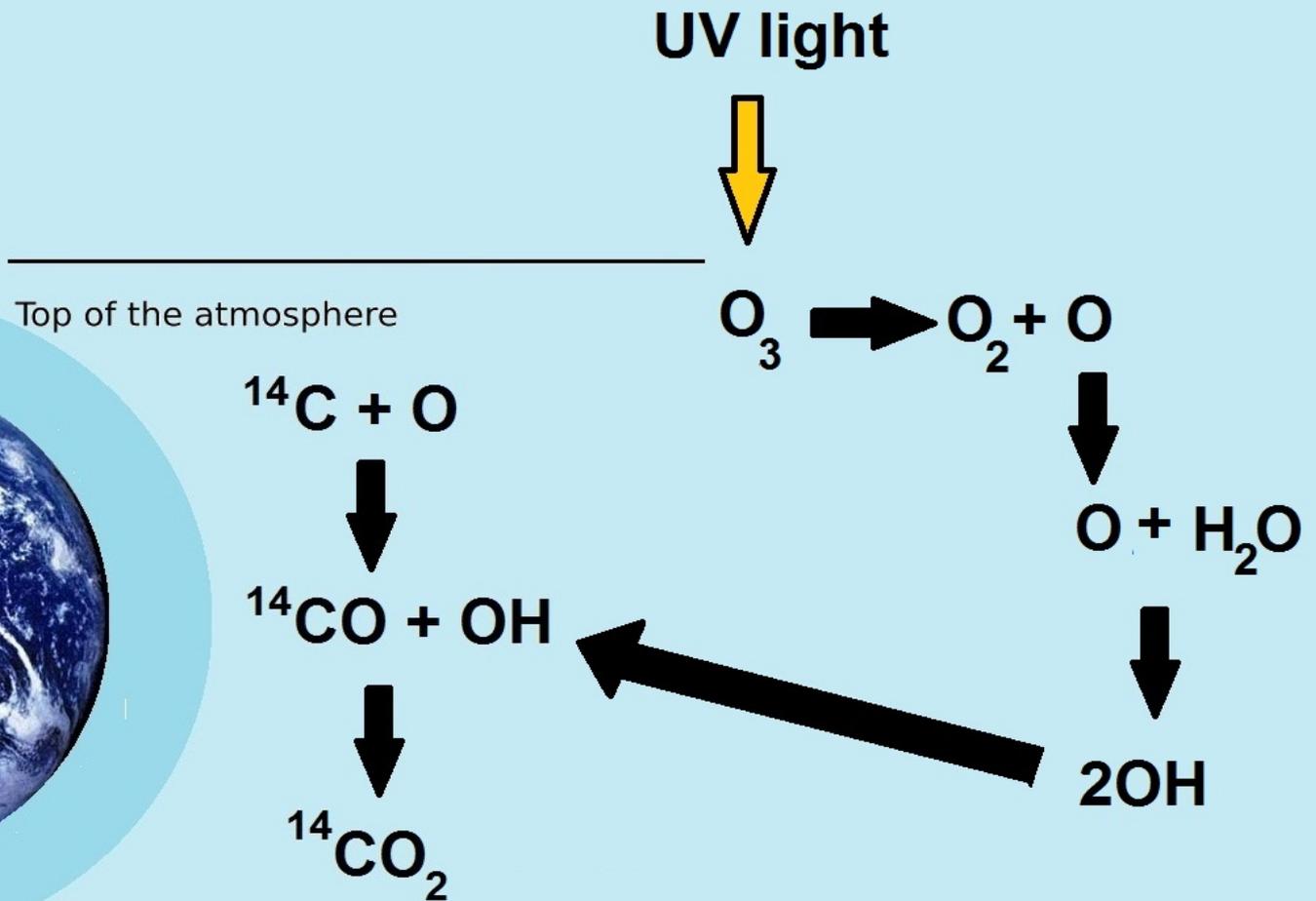
Obs: a atividade A de uma amostra = num. de decaimentos/s = $r N(t)$.
Unidade: 1 Bequerel (Bq) = 1 decaimento/s)

Produção de Radiocarbono (^{14}C)

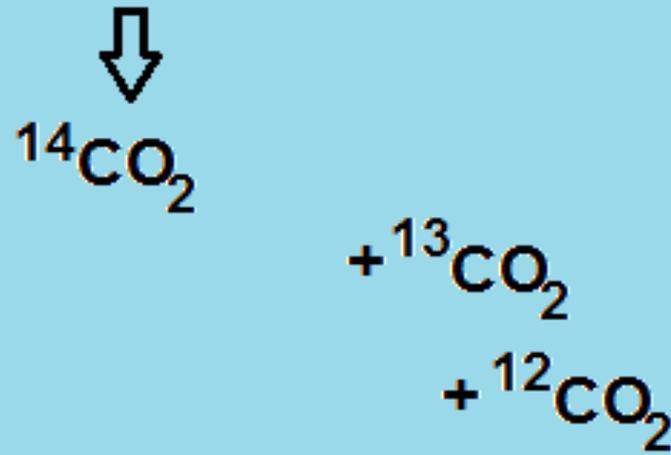
Origem: colisões de prótons energéticos vindo do espaço profundo (“raios cósmicos”) com nitrogênio na atmosfera



Produção de dióxido de carbono



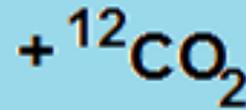
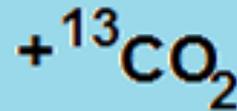
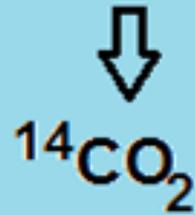
O ciclo do carbono



