



INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Disciplina: Física IV – Física Moderna

Instrutor: Prof. Carlos Eduardo Souza - Cadu

Sala: A2-15 (IF, andar 1P)

Email: carlooseduardosouza@id.uff.br

Site do curso: http://cursos.if.uff.br/fisicaIV_XXI_0216/



Disciplina: Física IV – Física Moderna

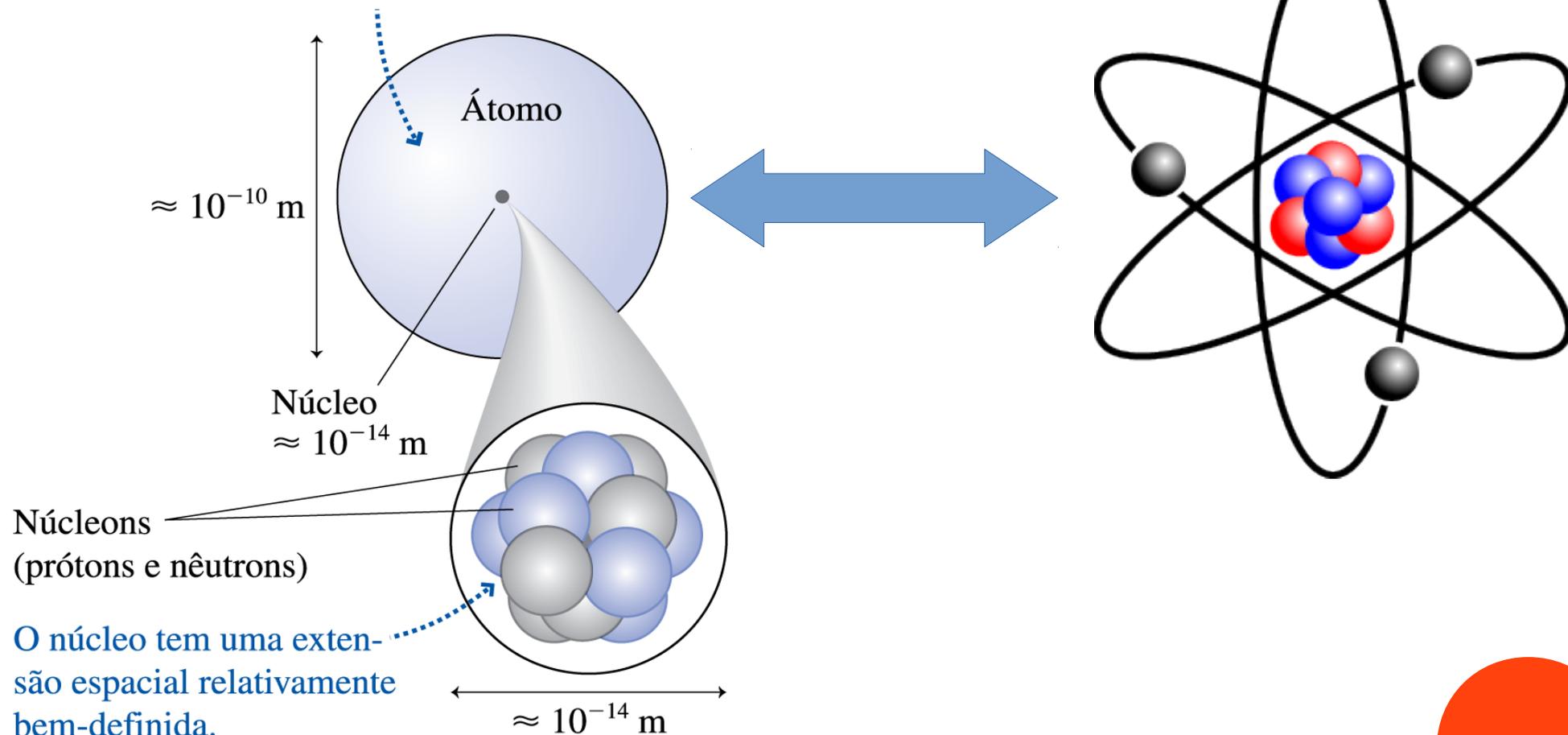
Capítulo 42

Física Nuclear



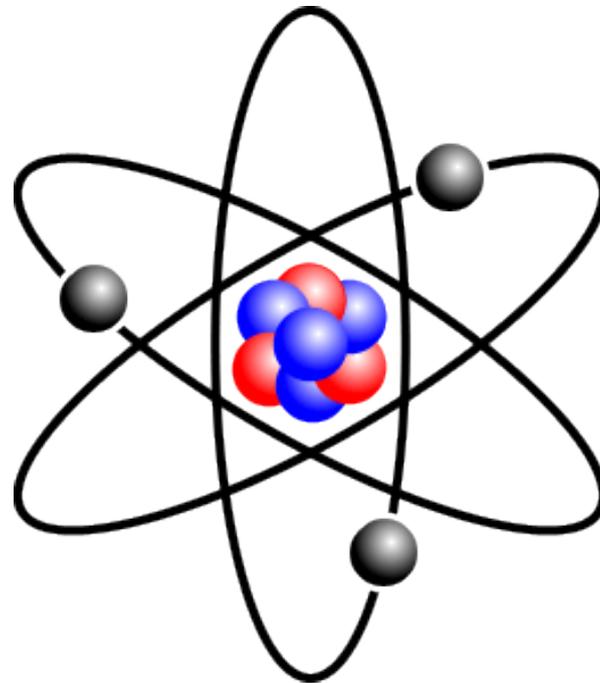
Estrutura Nuclear: Modelo planetário de Rutherford

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





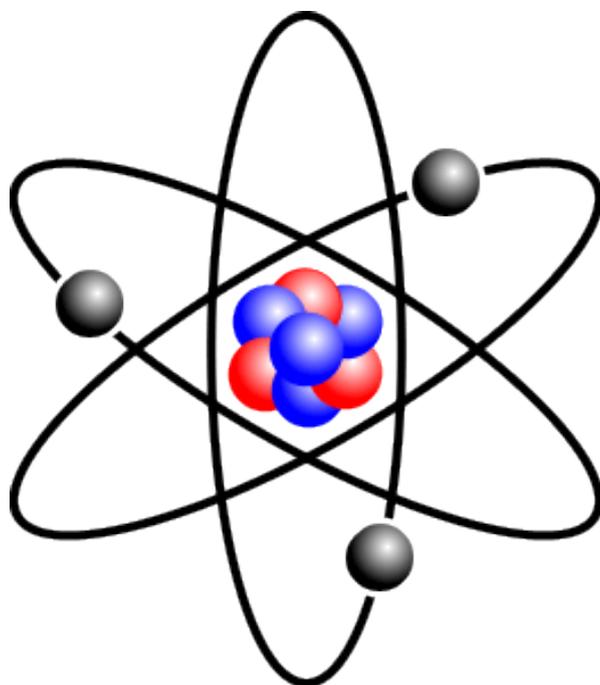
Estrutura Nuclear: Modelo planetário de Rutherford



Por que os núcleos permanecem coesos?



Estrutura Nuclear: Modelo planetário de Rutherford



Por que os núcleos permanecem coesos?
A resposta a essa questão pode vir da
observação das medidas experimentais...



Disciplina: Física IV – Física Moderna

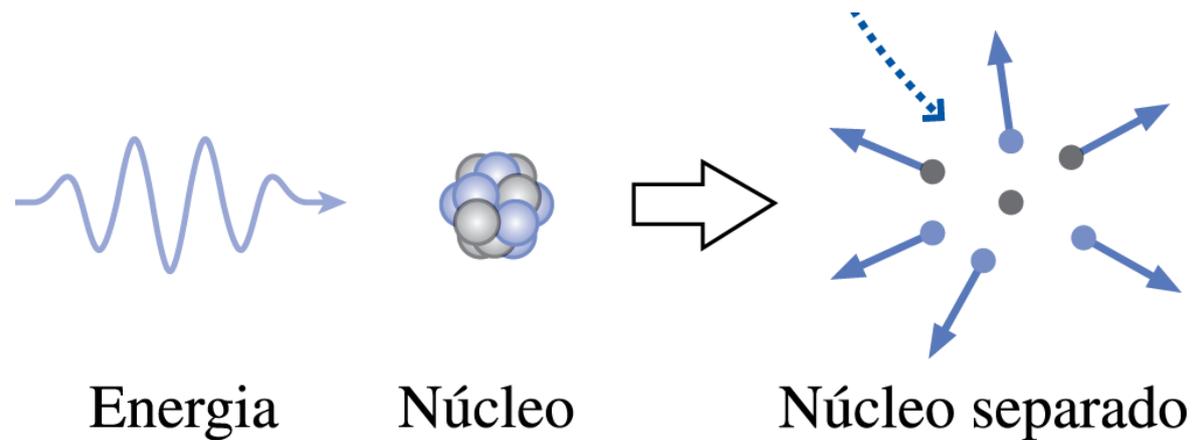
Estrutura Nuclear: Modelo planetário de Rutherford

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) !



Disciplina: Física IV – Física Moderna

Energia necessária para separar o núcleo em núcleons individuais.

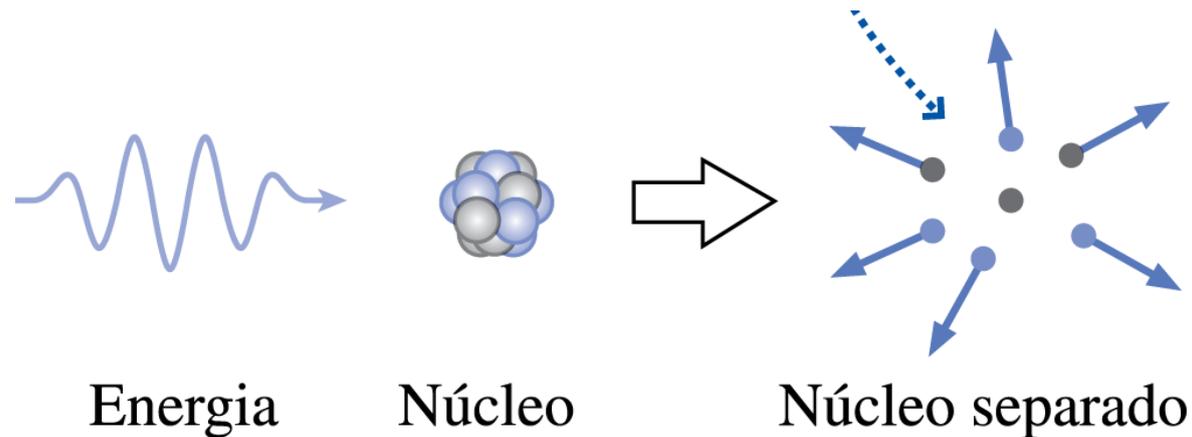


$$B + m_{\text{nuc}}c^2 = (Zm_p + Nm_n)c^2$$



Disciplina: Física IV – Física Moderna

Energia necessária para separar o núcleo em núcleons individuais.



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

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



INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

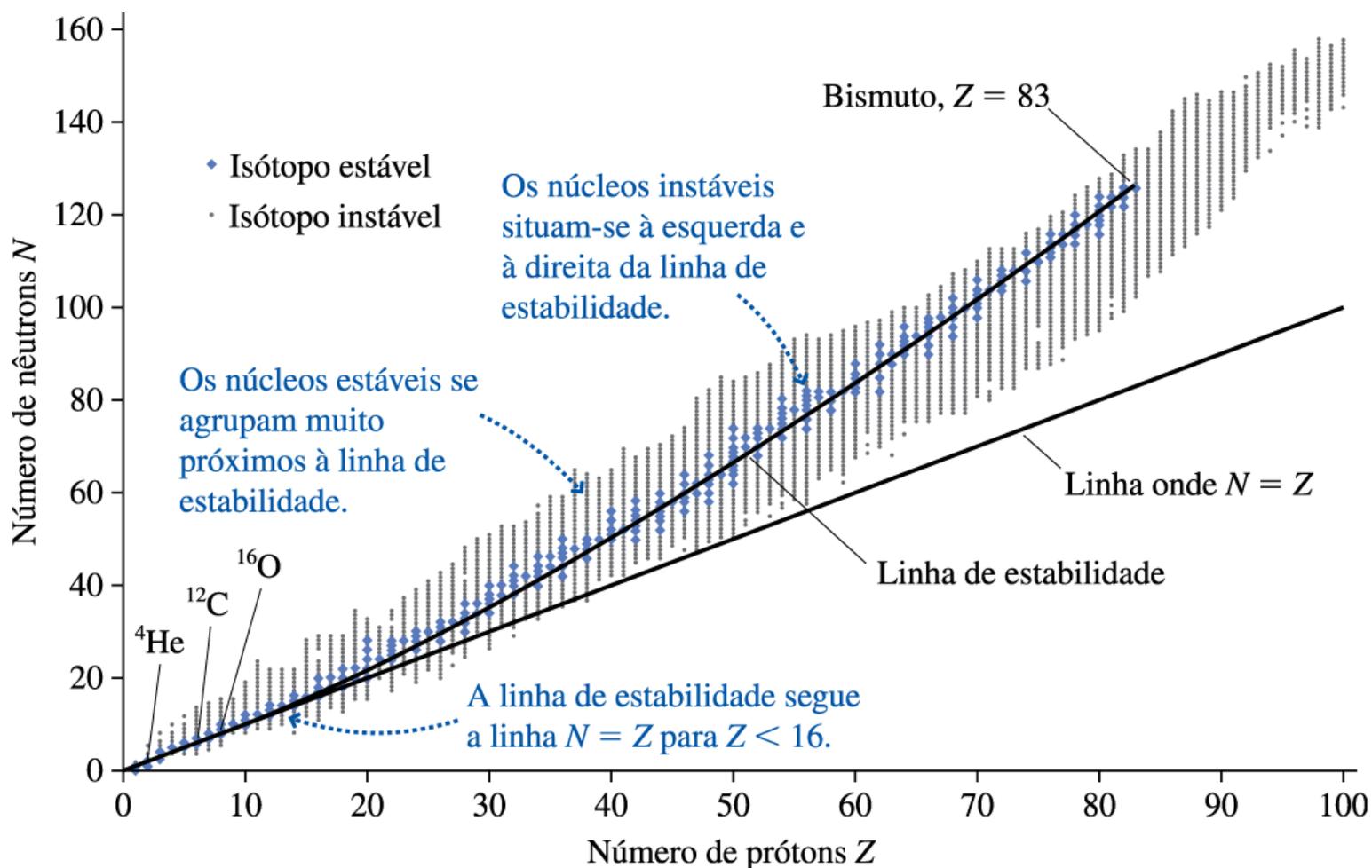
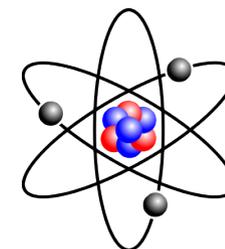
Disciplina: Física IV – Física Moderna

...



Estabilidade Nuclear

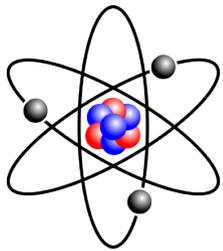
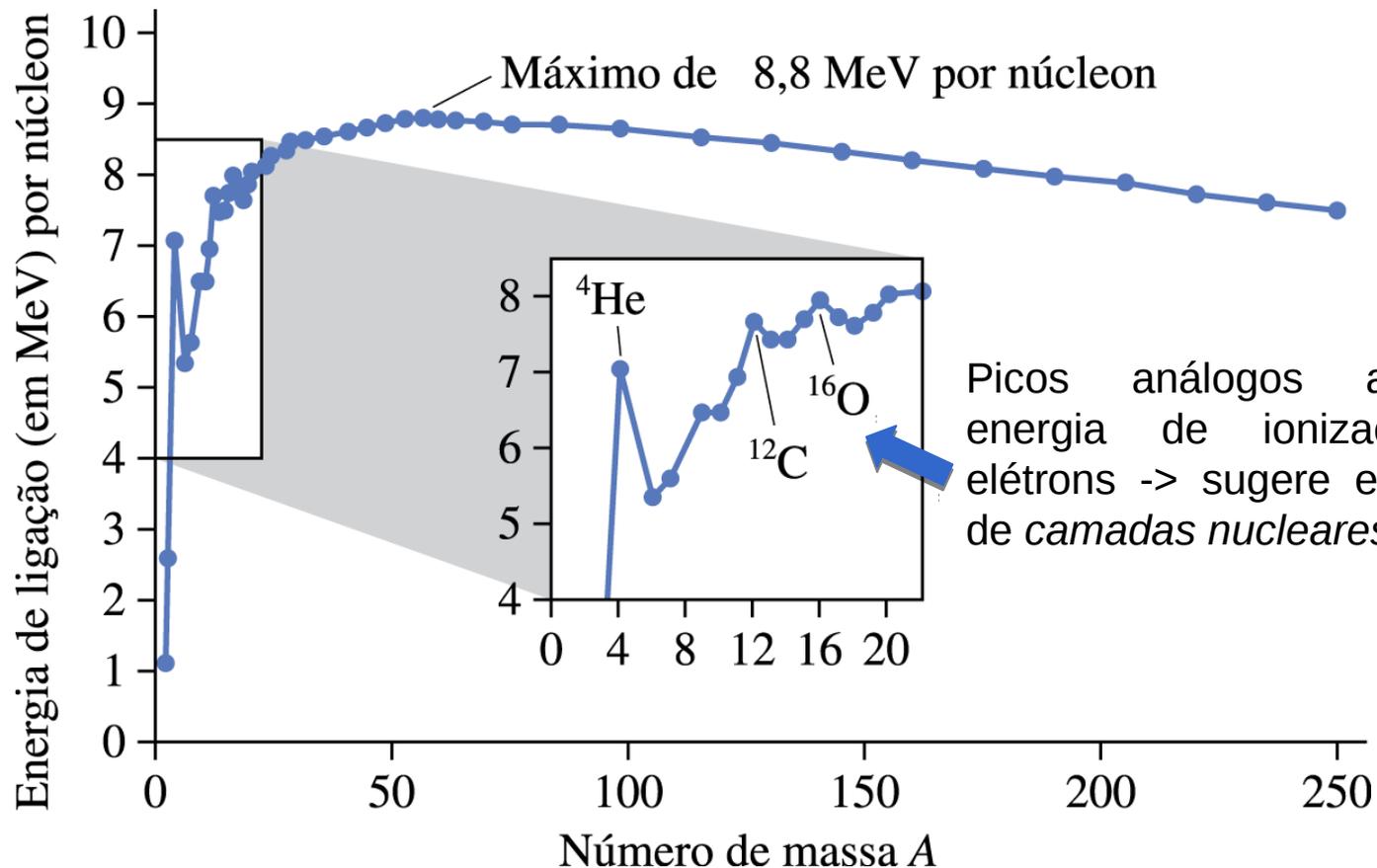
Curva de Estabilidade Nuclear

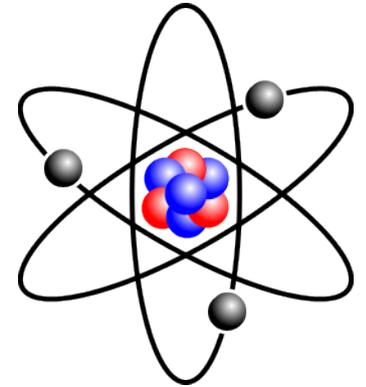




Estabilidade Nuclear

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





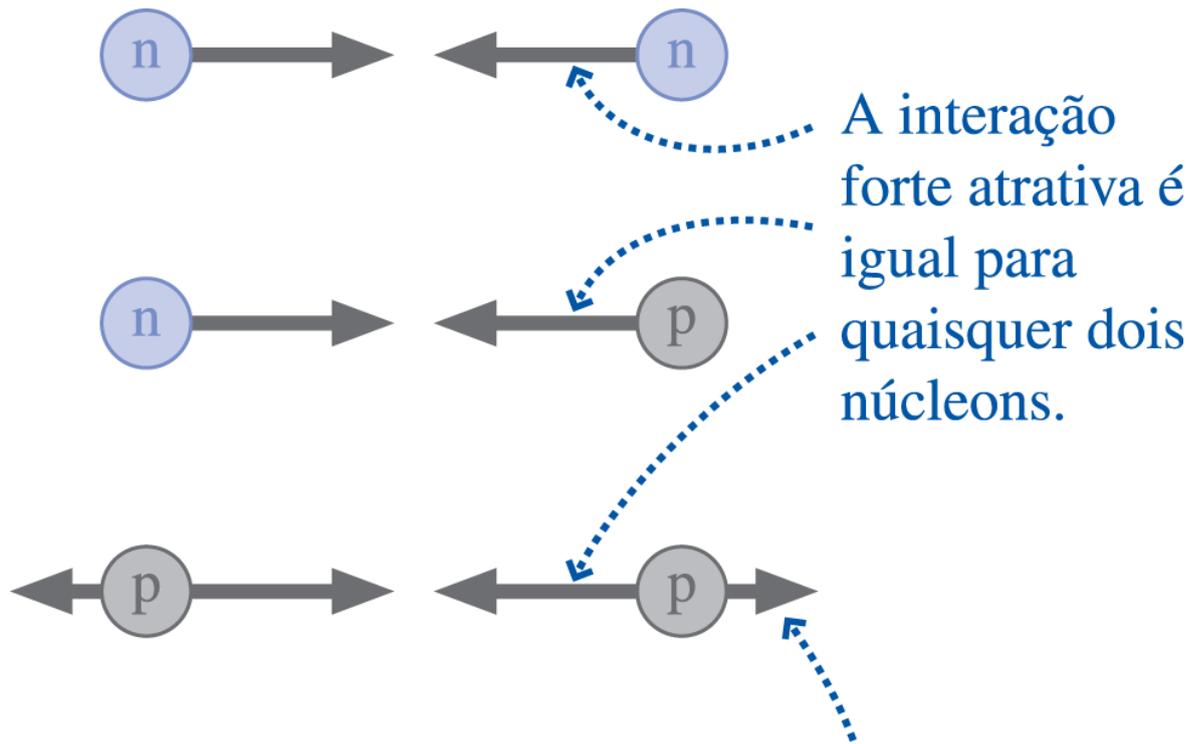
Mas e a pergunta: Porque os núcleos dos átomos são coesos e estáveis?