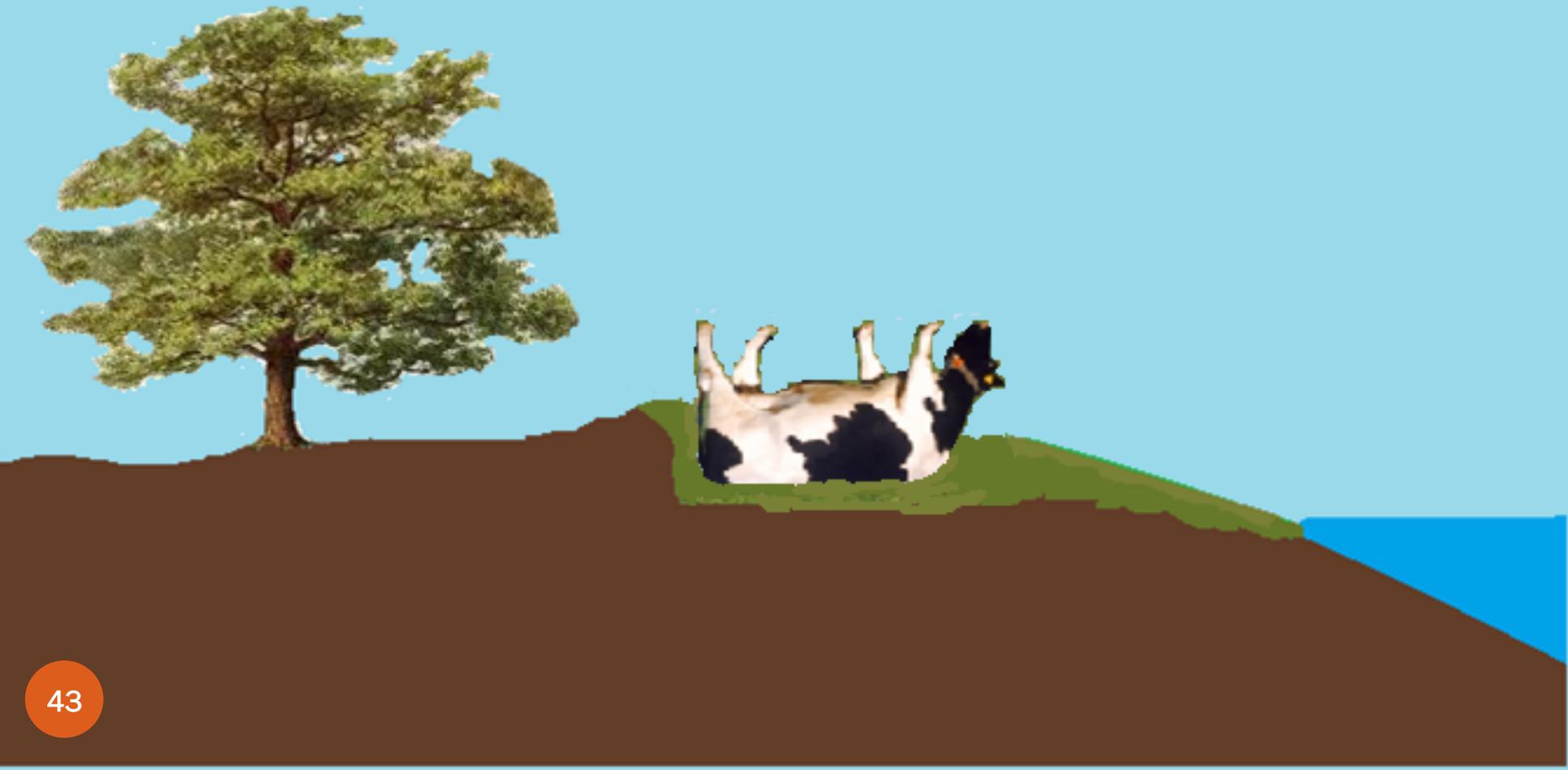
Equilíbrio: a produção compensa as perdas por decaimento

Proporção de equilíbrio (atual):

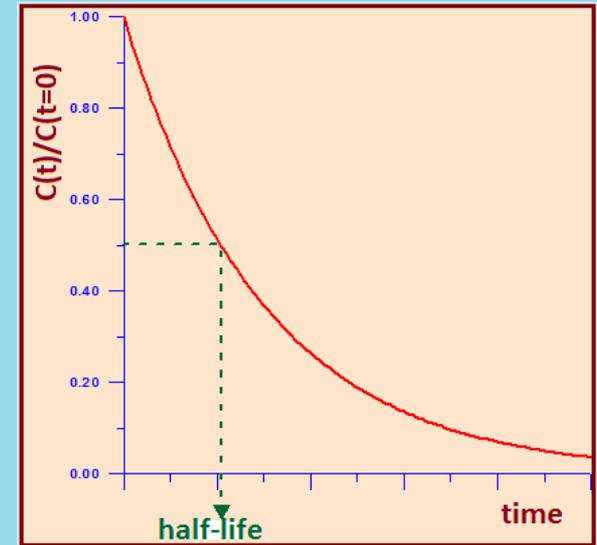
$$^{14}\text{C} / ^{12}\text{C} = 1,3 \times 10^{-12}$$



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)

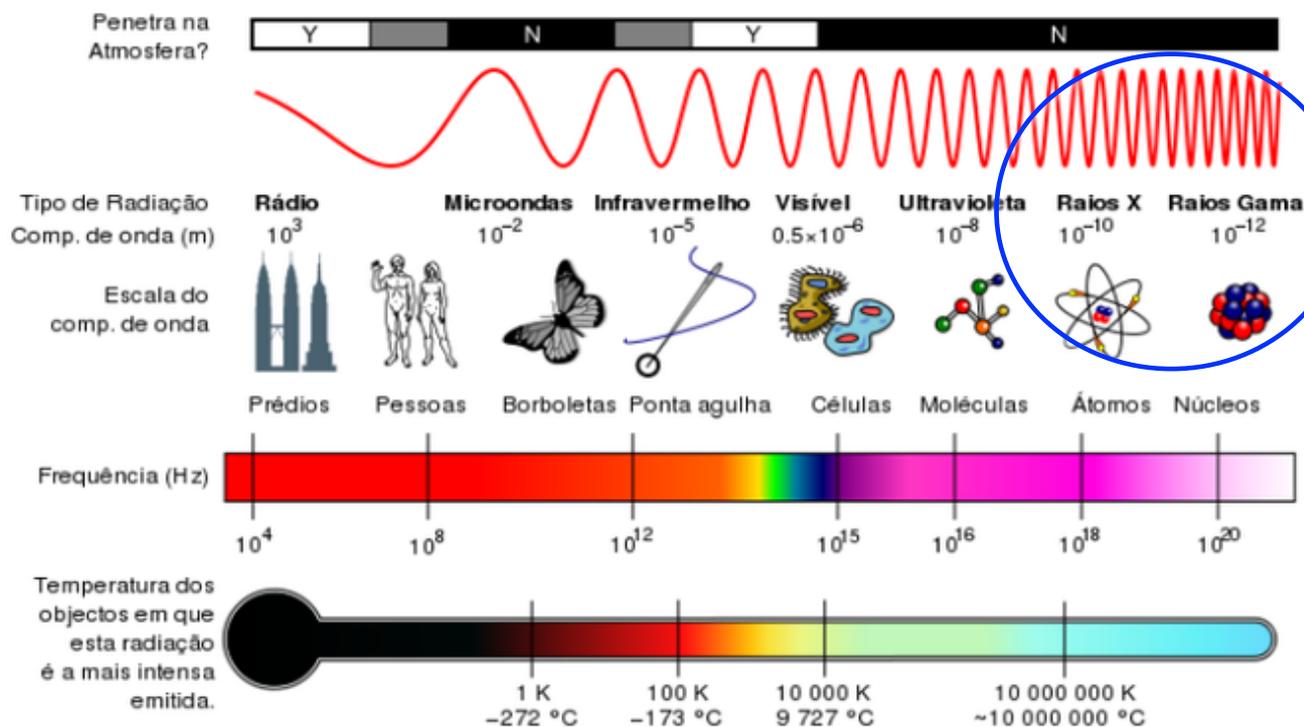
Arqueólogos encontram um pedaço de carvão de 5,0g proveniente de uma fogueira acesa por caçadores pré-históricos. A amostra tem atividade de 0,35 Bq devidos ao ^{14}C . Qual a sua idade?

1. Meia-vida: $t_{1/2} = 5730 \text{ anos} = 1,807 \times 10^{11} \text{ s} \rightarrow r = \ln 2 / t_{1/2} = 3,84 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$
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

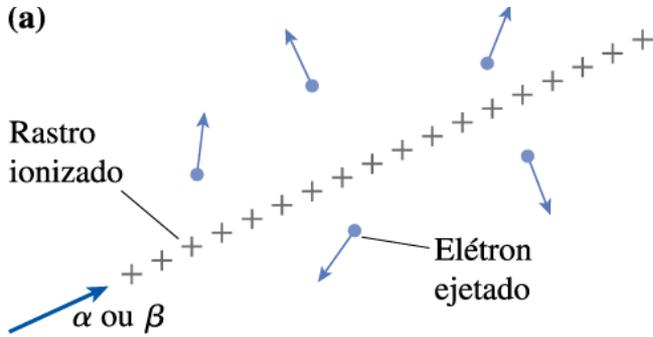
Raios-X e radiações nucleares α, β, γ são **Radiações ionizantes**: devido à sua alta energia, podem ionizar a matéria e romper ligações moleculares.

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

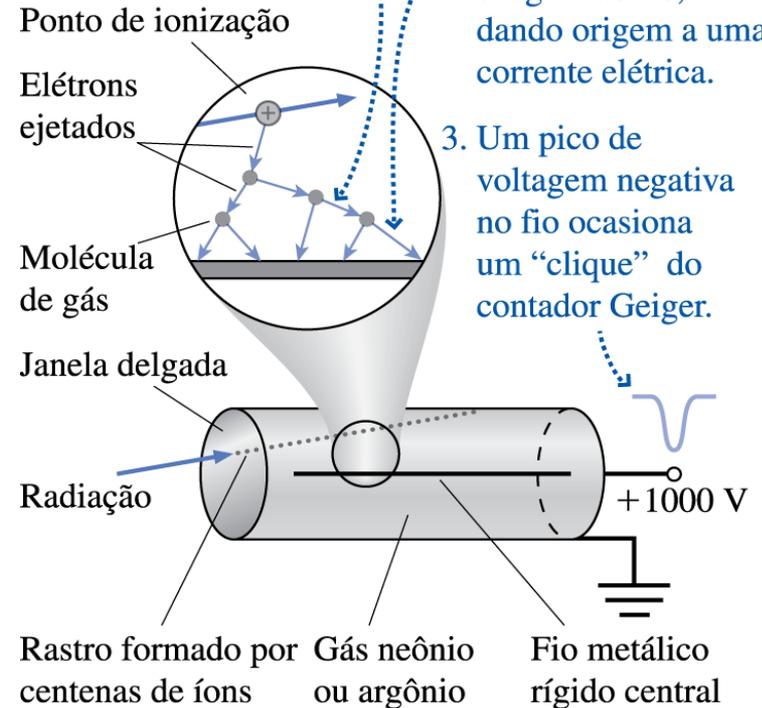


(raios- γ podem, de acordo com sua energia, gerar efeitos semelhantes, ou sofrer outros processos, como absorção)