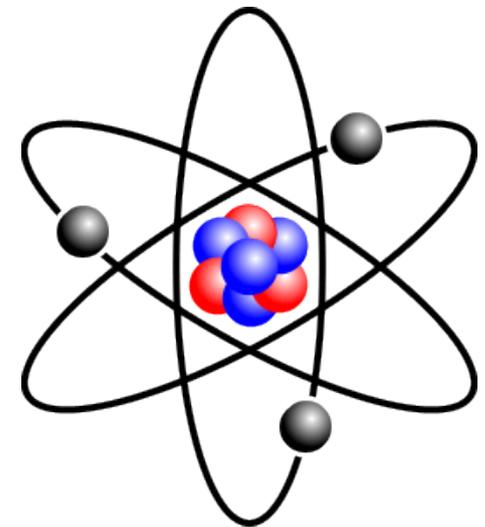
Estabilidade Nuclear

Existe uma nova força na natureza que atrai as partículas nucleares...

Força Forte



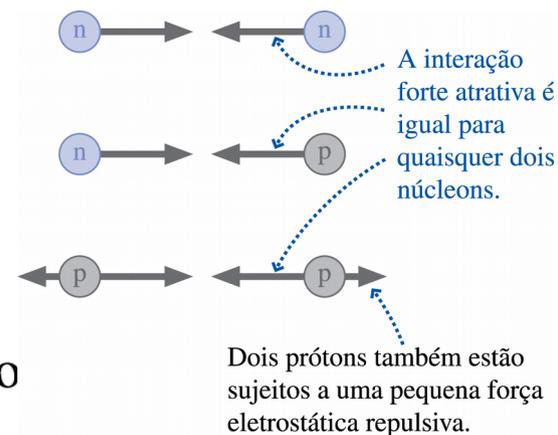
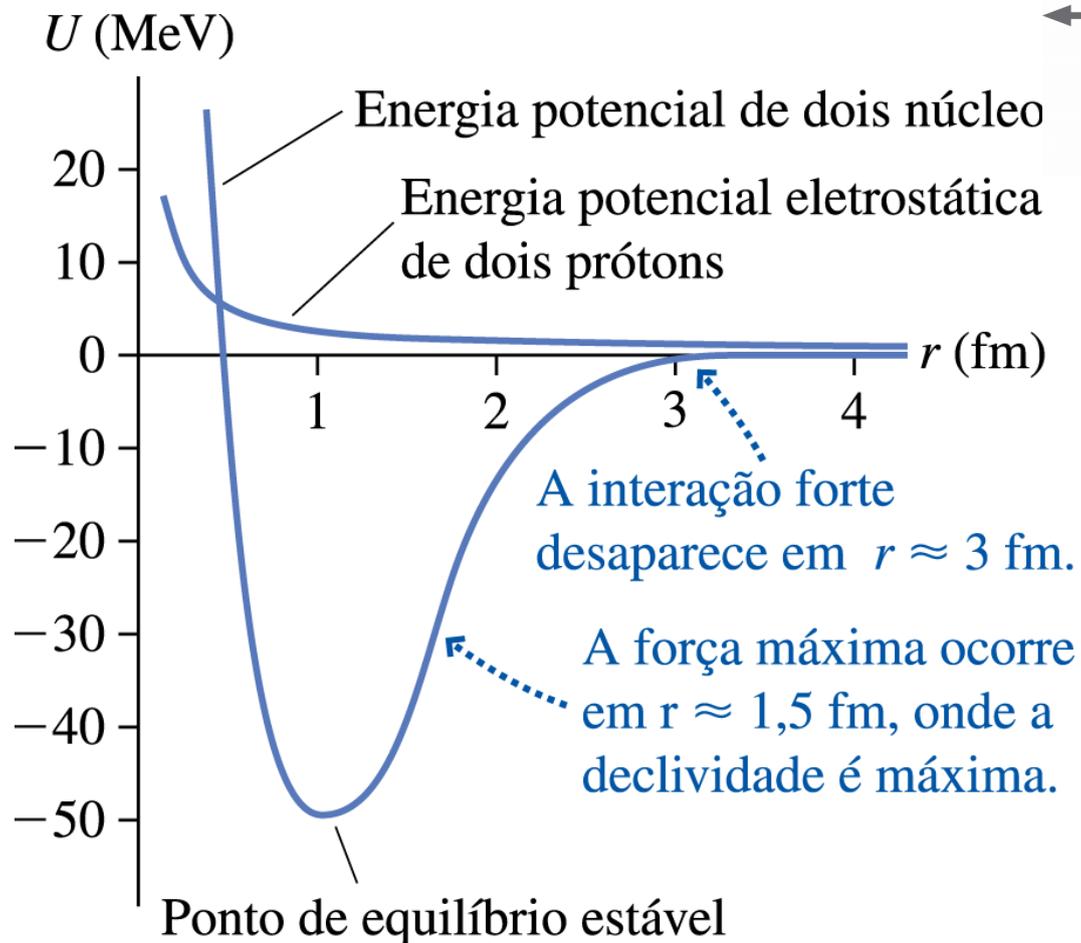
Dois prótons também estão sujeitos a uma pequena força eletrostática repulsiva.





Estabilidade Nuclear

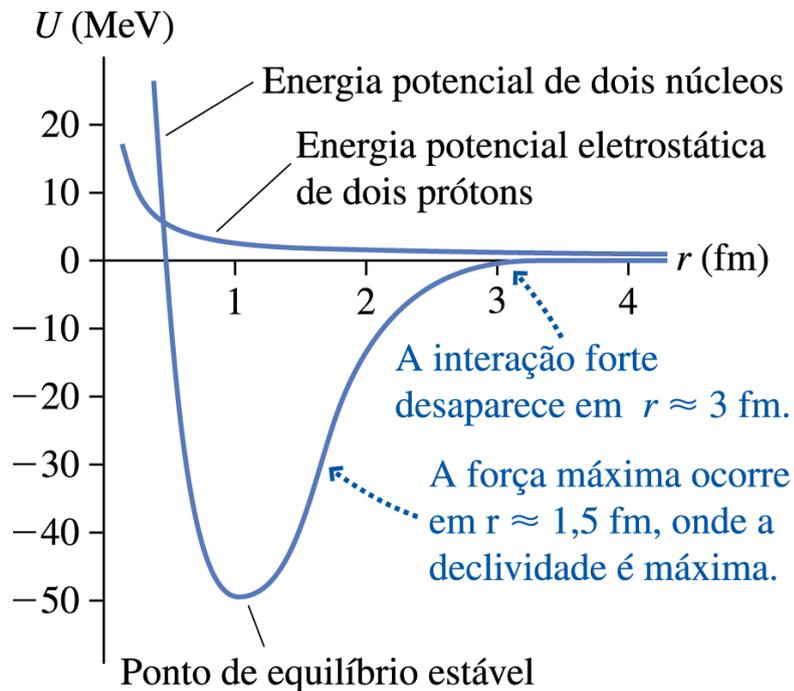
Força Forte





Estabilidade Nuclear

Força Forte



- Força de curto alcance, exercida em distâncias nucleares (alguns fm).
- Força atractiva 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.

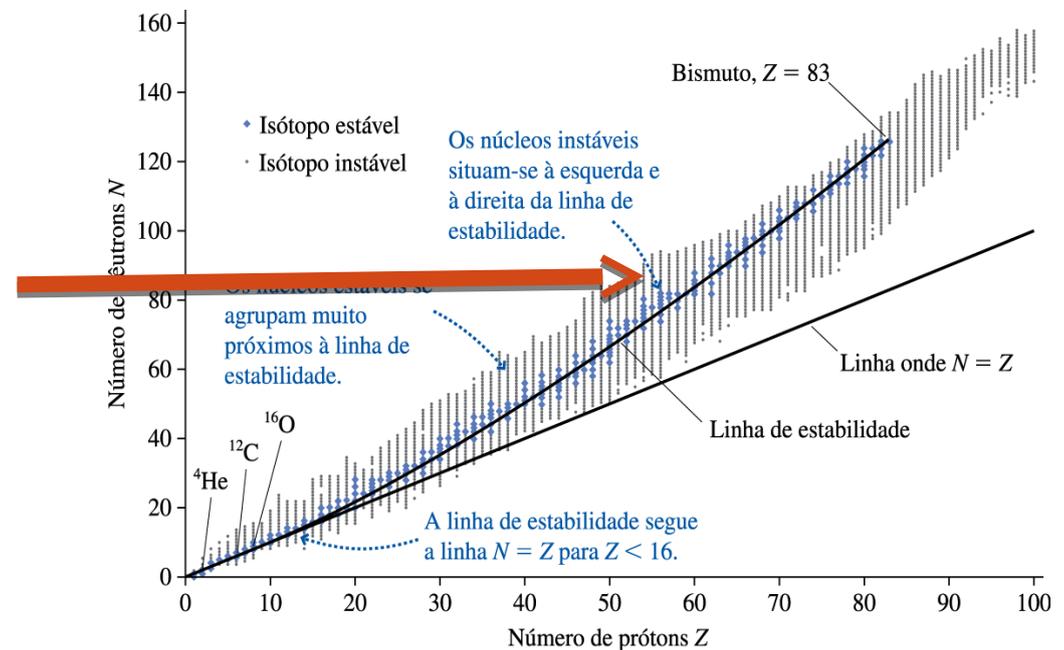


Estabilidade Nuclear

Força 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 !

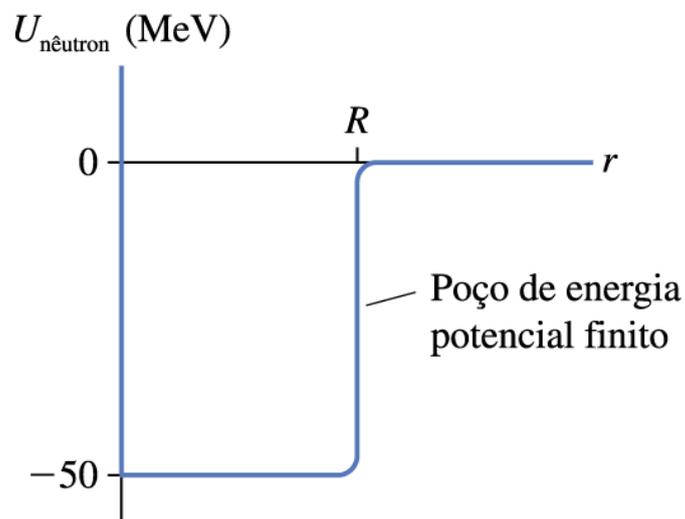




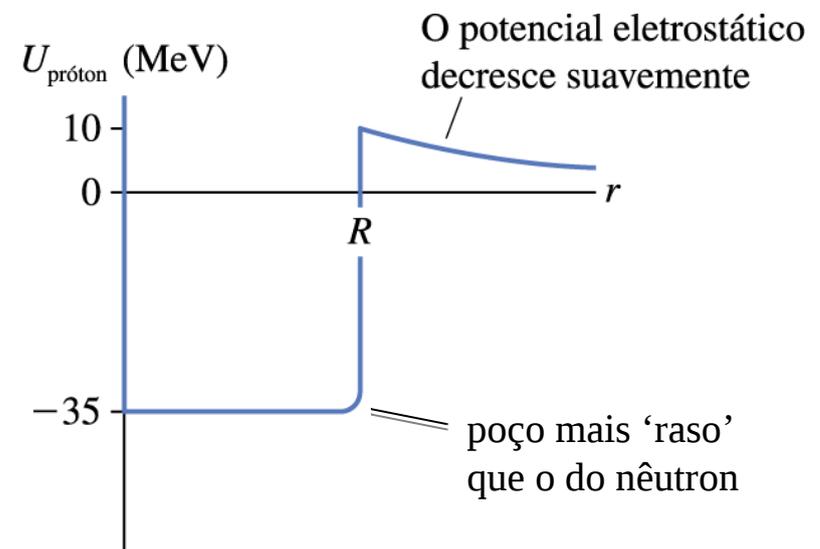
O Modelo de camadas

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.



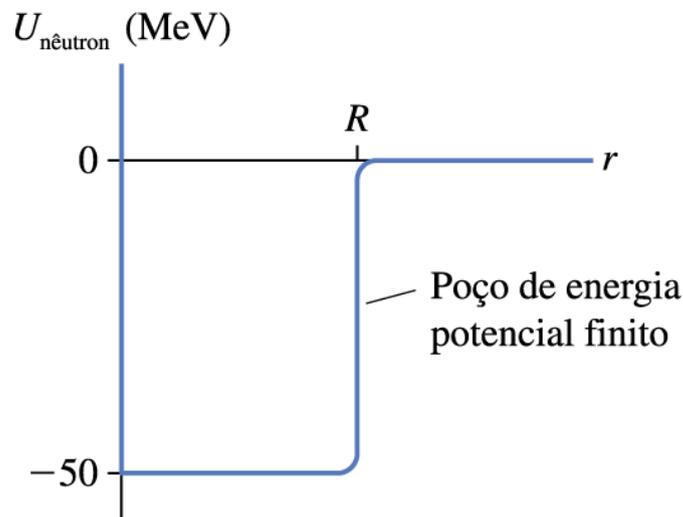
A energia potencial média de um próton se deve à interação forte e à força elétrica. Essa profundidade do poço de potencial é para $Z \approx 30$.



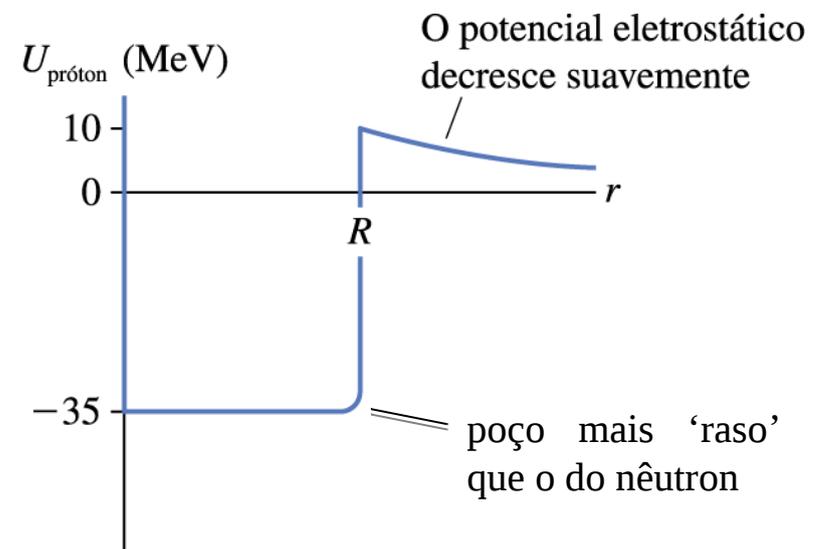
O Modelo de camadas

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

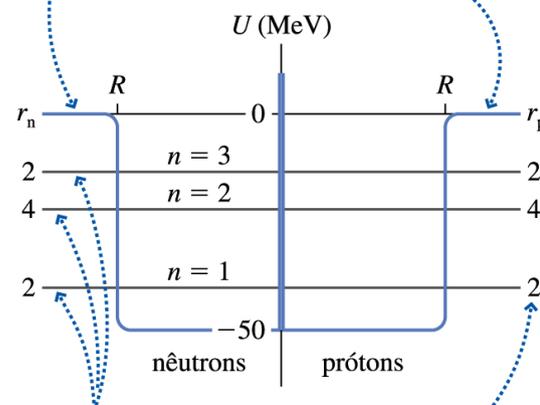


O Modelo de camadas: $Z \leq 8$



Maria Goeppert-Mayer: Nobel de Física de 1963, segunda e última mulher a ganhar até hoje

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.

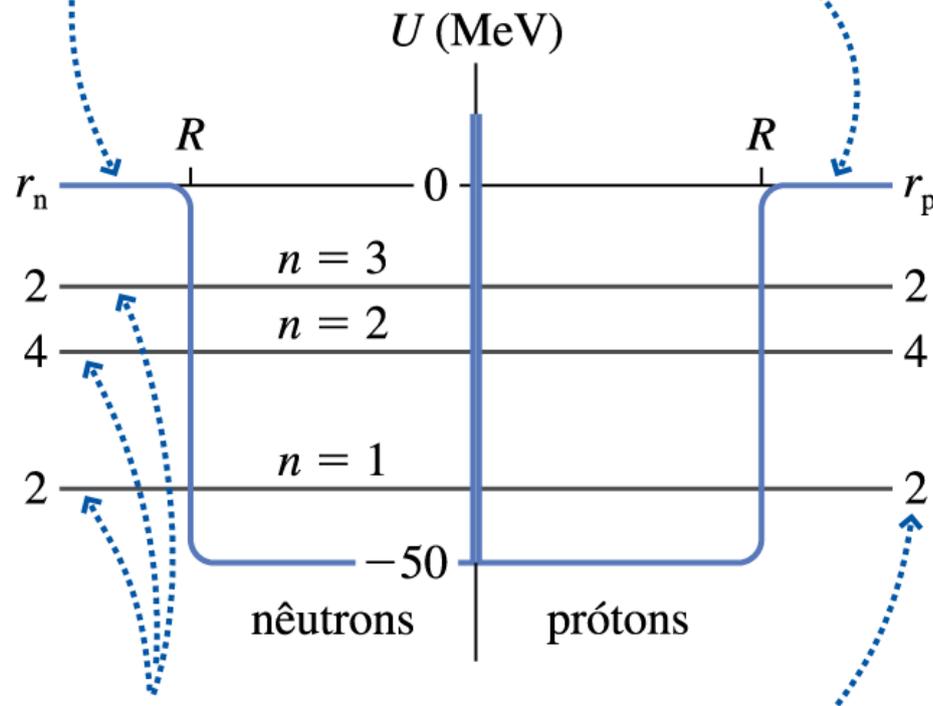
Estes são os números máximos de núcleons permitidos pelo princípio de Pauli.



O Modelo de camadas: $Z \leq 8$

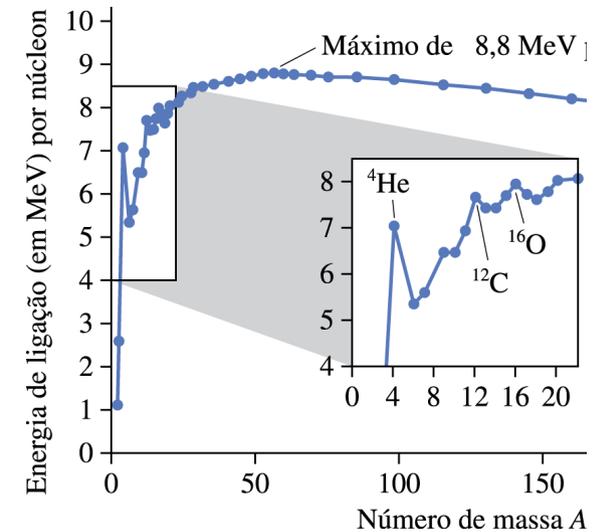
A distância radial do nêutron é medida à esquerda.

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.

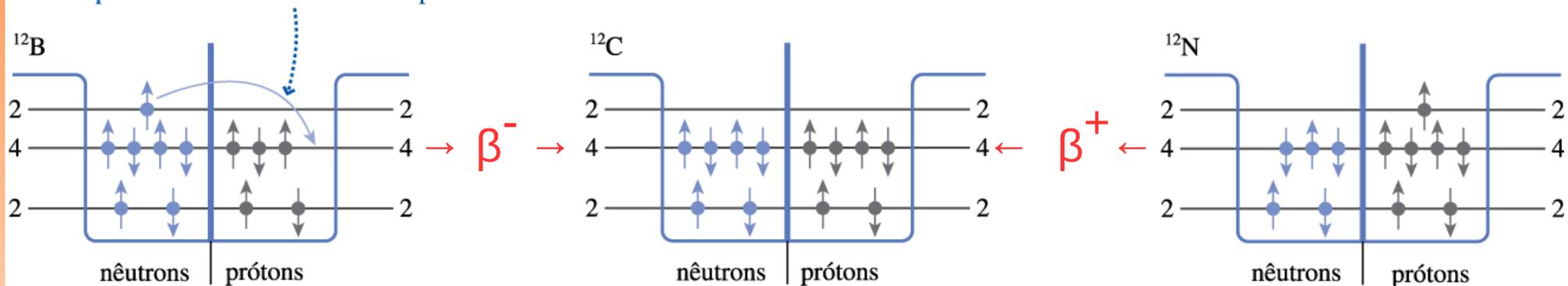




O Modelo de camadas: $Z \leq 8$

Transições beta dentro do Núcleo...

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



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^+)

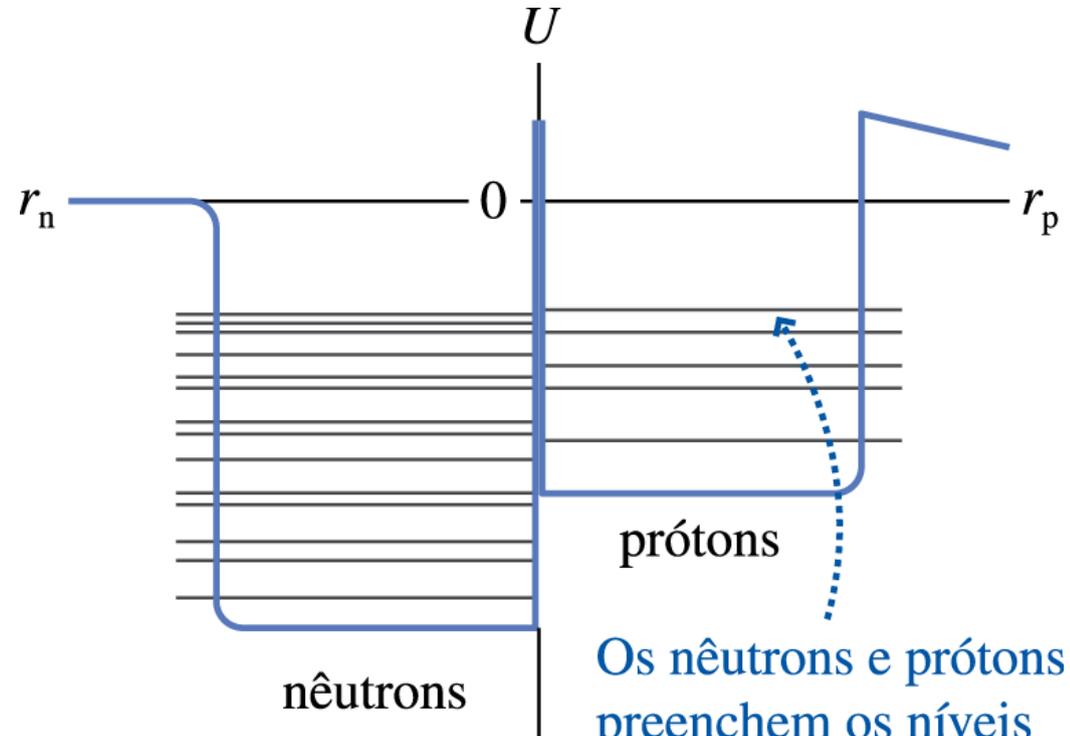
$$p^+ \rightarrow n + e^+ \quad = \text{Decaimento Beta } \beta^+$$

$$n \rightarrow p^+ + e^- \quad = \text{Decaimento Beta } \beta^-$$



O Modelo de camadas: $Z > 8$

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



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

Conclusão (mais uma vez): $N > Z$ em núcleos estáveis com $Z > 8$!



Radiação e Radioatividade



Radiação e Radioatividade

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

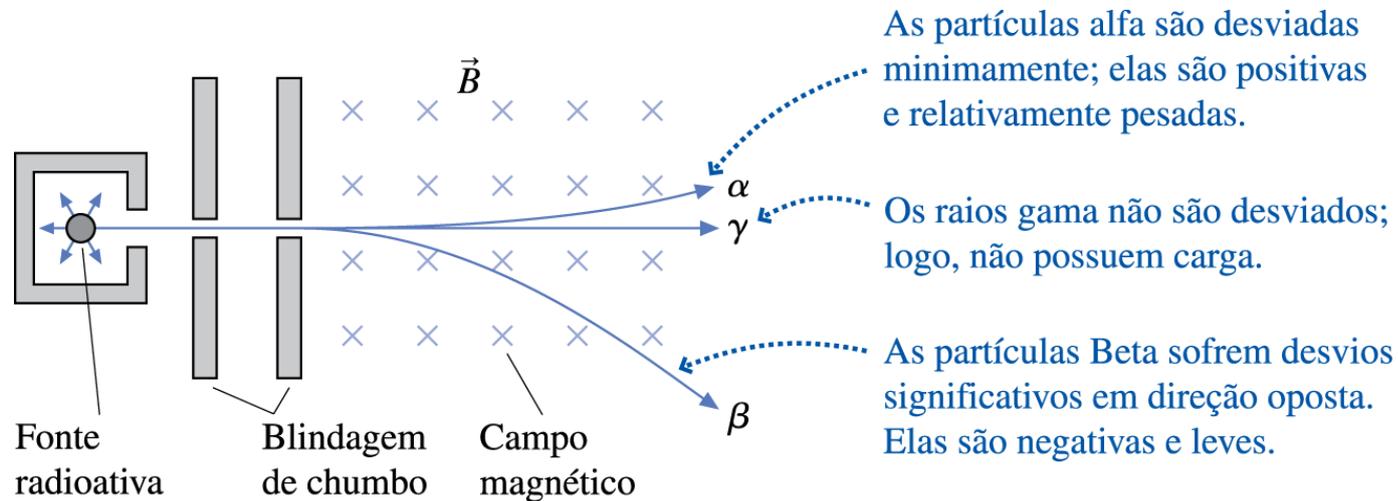


TABELA 43.3 Os três tipos de radiação

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



Problema “Perverso”

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
A)	α	β	γ
B)	β	α	γ
C)	β	γ	α
D)	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



Problema “Perverso”

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
A)	α	β	γ
B)	β	α	γ
C)	β	γ	α
D)	γ	α	β

TABELA 43.3 Os três tipos de radiação

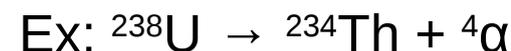
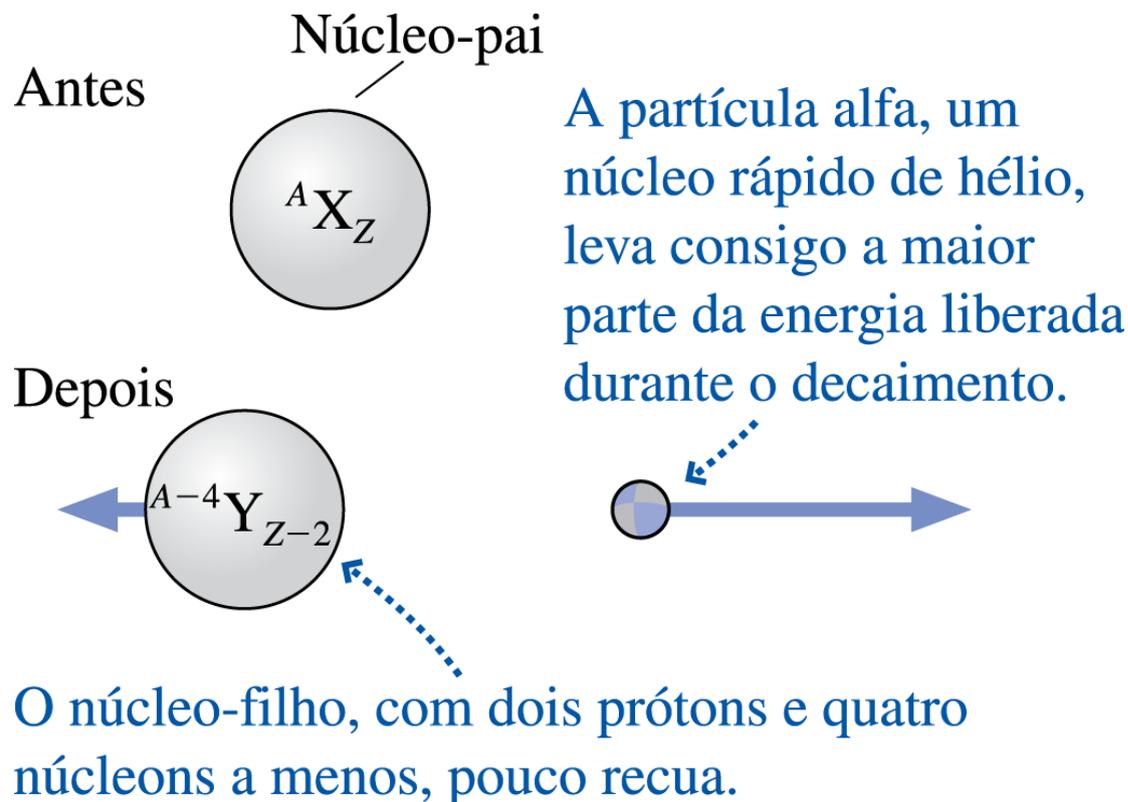
Radiação	Identificação	Carga	Blindada por
Alfa, α	Núcleo de ${}^4\text{He}$	$+2e$	Folha de papel
Beta, β	Elétron	$-e$	Folha de alumínio de alguns mm
Gama, γ	Fóton de alta energia	0	Muitos cm de chumbo



Mecanismos de Decaimento

Decaimento α

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



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

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

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

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



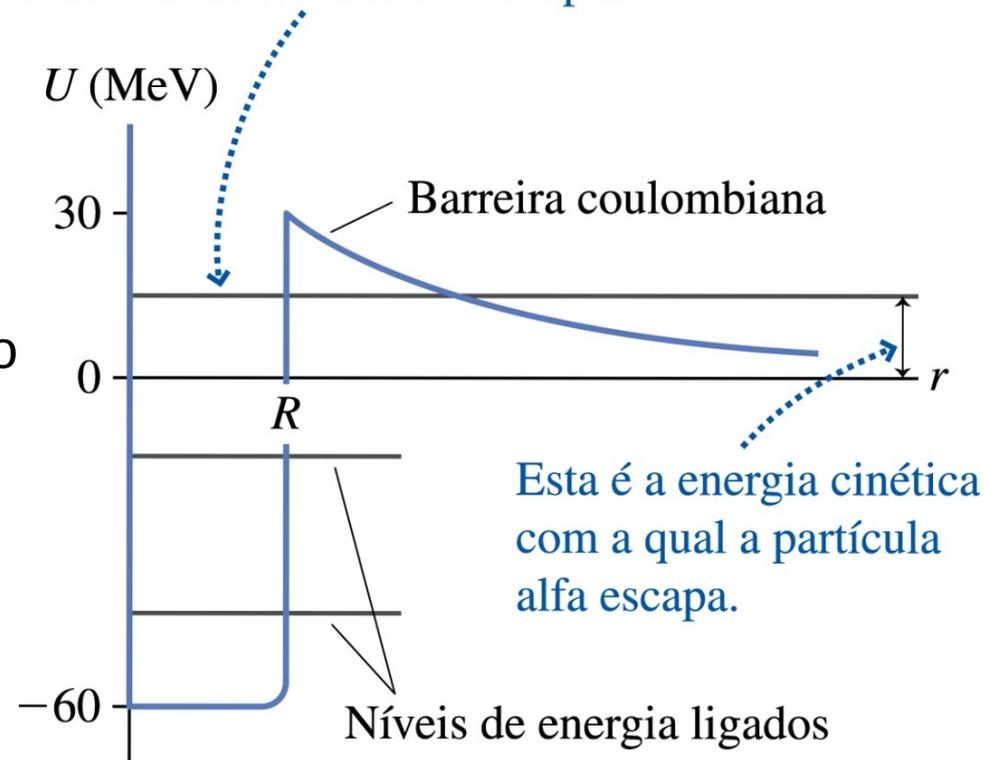
Mecanismos de Decaimento

Decaimento α

Mecanismo: **tunelamento** através da barreira Coulombiana

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

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!