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

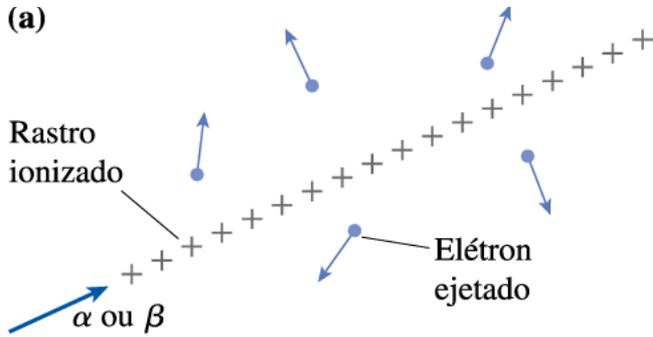
Detector (Contador Geiger):
mede a atividade A da amostra

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

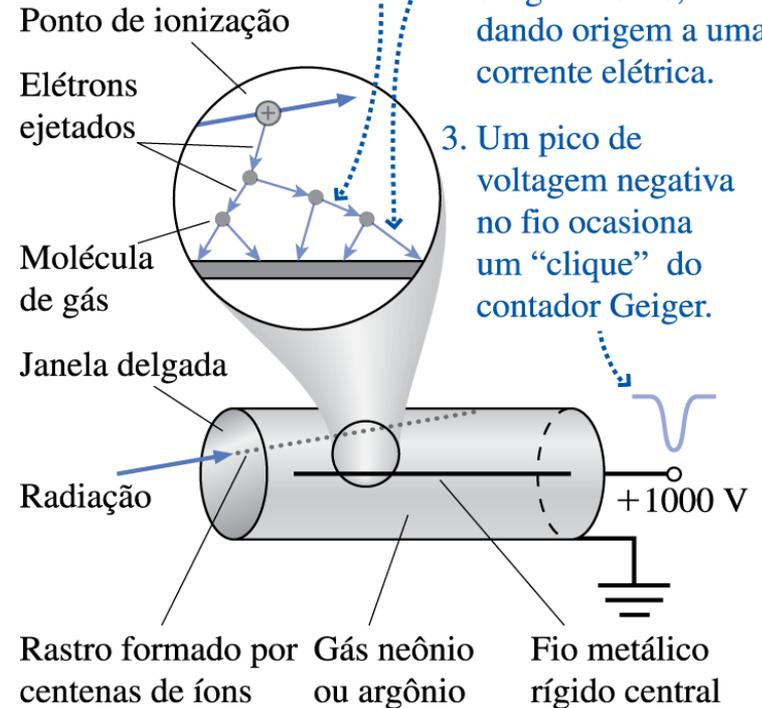


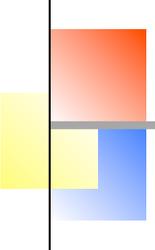
(raios- γ podem, de acordo com sua energia, gerar efeitos semelhantes, ou sofrer outros processos, como absorção)

Uma pessoa ou objeto 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):
mede a atividade A da amostra

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.