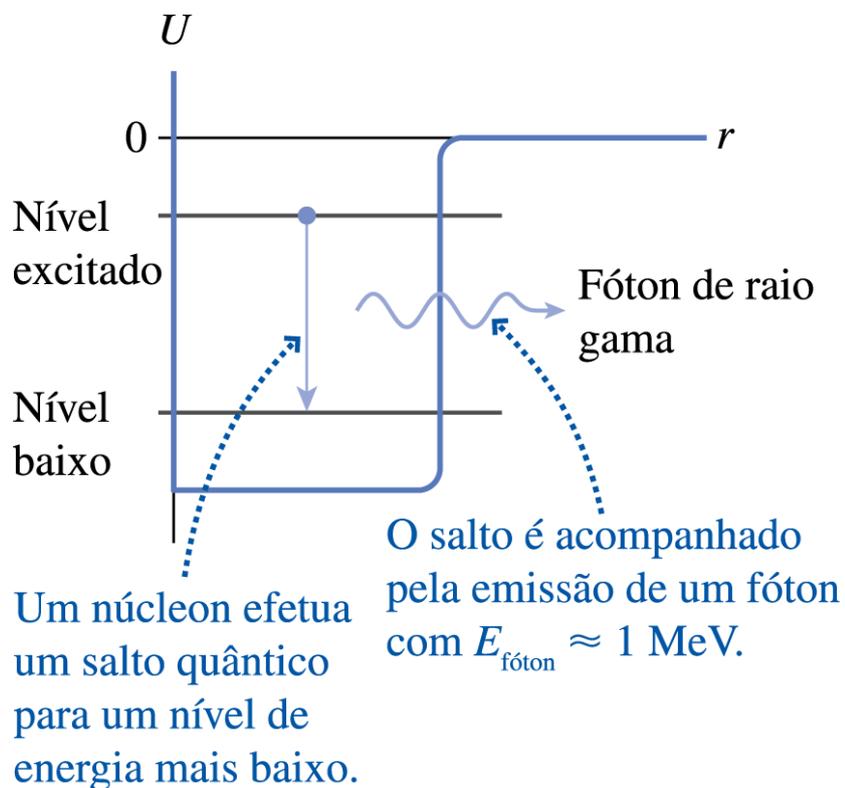




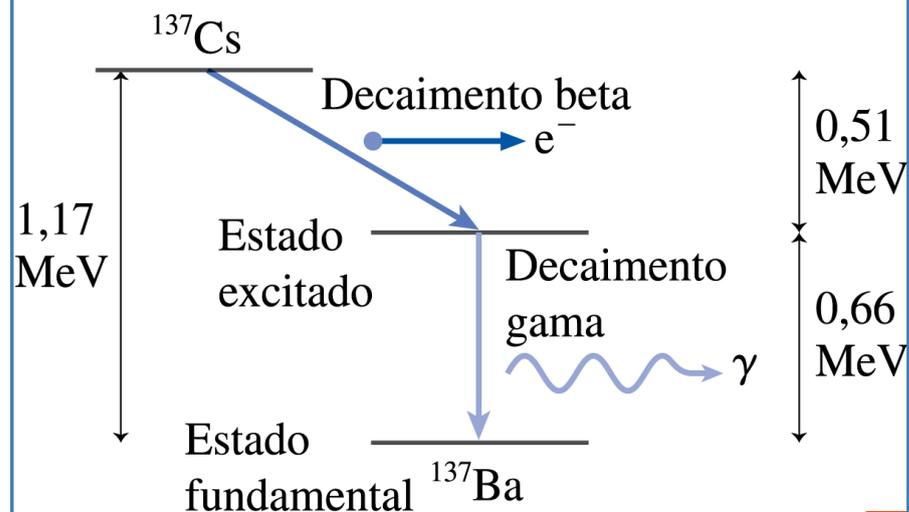
Mecanismos de Decaimento

Decaimento γ

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



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

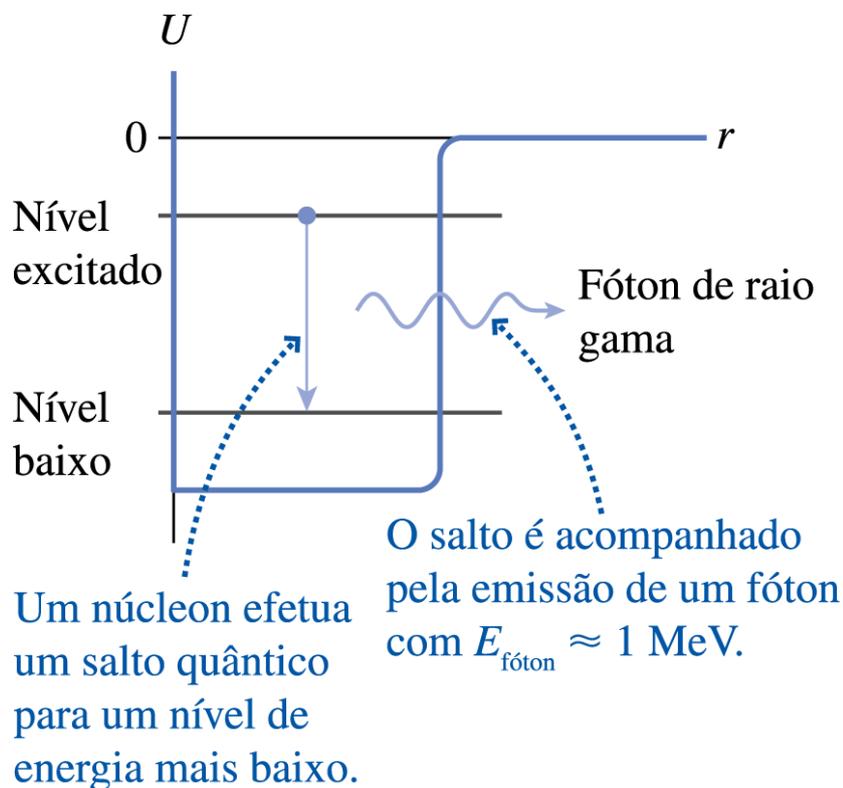




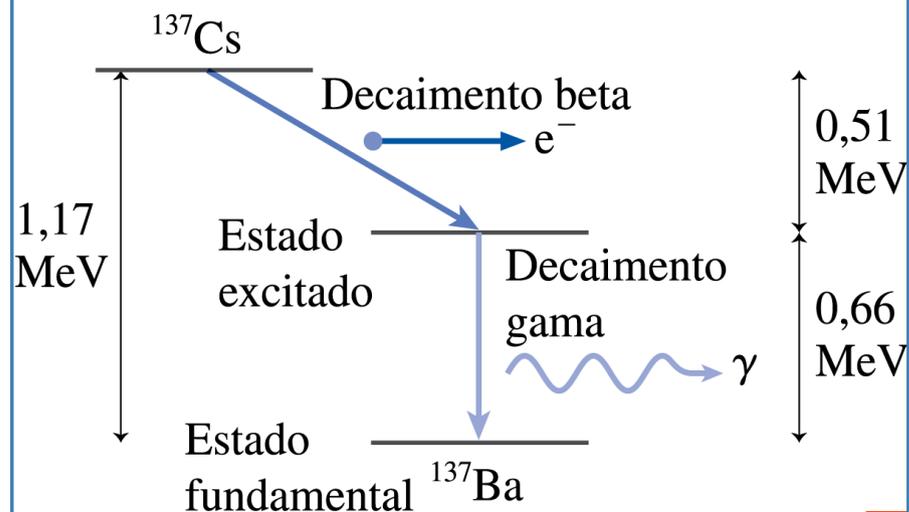
Mecanismos de Decaimento

Decaimento γ

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



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



Note que isso **não altera Z ou A!**



Mecanismos de Decaimento

Decaimento α

(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.

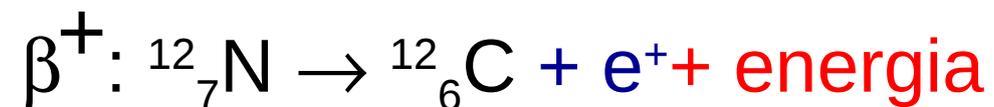
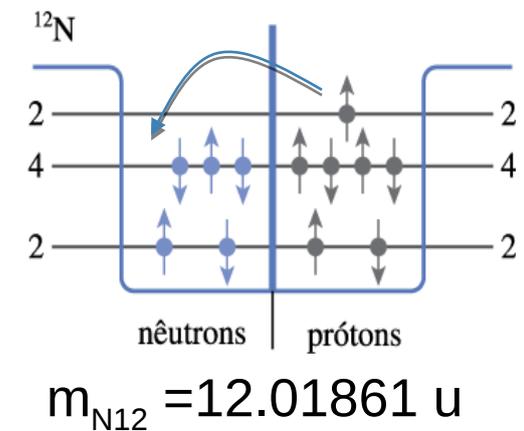
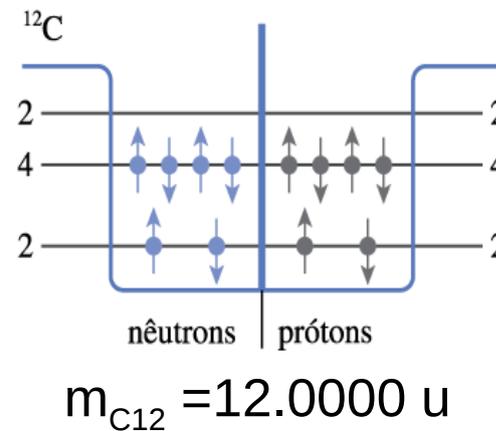
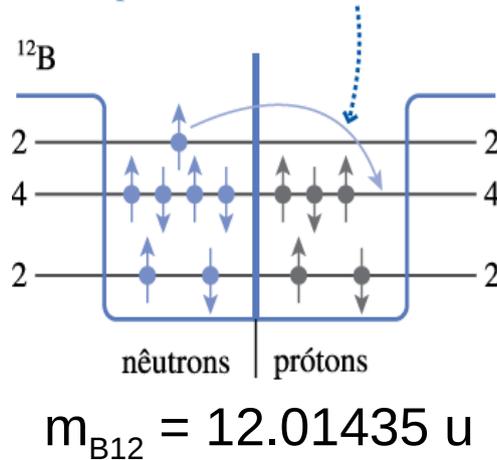




Mecanismos de Decaimento

Decaimento β

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





Mecanismos de Decaimento

Decaimento β

Partícula	Símbolo	Massa	
		Massa (u)	(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)!!



Mecanismos de Decaimento

Decaimento β

Partícula	Símbolo	Massa	
		Massa (u)	(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)!!

Nêutrons isolados decaem após aprox. 10 minutos!



Mecanismos de Decaimento

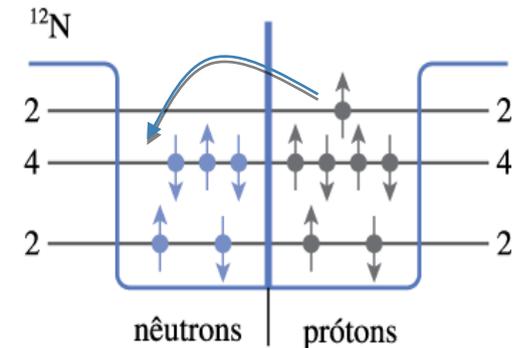
Decaimento β

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

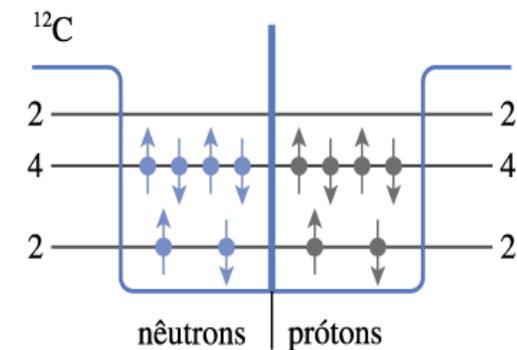
Como $m_p < m_n$, então para isto acontecer a energia de ligação de Y precisa ser bem maior que a de X

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

$$\begin{aligned} B_{N12} &= (7m_p + 5m_n - m_{N12})c^2 \\ &= (0,0757u)c^2 = 70,5 \text{ MeV} \\ B_{C12} &= (6m_p + 6m_n - m_{C12})c^2 \\ &= (0,0956u)c^2 = 89 \text{ MeV} \end{aligned}$$



$$M_{N12} = 12,01861 \text{ u}$$



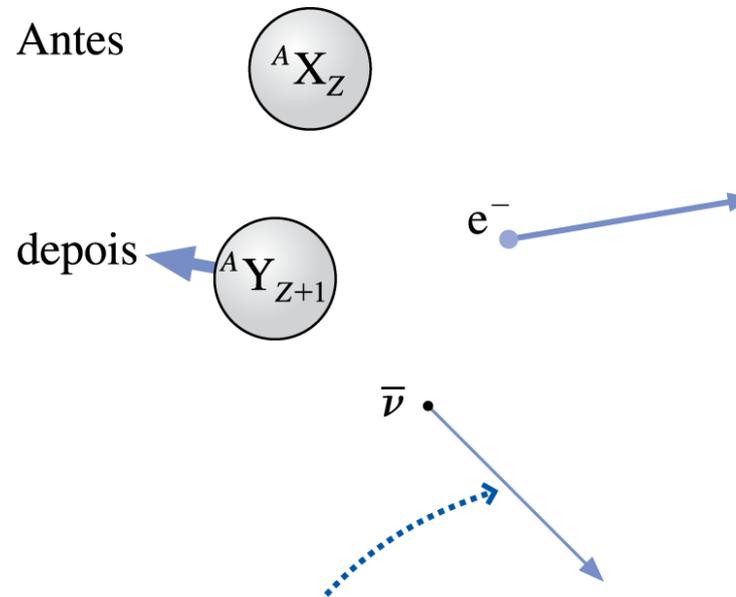
$$m_{C12} = 12,0000 \text{ u}$$



Mecanismos de Decaimento

Decaimento β

Na realidade é mais complicado....

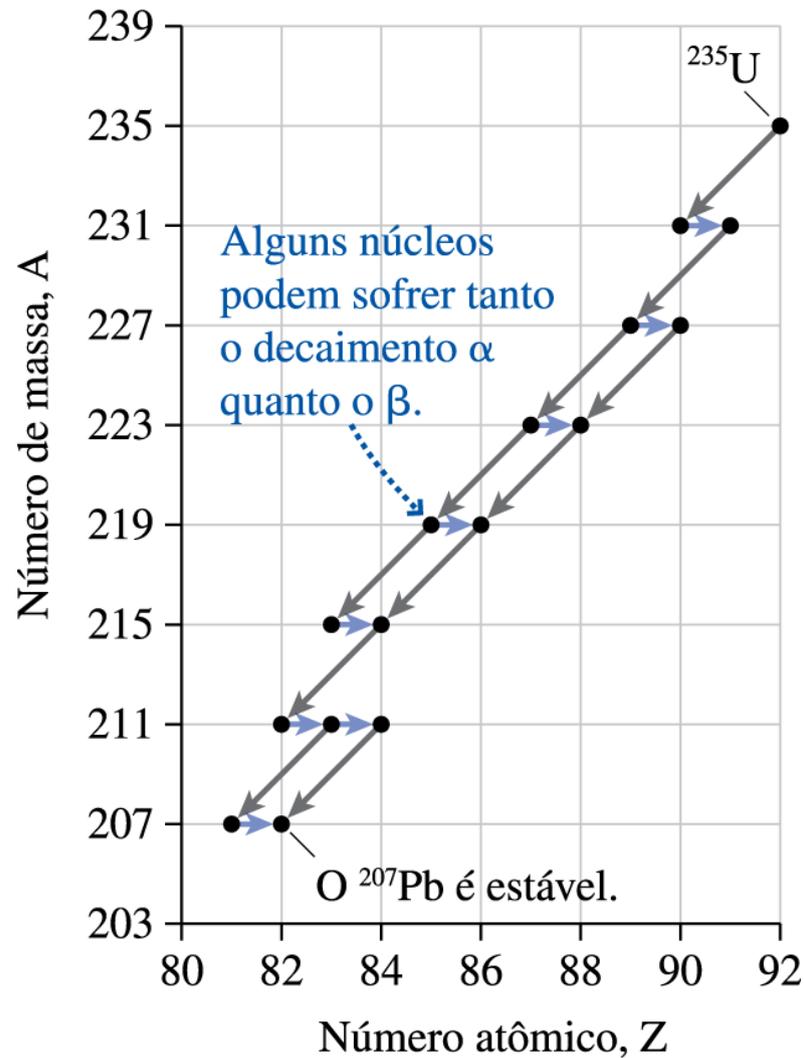


Um (*anti*)neutrino também é criado, levando parte da energia e momentum do nêutron original. Essa partícula é muito difícil de detectar, pois não tem carga e sua massa é (pelo menos) 100000 vezes menor que a do elétron.



Decaimento Nuclear:

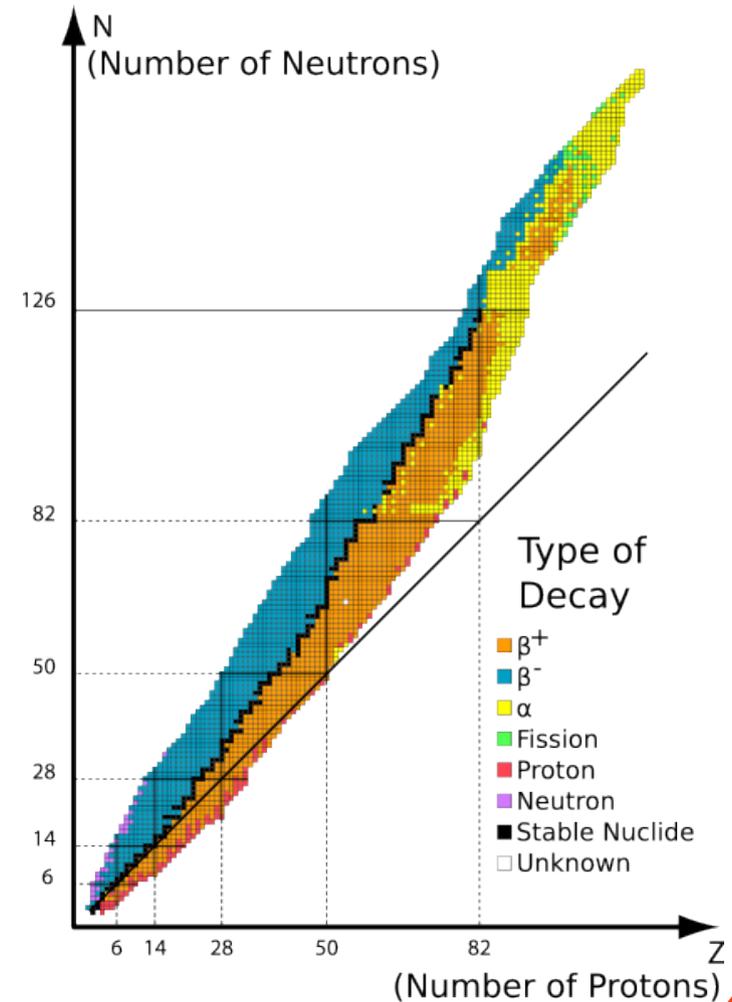
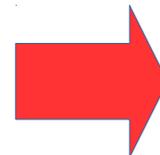
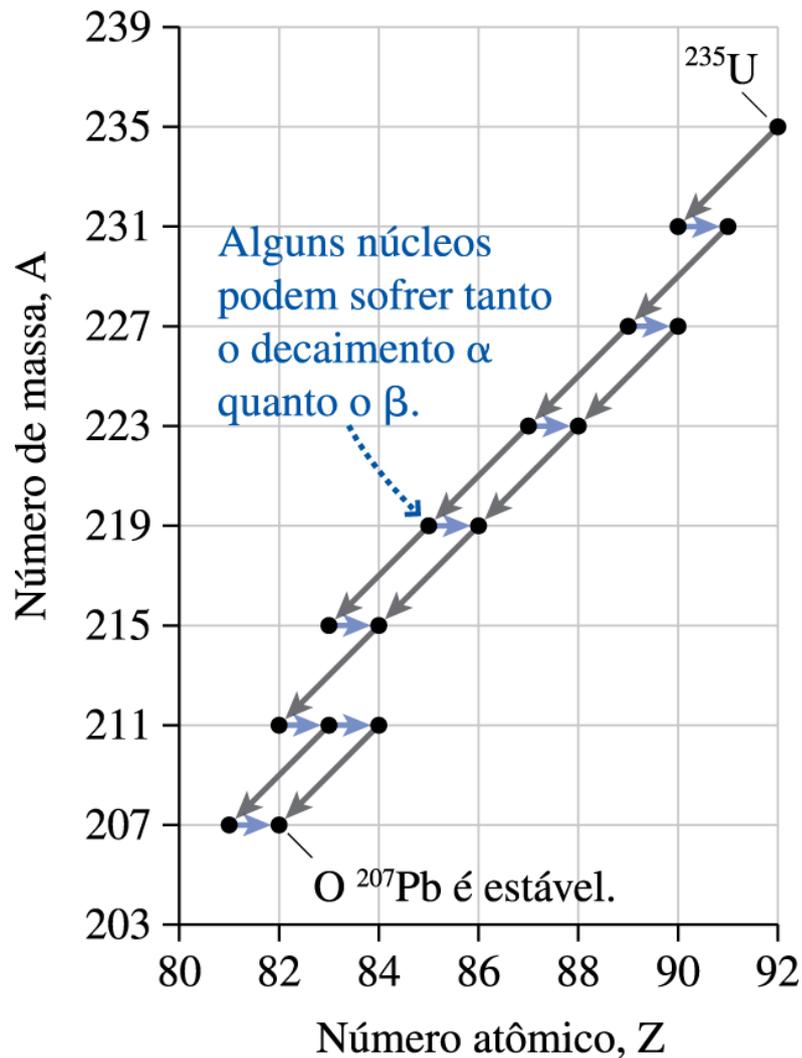
↙ O decaimento alfa reduz o valor de A em 4, e o de Z , em 2. O decaimento beta aumenta o valor de Z em 1.





Decaimento Nuclear:

↙ 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.

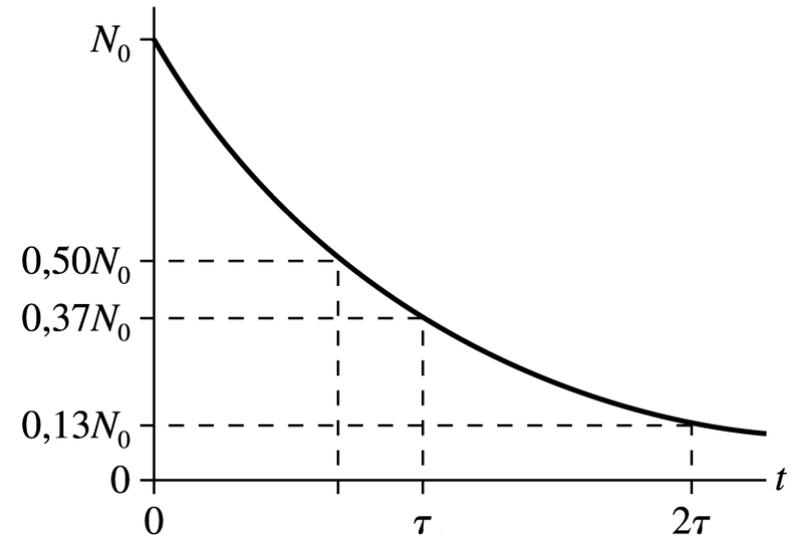




Decaimento Nuclear: Meia Vida

- 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.

Número de núcleos restantes



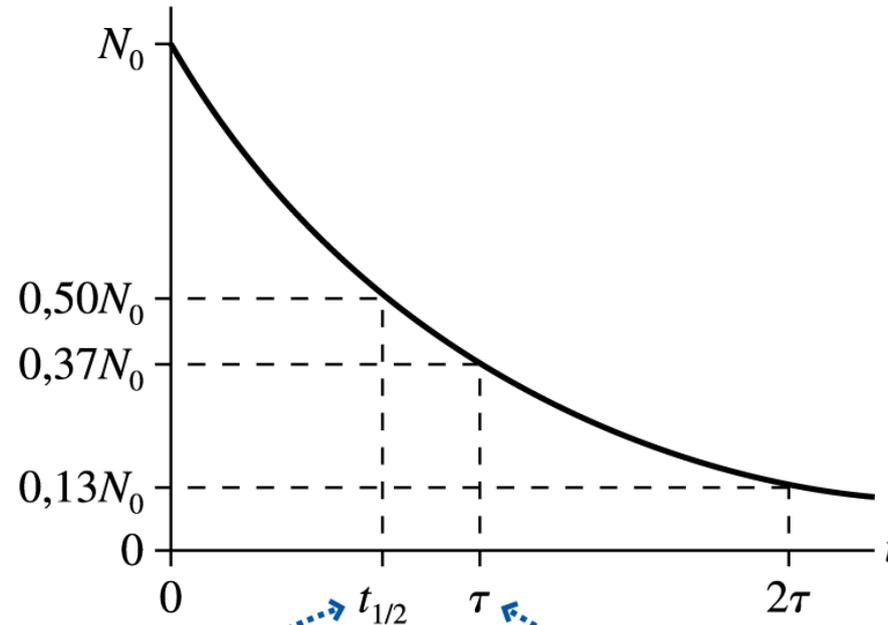
Eq. de Relaxação:
$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$$

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



Decaimento Nuclear: Meia Vida

Número de núcleos restantes



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

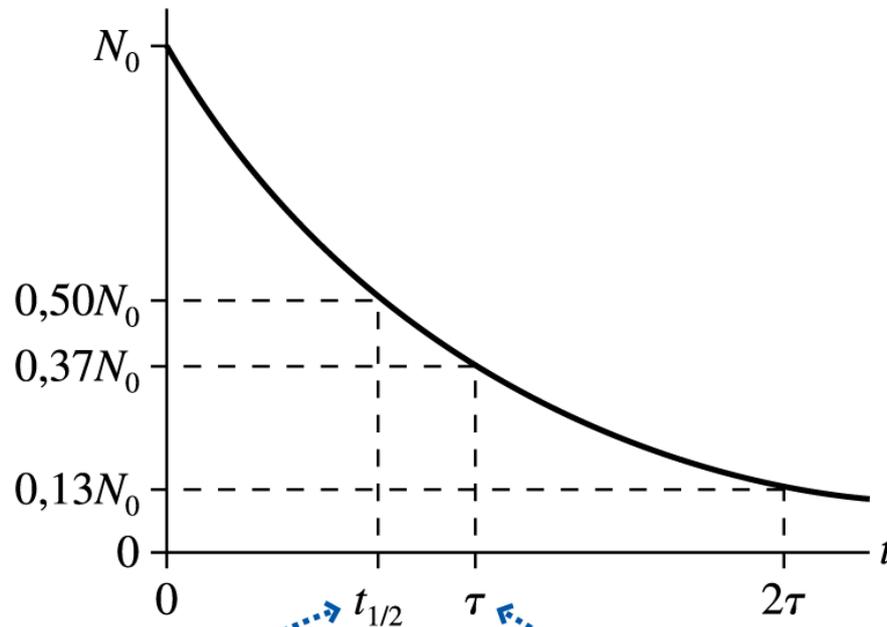
A constante de tempo é o instante de tempo em que o número de núcleos é e^{-1} , ou 37% do número inicial.

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

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.

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

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

Atividade:

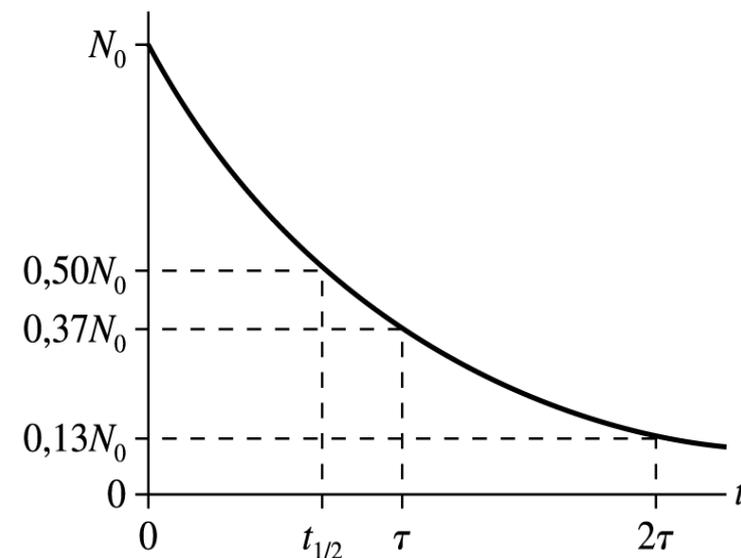
Número de Decaimentos por segundo

$$R = \left| \frac{dN}{dt} \right| = rN = rN_0 e^{-t/\tau} = rN_0 (1/2)^{-t/t_{1/2}}$$



1 decaimento / s = 1 Becquerel

Número de núcleos restantes





Decaimento Nuclear: Meia Vida

Problema:

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) $A\sqrt{2}$

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

Problema:

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) $A\sqrt{2}$**



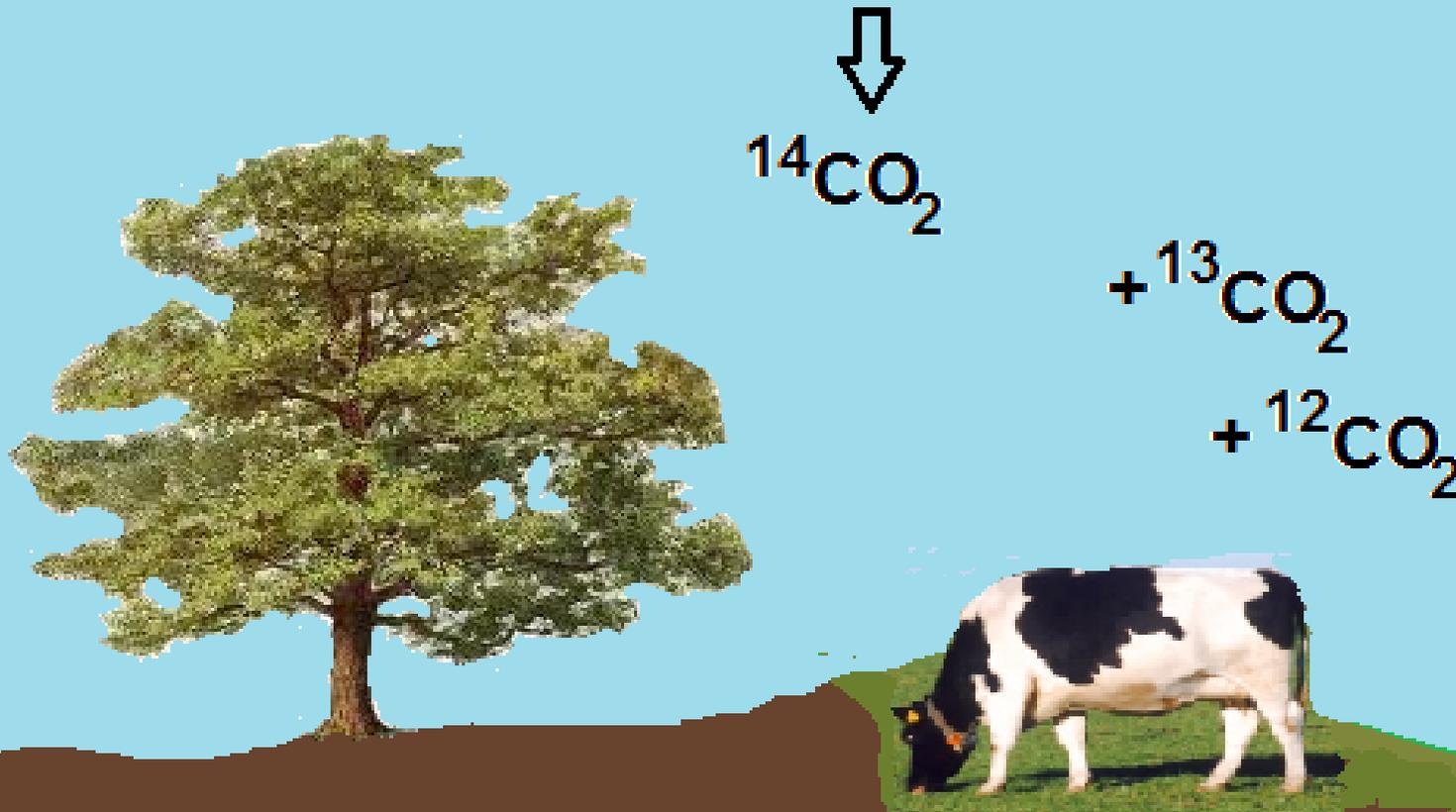
Decaimento Nuclear: Meia Vida

${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{p}$

~ 78% de Nitrogênio

$$t_{1/2} {}^{14}\text{C} = 5730 \text{ anos...}$$

O ciclo do carbono

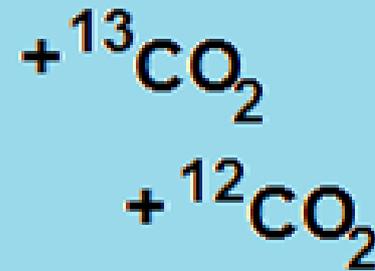
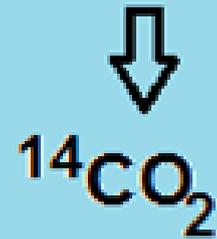


O ^{14}C reage com o Oxigênio formando o dióxido de carbono que é absorvido pelos seres vivos...

Equilíbrio: a produção compensa as perdas por decaimento

Proporção de equilíbrio (atual):

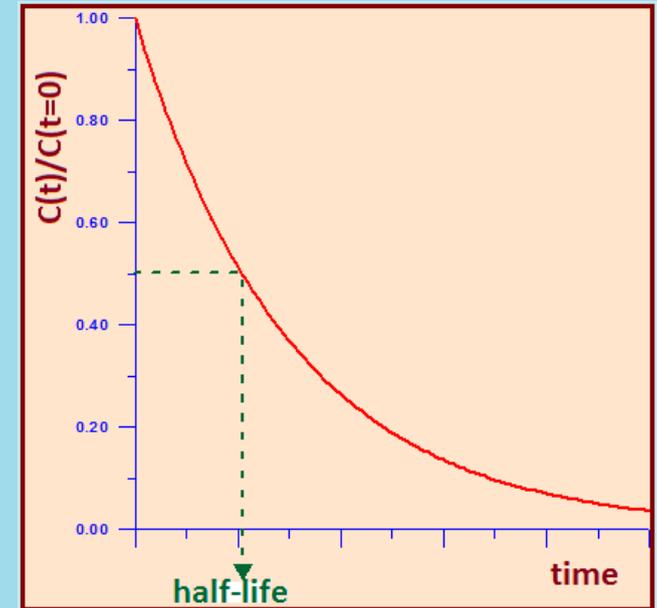
$$^{14}\text{C} / ^{12}\text{C} = 1,3 \times 10^{-12}$$



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

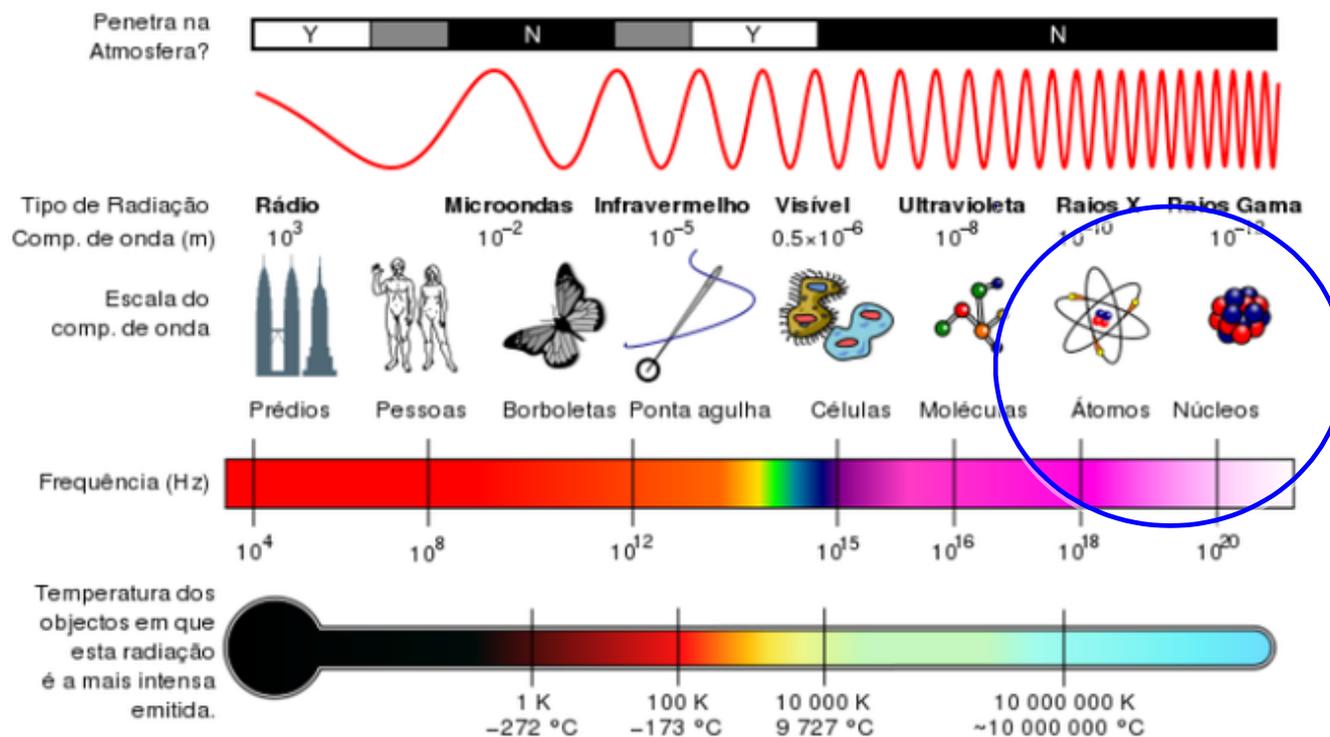
Correntes marinhas

Traçador em processos biomédicos



Radiação Ionizante

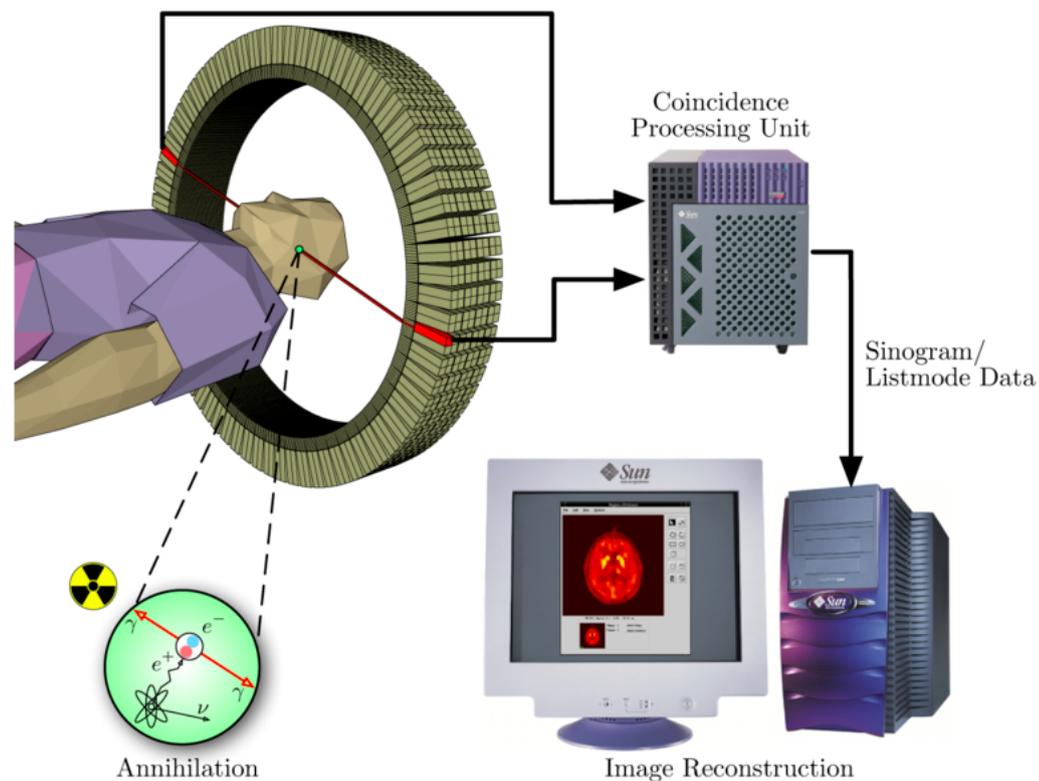
Raios-X e radiações nucleares α, β, γ são **Radiações ionizantes**: devido à sua alta energia, podem ionizar a matéria e romper ligações moleculares.