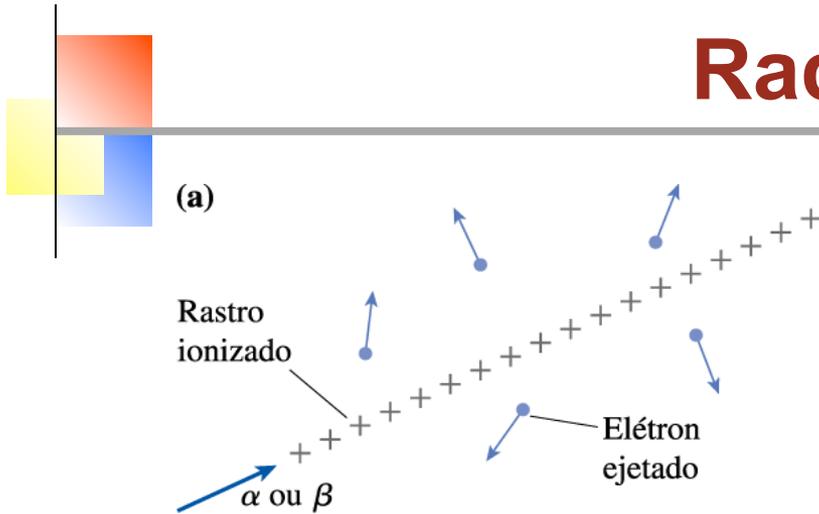




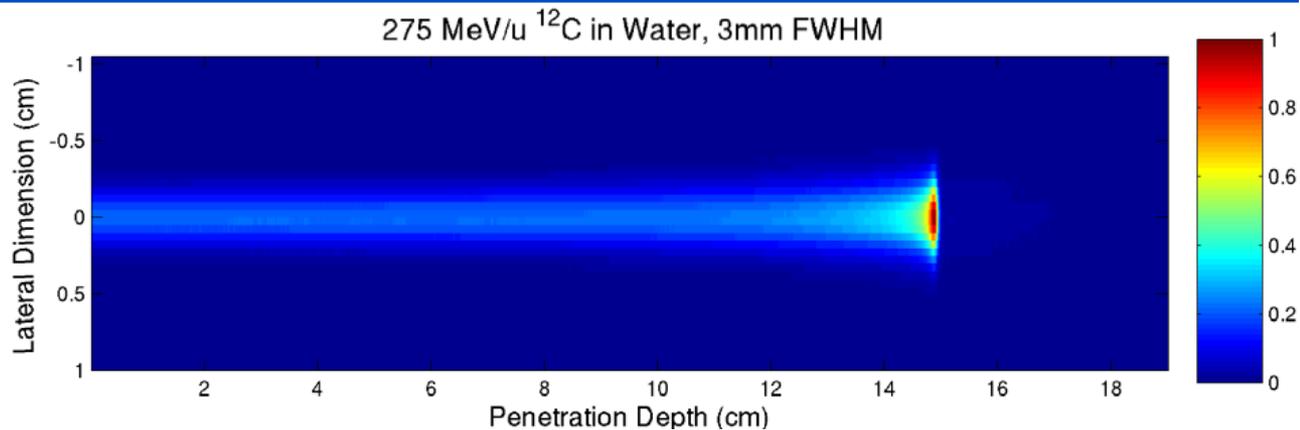
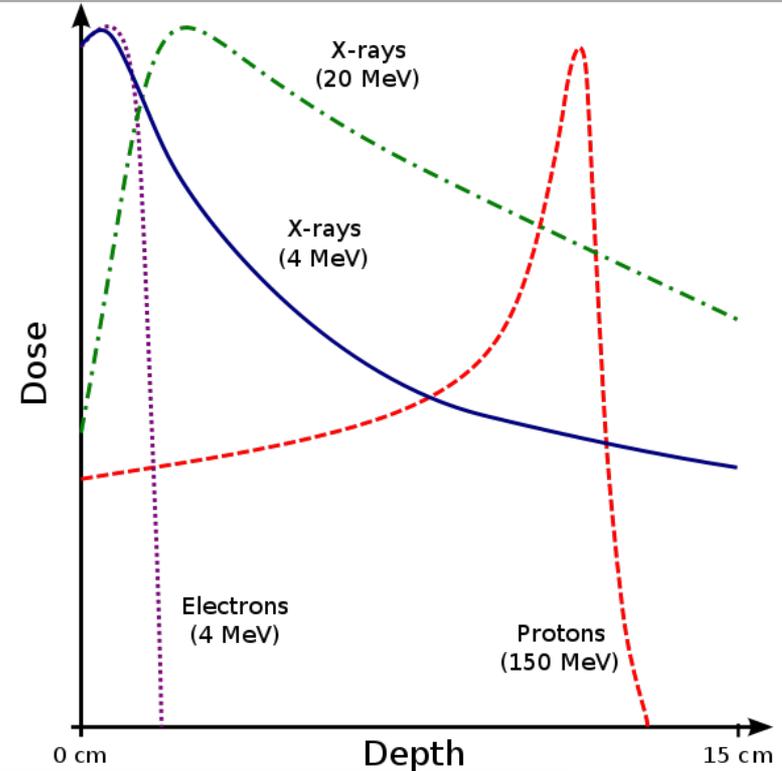
Radioterapia

- **Radiação (p.ex. íons) penetra no corpo**
- **Objetivo: destruir células cancerosas**
- **Interação com tecido ao redor**
- **O que acontece?**

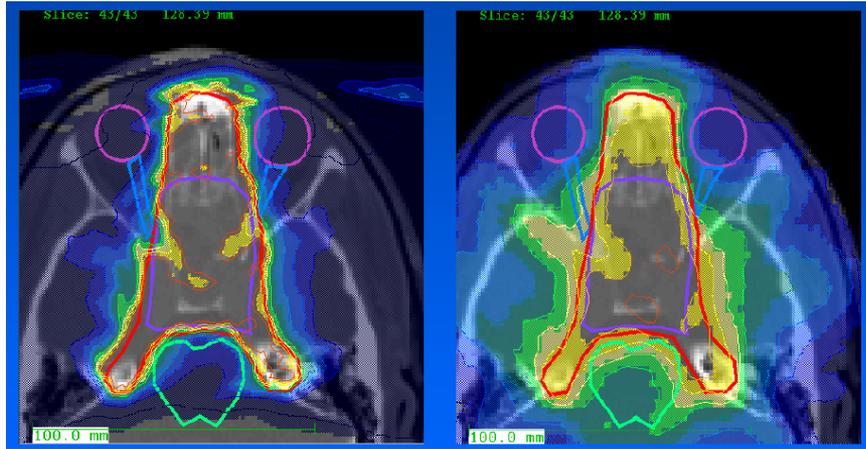
Radioterapia



Diferentes tipos de radiação têm maior chance de colidir e depositar sua energia em profundidades distintas