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



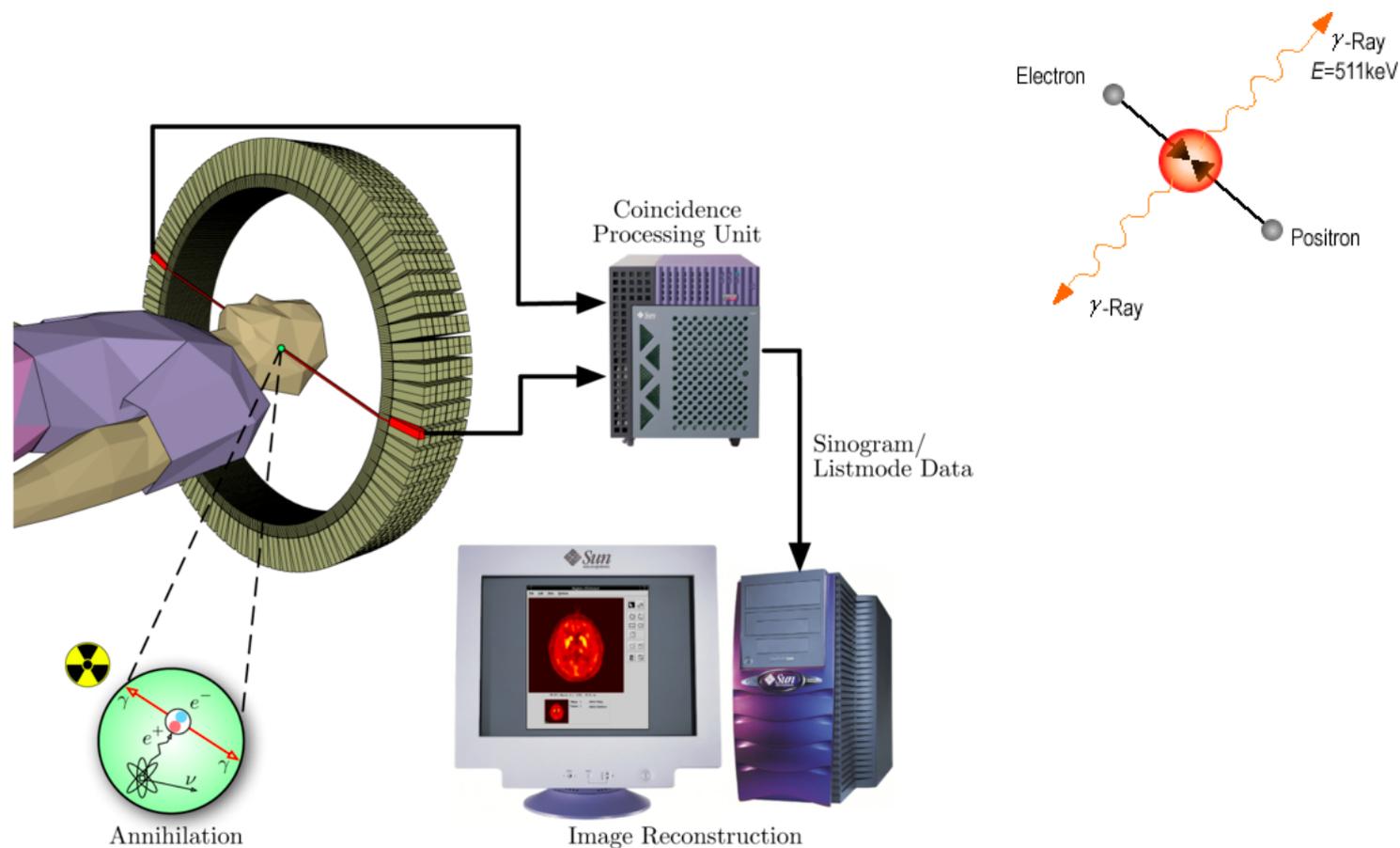
Radiação Ionizante



- A pessoa ingere um composto radioativo (“traçador”) que se acumula preferencialmente em certos tecidos.



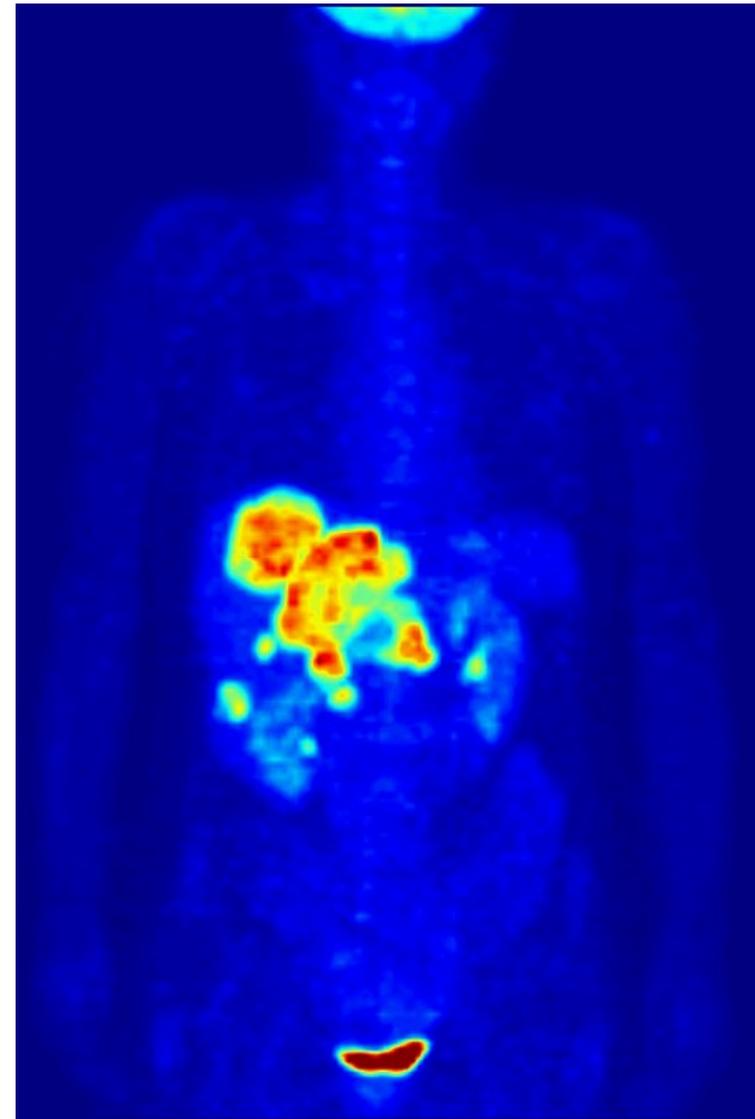
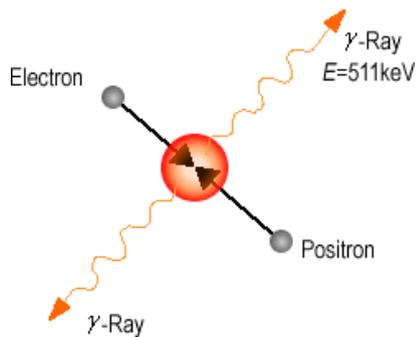
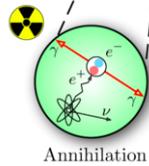
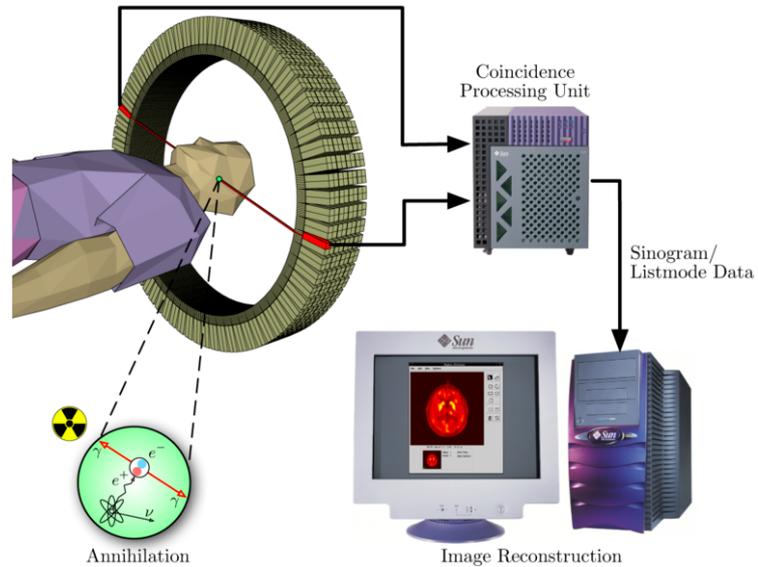
Radiação Ionizante



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 .



Radiação Ionizante



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

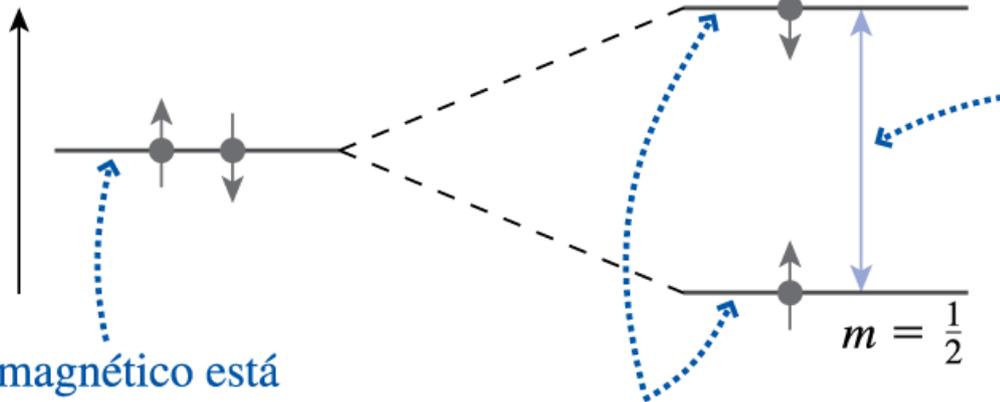


Ressonância Magnética (Nuclear)



Ressonância Magnética (Nuclear)

(a) Aumento de energia



Spin down, anti-alinhado com o campo

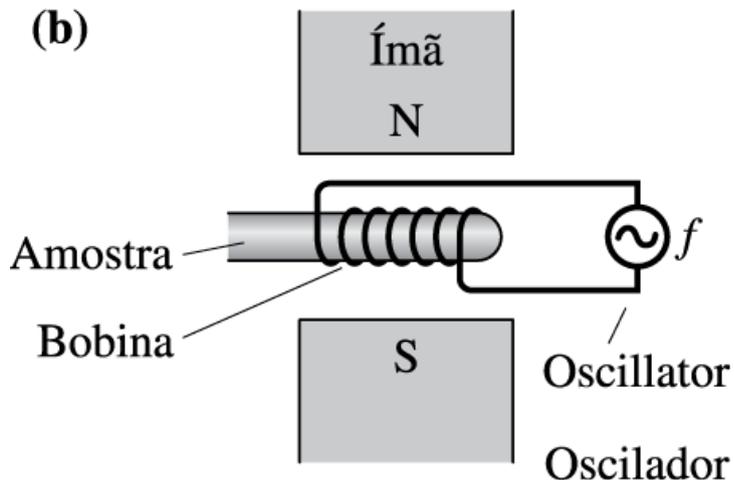
Fótons de radiofrequência fazem cada próton ir e vir entre estes dois níveis de energia.

Spin up, alinhado com o campo

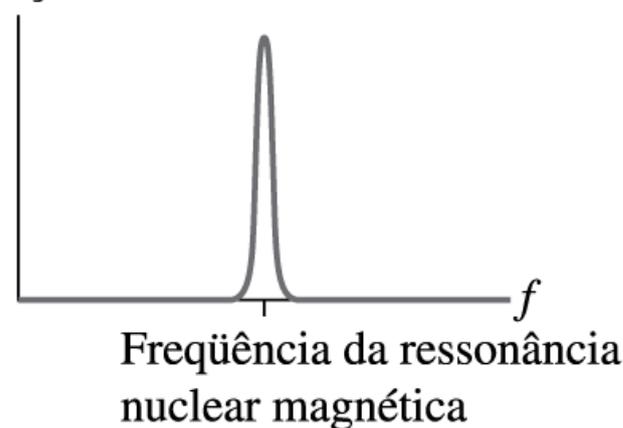
O campo magnético está desligado. Os prótons com *spin up* e com *spin down* possuem a mesma energia.

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.



Fissão Nuclear

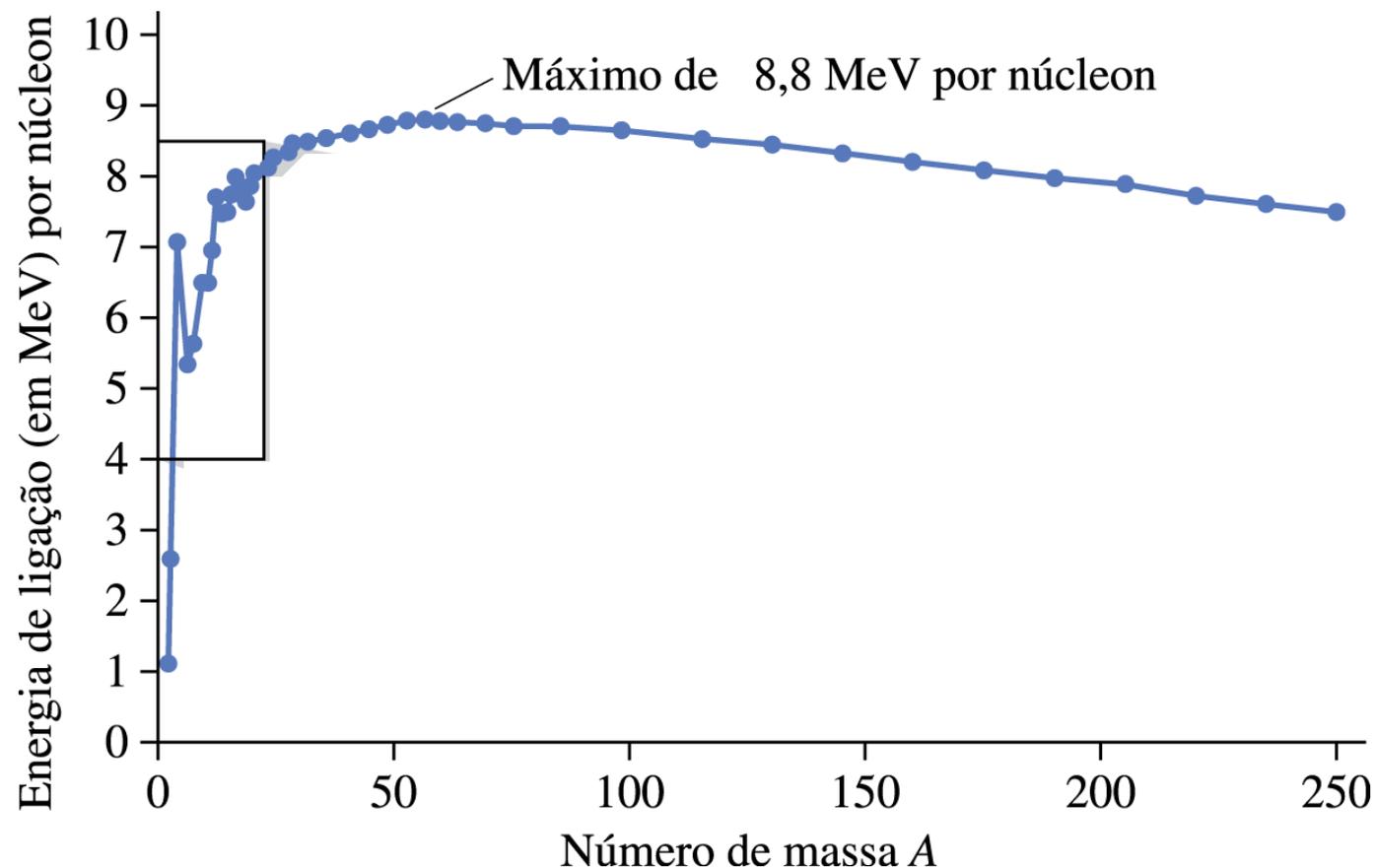
**Conteúdo a ser estudado no livro:
Fundamentos de Física - Halliday&Resnick**



Fissão Nuclear

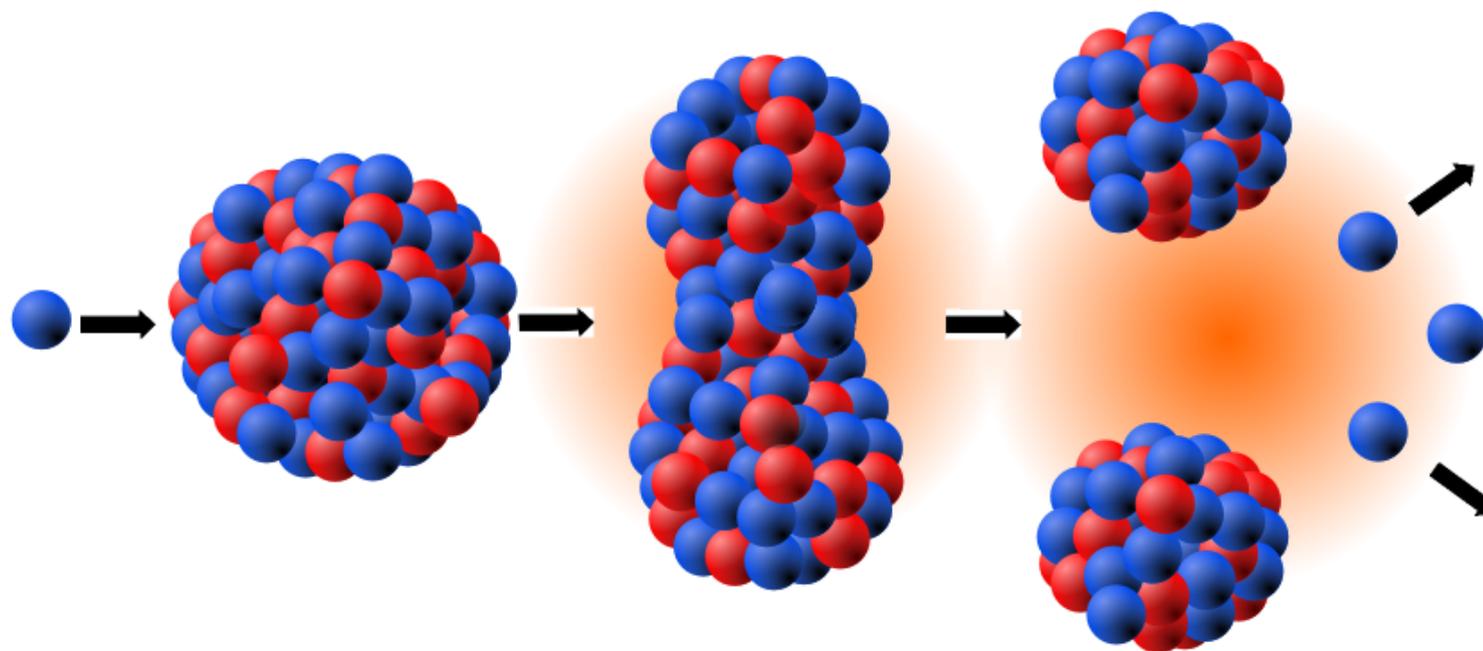
Lembrando...

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





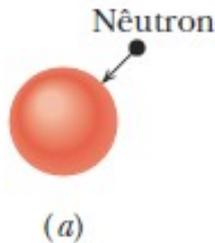
Fissão Nuclear



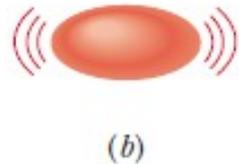


Fissão Nuclear (Bohr e Wheeler) - ^{235}U

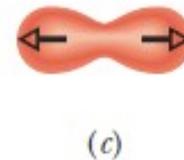
O ^{235}U absorve um nêutron térmico (de baixa energia cinética) e se torna ^{236}U .



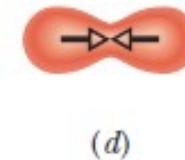
Parte da massa se transforma em energia, que faz o núcleo oscilar.



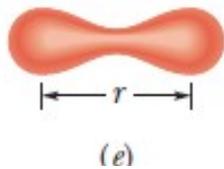
As oscilações produzem um pescoço; os prótons possuem carga positiva e se repelem mutuamente.



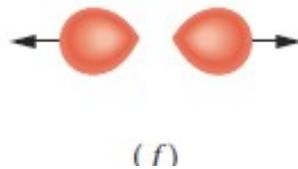
Ao mesmo tempo, prótons e nêutrons se atraem mutuamente pela interação nuclear.



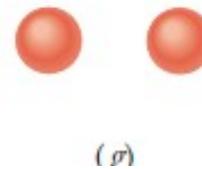
A interação nuclear diminui rapidamente com a distância.



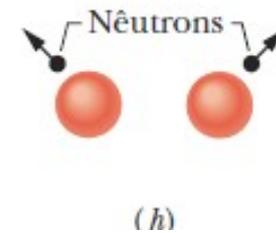
A repulsão elétrica prevalece e o núcleo se divide em duas partes.