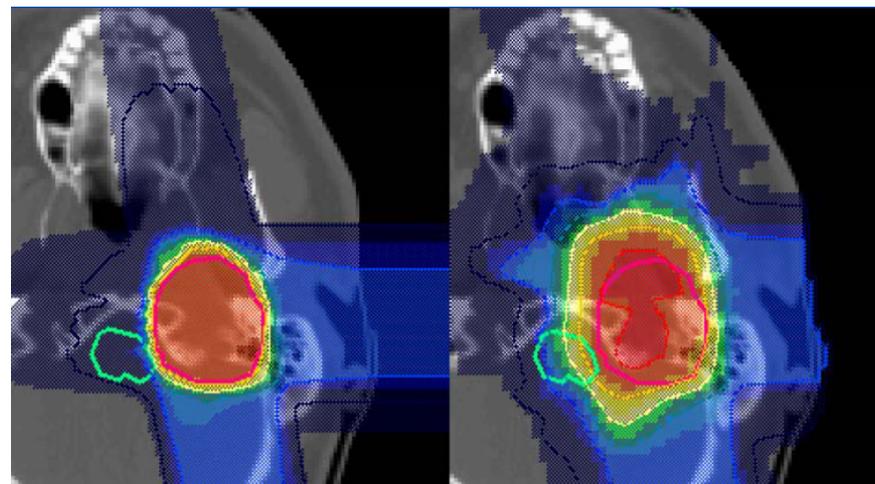
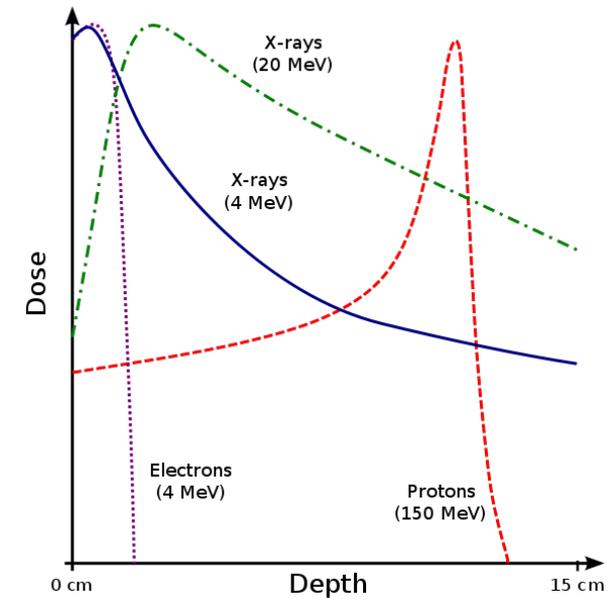


Radioterapia com núcleos (última geração)



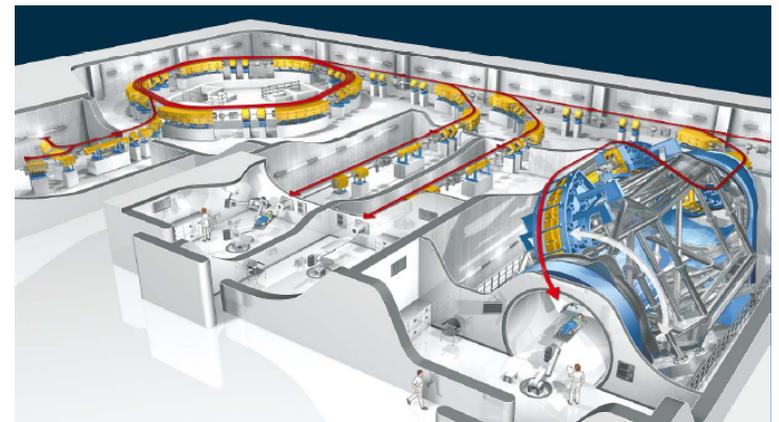
Carbono - 3 Campos

Fótons - 9 Campos



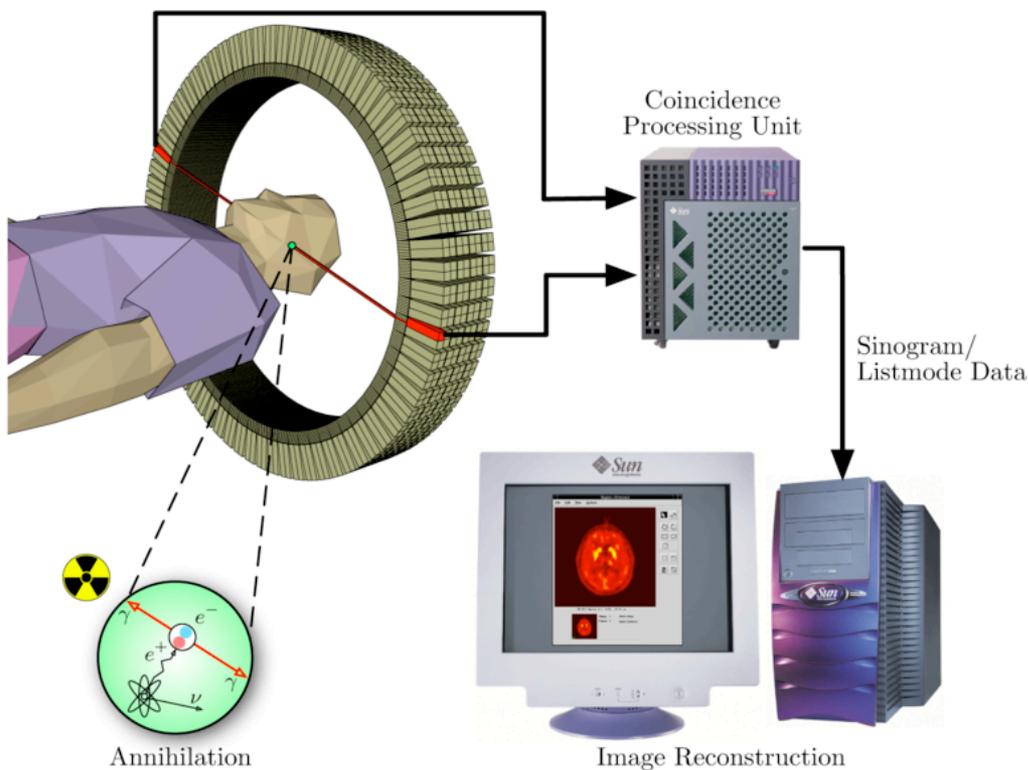
Carbono

Prótons

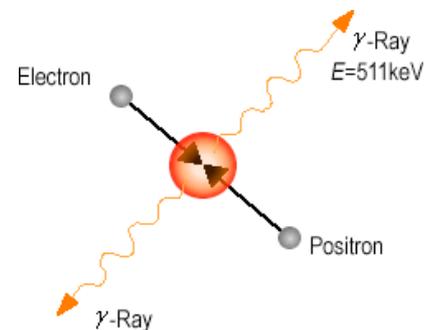


Heidelberg Ion Therapy Center

Tomografia por emissão de pósitrons



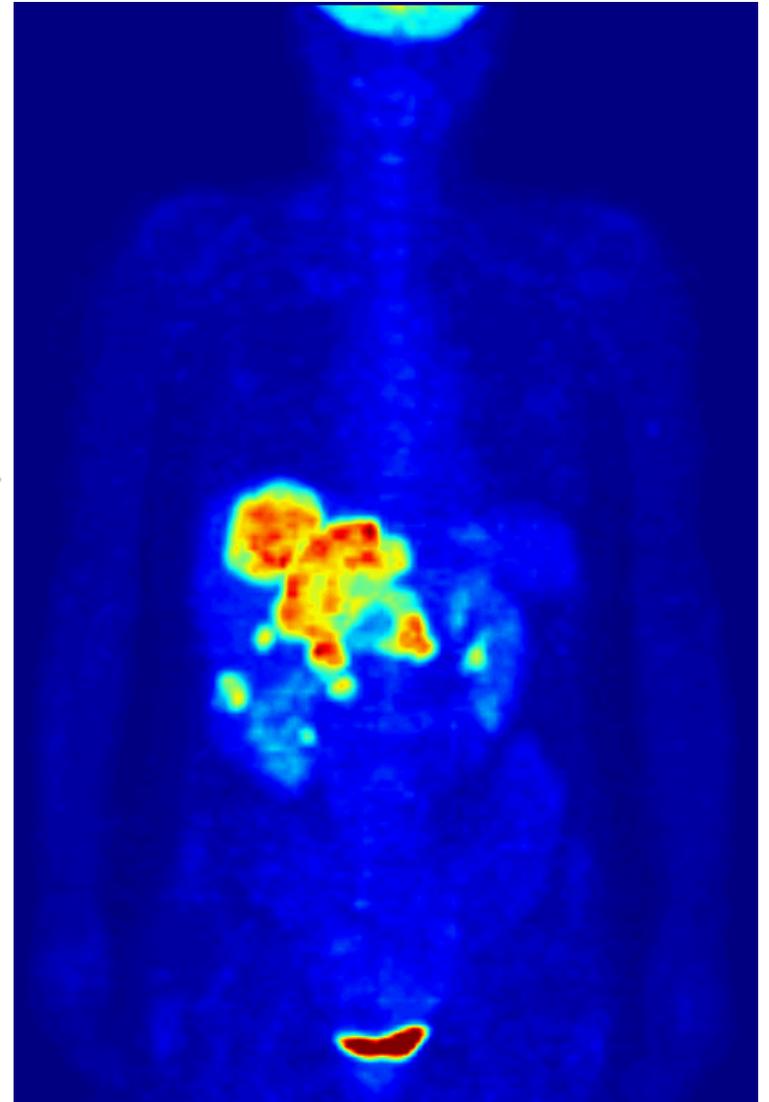
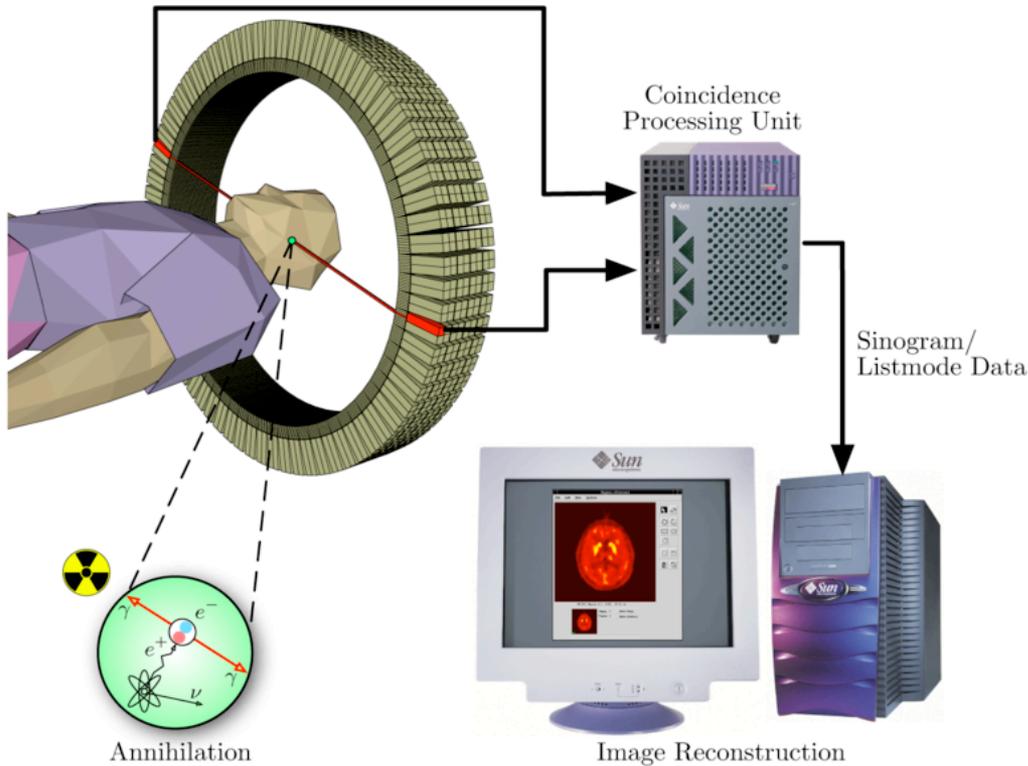
- A pessoa ingere um composto radioativo ('traçador') que se acumula preferencialmente em certos tecidos.
- Após o traçador sofrer decaimento β^+ , o pósitron e^+ produzido se aniquila com um elétron do corpo, produzindo um sinal característico de 2 raios- γ .