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



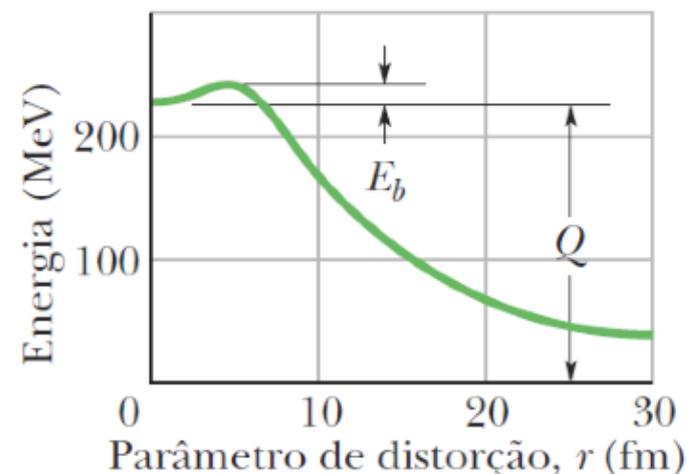
Os fragmentos possuem um excesso de nêutrons, que são ejetados.





Fissão Nuclear

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



Energia de Excitação e Barreira de Potencial para Quatro Nuclídeos Pesados

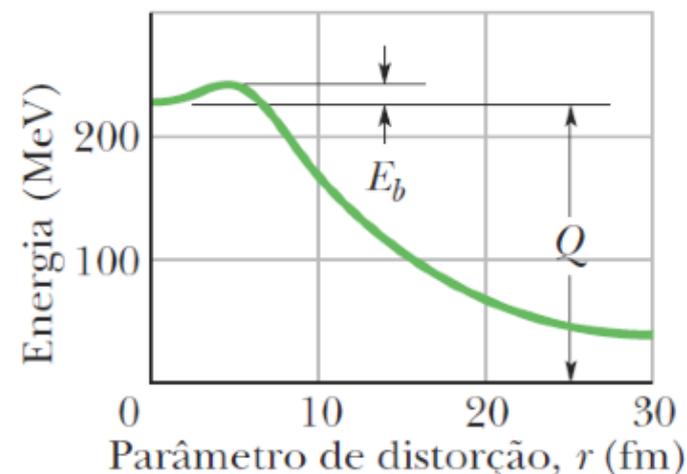
Nuclídeo Inicial	Nuclídeo Formado	E_n (MeV)	E_b (MeV)	Fissão por Nêutrons Térmicos?
^{235}U	^{236}U	6,5	5,2	Sim
^{238}U	^{239}U	4,8	5,7	Não
^{239}Pu	^{240}Pu	6,4	4,8	Sim
^{243}Am	^{244}Am	5,5	5,8	Não

Quando o ^{235}U captura um nêutron térmico ele tem 85 % de chance de fissionar, e 15 % de emitir radiação γ .



Fissão Nuclear

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



Energia de Excitação e Barreira de Potencial para Quatro Nuclídeos Pesados

Nuclídeo Inicial	Nuclídeo Formado	E_n (MeV)	E_b (MeV)	Fissão por Nêutrons Térmicos?
^{235}U	^{236}U	6,5	5,2	Sim
^{238}U	^{239}U	4,8	5,7	Não
^{239}Pu	^{240}Pu	6,4	4,8	Sim
^{243}Am	^{244}Am	5,5	5,8	Não

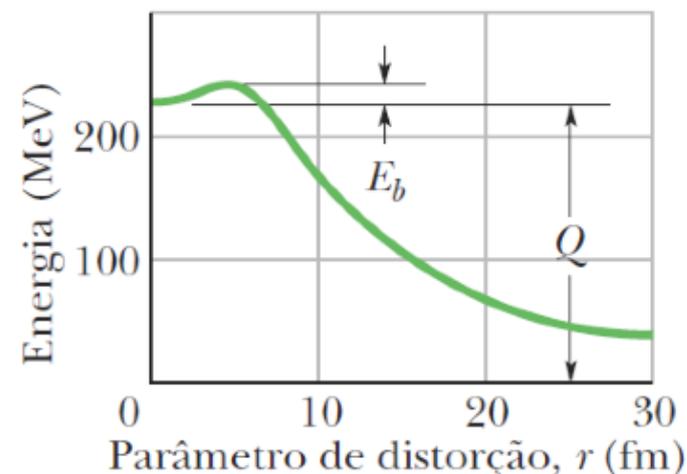
Qual a energia que o nêutron térmico acrescenta ao núcleo?

$$m(^{235}\text{U}) = 235,043924u; m(^{236}\text{U}) = 236,0445562u; n=1,008665u$$



Fissão Nuclear

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



Energia de Excitação e Barreira de Potencial para Quatro Nuclídeos Pesados

Nuclídeo Inicial	Nuclídeo Formado	E_n (MeV)	E_b (MeV)	Fissão por Nêutrons Térmicos?
^{235}U	^{236}U	6,5	5,2	Sim
^{238}U	^{239}U	4,8	5,7	Não
^{239}Pu	^{240}Pu	6,4	4,8	Sim
^{243}Am	^{244}Am	5,5	5,8	Não

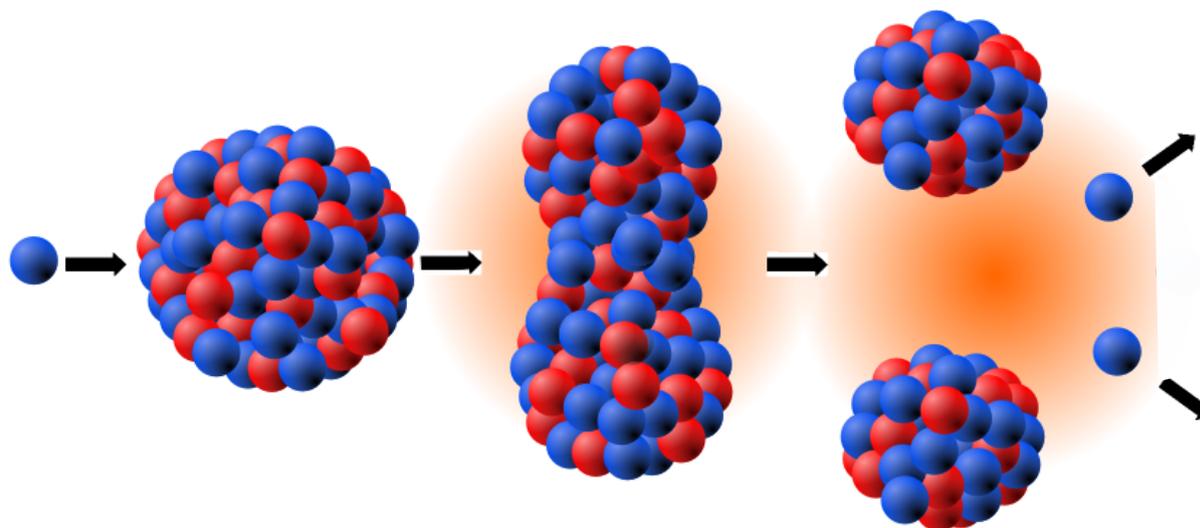
Qual a energia que o nêutron térmico acrescenta ao núcleo?

$$m(^{235}\text{U}) = 235,043924u; m(^{236}\text{U}) = 236,0445562u; n=1,008665u$$



Fissão Nuclear

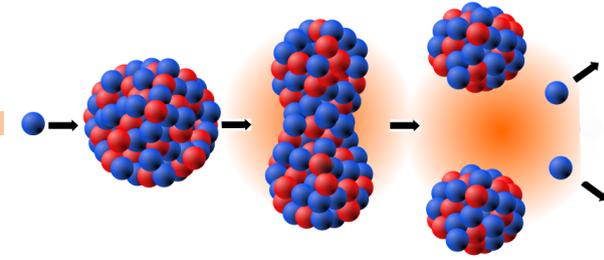
Ex: Urânio - ^{235}U



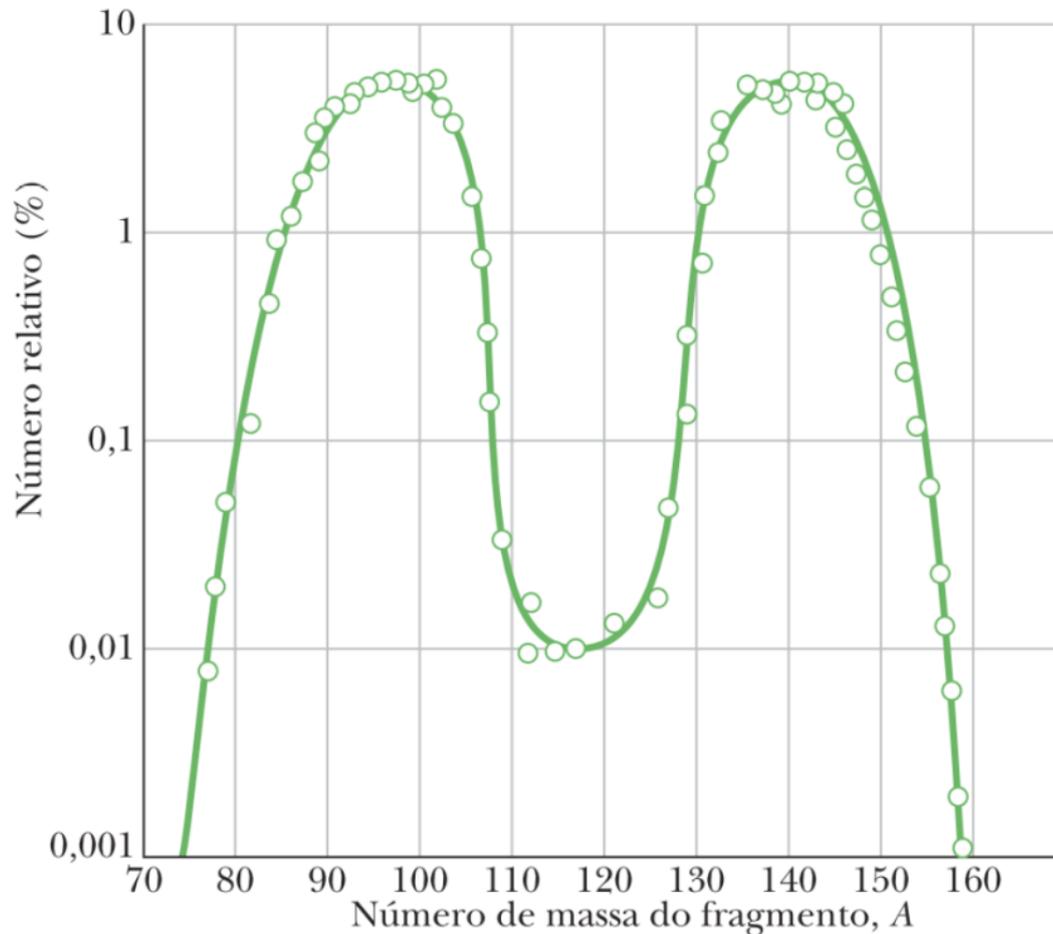
Um nêutron térmico (lento) com $k = 3/2 kT \sim 0,04\text{eV}$ é absorvido por um núcleo de ^{235}U . Dois nêutrons muito energéticos ($k \sim 1\text{MeV}$ ou maior) são ejetados no processo de fissão.



Fissão Nuclear



Ex: Urânio - ^{235}U



Um mesmo núcleo pode se fissionar de muitas maneiras, com diferentes probabilidades.

Em ~7% dos eventos de fissão do urânio há a produção de núcleos com $A \sim 94$ e 140

(ex: ^{140}Xe e ^{94}Sr)

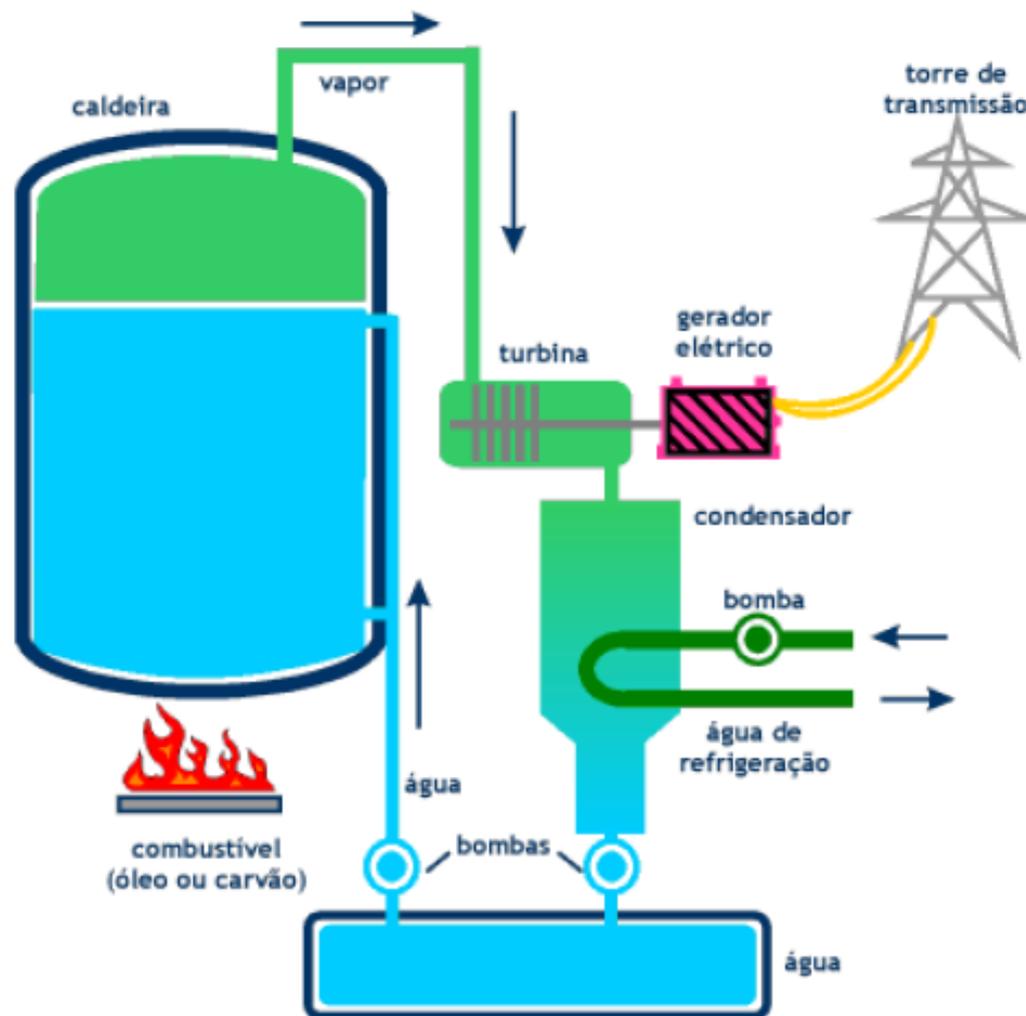


Utilizando a Energia Nuclear...