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

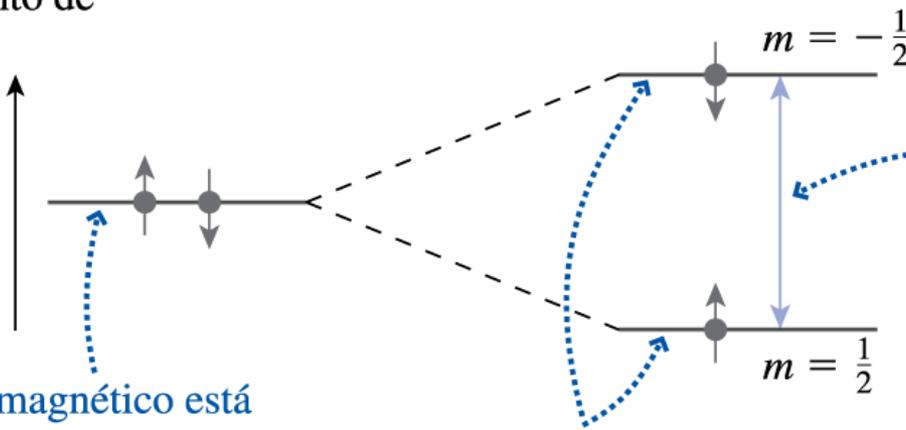
- Detectando os raios em coincidência, determina-se o ponto de origem

Tomografia por emissão de pósitrons



Ressonância Magnética (Nuclear)

(a) Aumento de energia



Spin down, anti-alinhado com o campo

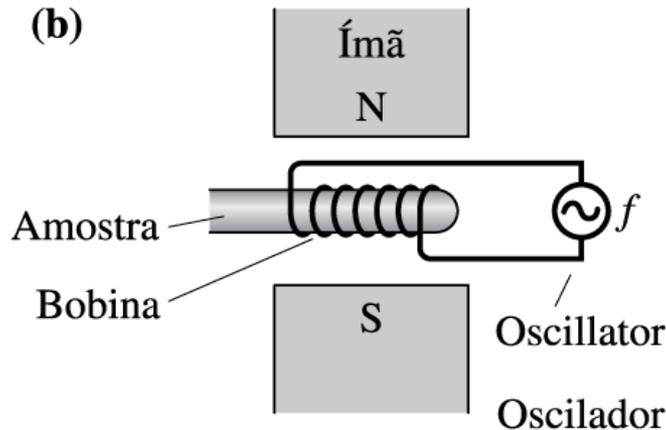
Fótons de radiofrequência fazem cada próton ir e vir entre estes dois níveis de energia.

Spin up, alinhado com o campo

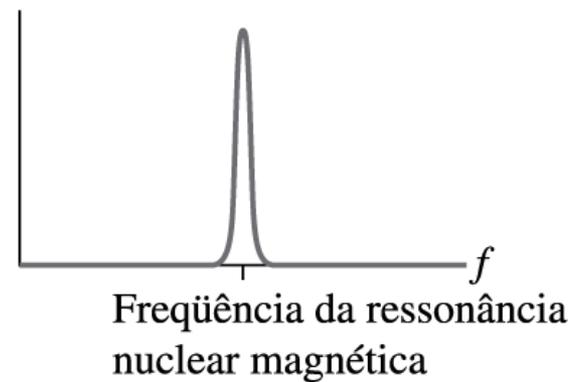
O campo magnético está desligado. Os prótons com *spin up* e com *spin down* possuem a mesma energia.

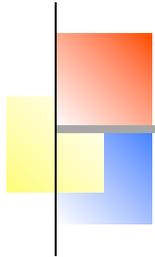
Estes são os níveis de energia quando o campo magnético está ligado.

(b)



Absorção





Ressonância Magnética (Nuclear)

Cada tecido tem frequências ressonantes ligeiramente diferentes (conhecidas)

Colocando o corpo como um todo em um campo magnético estático inhomogêneo, essas frequências variam 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