Energia Nuclear

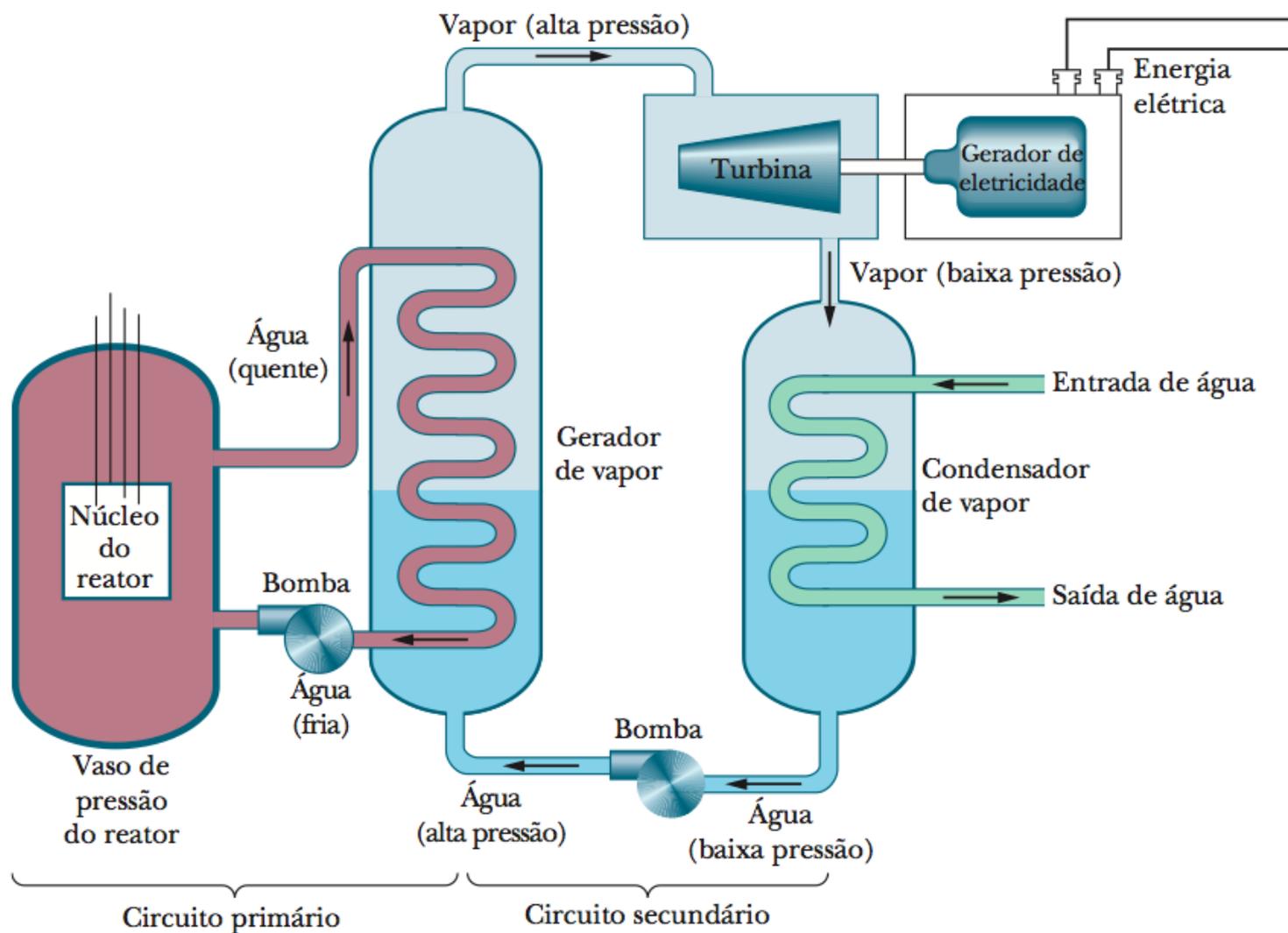
Usina Termoelétrica





Energia Nuclear

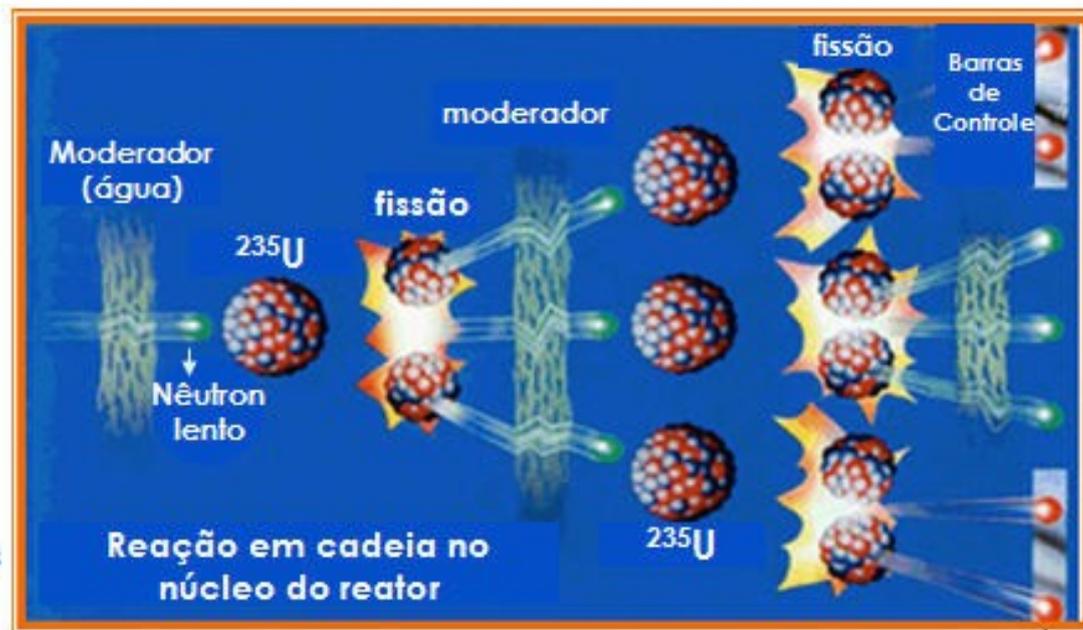
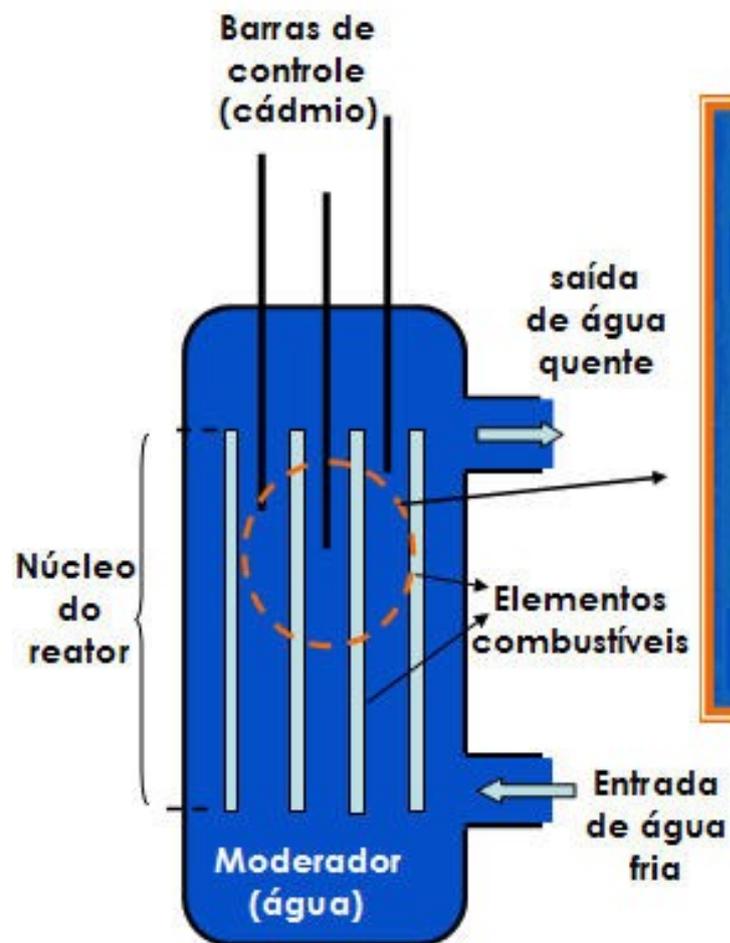
Usina Termoelétrica





Energia Nuclear

O reator nuclear em funcionamento...

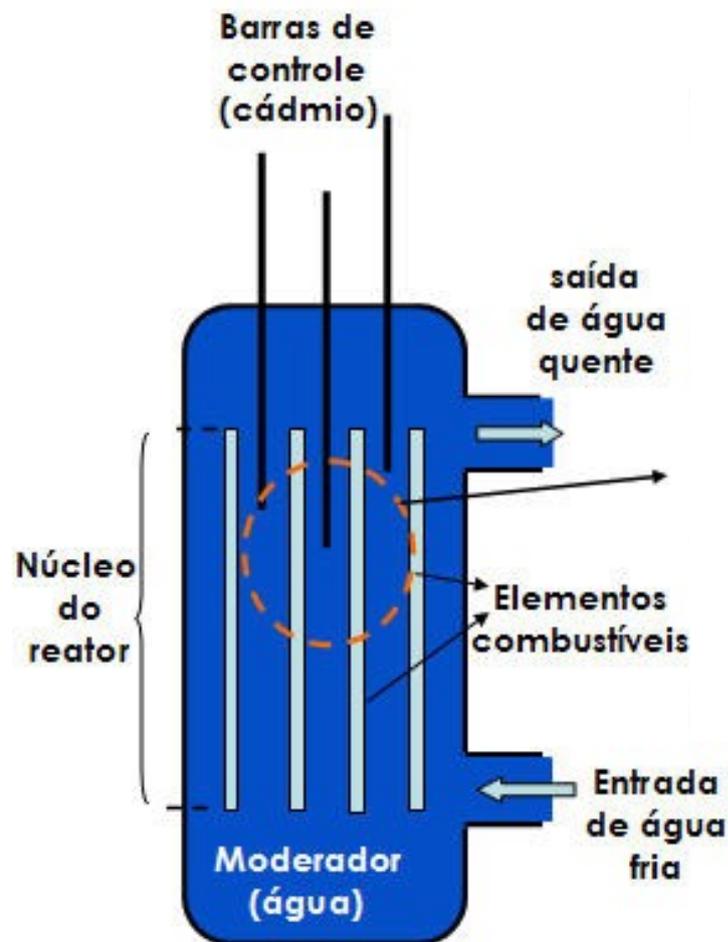


Barras de controle



Energia Nuclear

O reator nuclear em funcionamento...



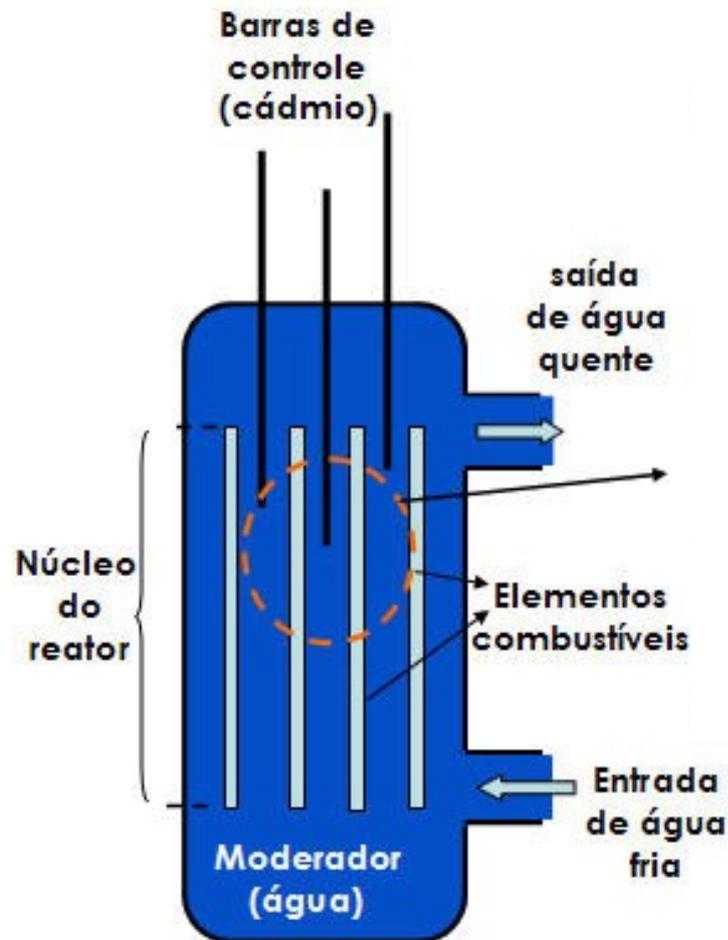
Problemas e soluções:

- 1) Fuga de nêutrons pelas paredes:
→ reduz-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 absorvê-lo). O mais utilizado é H_2O (colisão nêutron – próton).



Energia Nuclear

O reator nuclear em funcionamento...



Problemas e soluções:

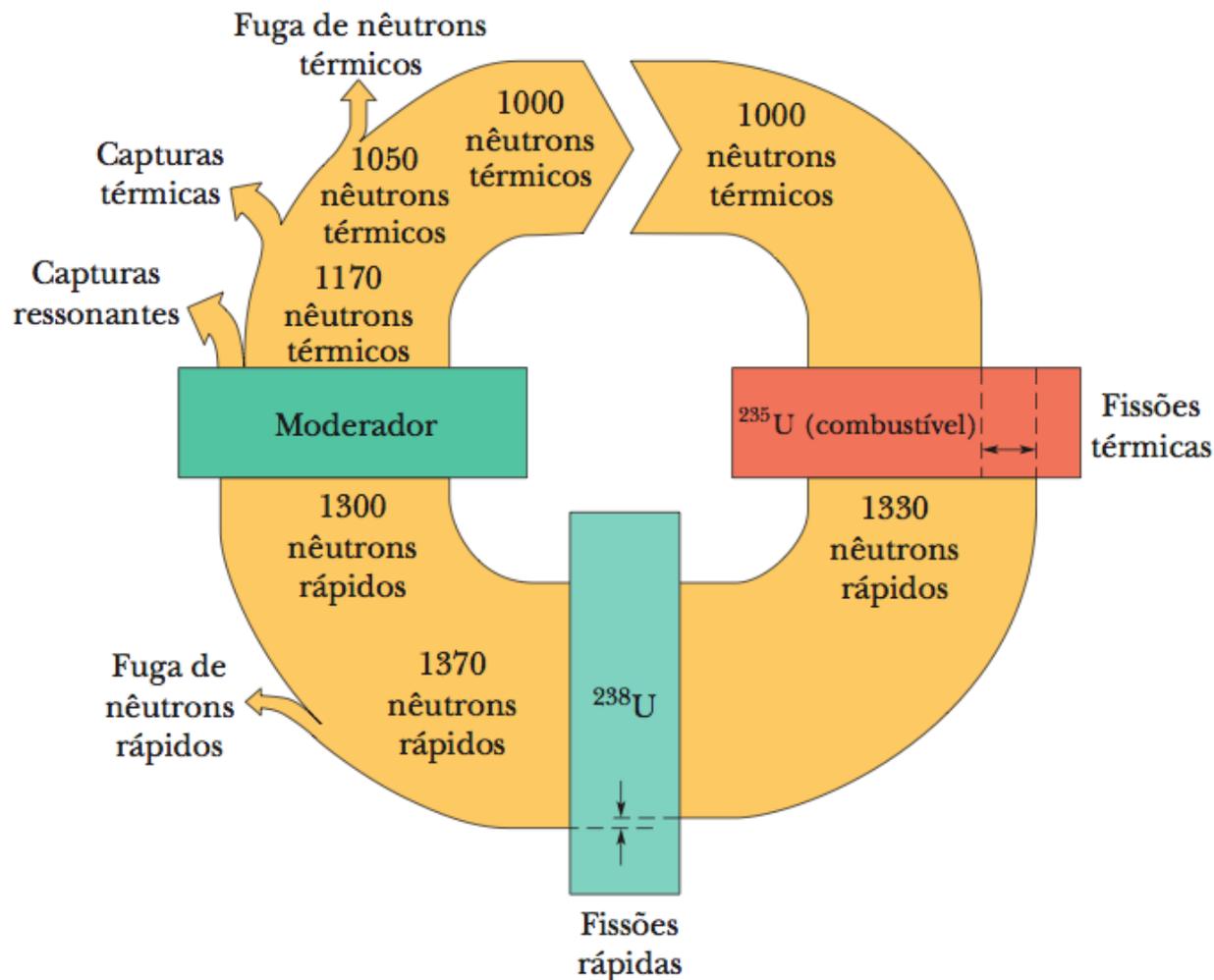
3) Captura ressonante de nêutrons - entre 1 e 100 eV existe uma grande probabilidade de ^{238}U absorver um nêutron (captura e emite um γ)

4) Captura térmica – às vezes ^{235}U captura nêutrons térmicos sem se fissionar



Energia Nuclear

O reator nuclear em funcionamento...



Fator de multiplicação

$$k = \frac{\text{nêutrons } 2^{\text{a}} \text{ geração}}{\text{nêutrons } 1^{\text{a}} \text{ ger.}}$$

$k < 1$ – regime subcrítico:
reação não se sustenta

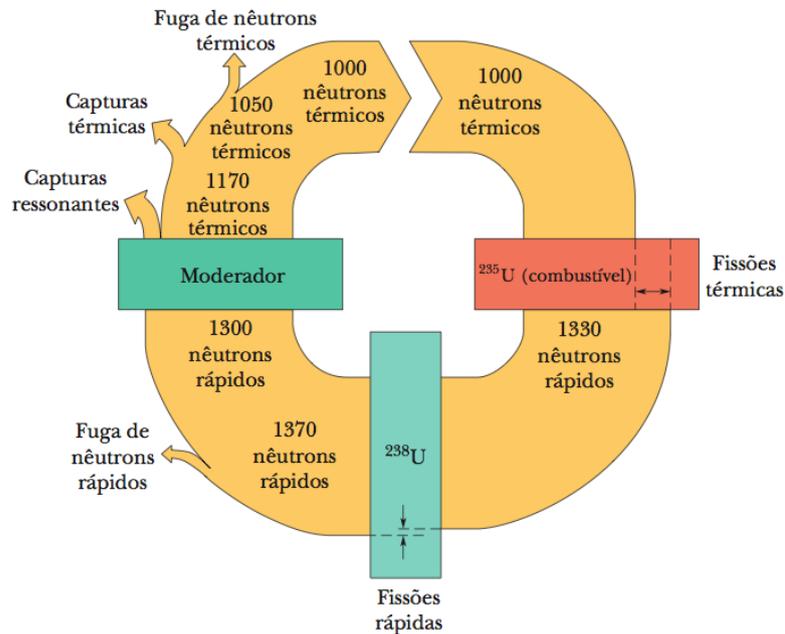
$k > 1$ – regime supercrítico:
reação sai de controle

$k = 1$ – regime crítico (ideal)



Energia Nuclear

O reator nuclear em funcionamento...



Fator de multiplicação

$$k = \frac{\text{nêutrons } 2^{\text{a}} \text{ geração}}{\text{nêutrons } 1^{\text{a}} \text{ ger.}}$$

$k < 1$ – regime subcrítico:
reação não se sustenta

$k > 1$ – regime supercrítico:
reação sai de controle

$k = 1$ – regime crítico (ideal)

Para manter crítico por longo período: preparar com $k > 1$, e inserir **barras de controle** (materiais que absorvem nêutrons) no reator para baixar até $k = 1$. Depois ir retirando barras à medida em que combustível vai sendo consumido.



Materiais Fissionáveis

Servem para gerar energia elétrica... ou bombas.

- O mais usado é ^{235}U . Quando bombardeados por nêutrons de qualquer energia, principalmente térmicos, tem boa chance de fissionarem, liberando grande quantidade de energia.
- O urânio que existe na natureza tem 0.7% de ^{235}U e 99.3% de ^{238}U .
- Para ser usado em um reator, é preciso enriquecer o urânio natural para 3.5% de ^{235}U .
- Métodos utilizados: difusão gasosa, ultracentrifugação, jato centrífugo, laser
- Para fazer uma bomba, é preciso enriquecer a 90%.



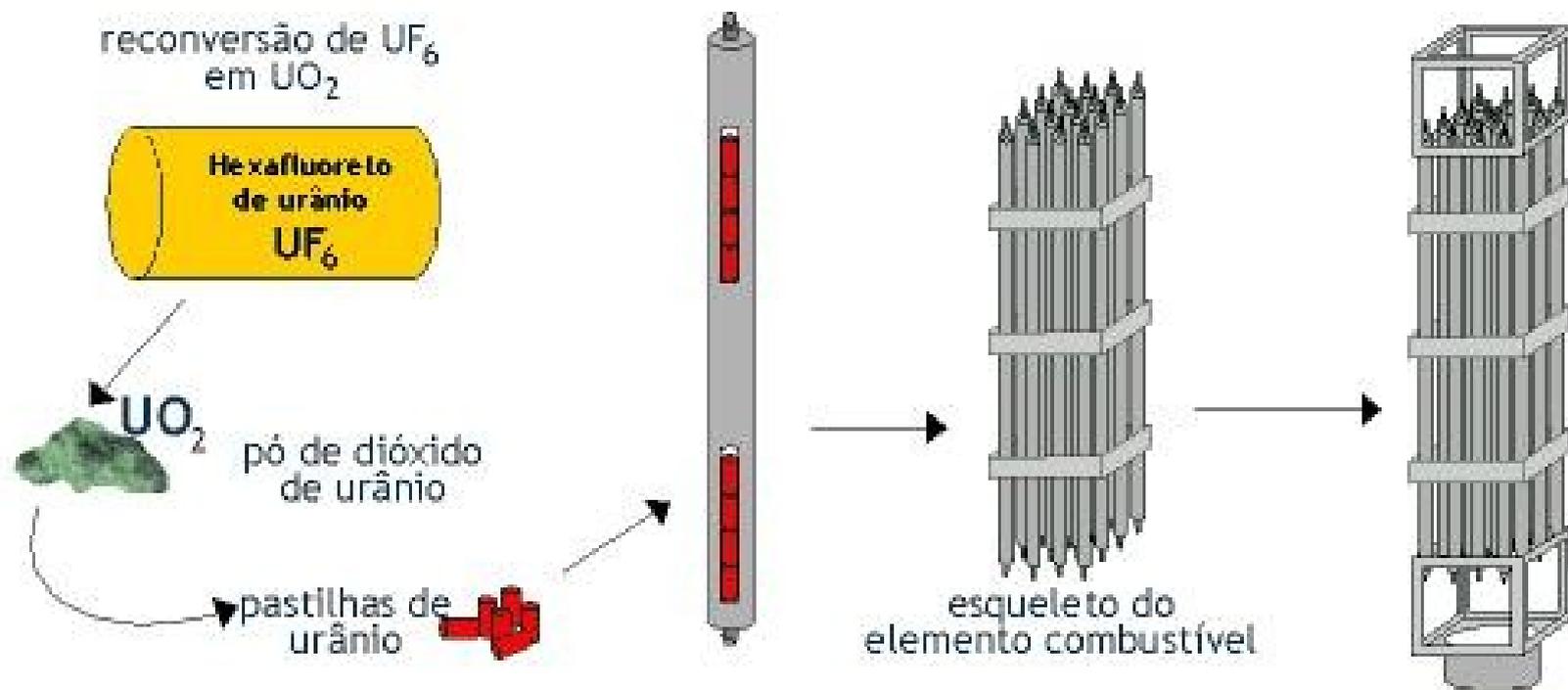
Materiais Fissionáveis

Porque então tanta preocupação com que países “não confiáveis” aprendam a enriquecer urânio?

- Porque quem aprende a enriquecer a 3.5% já sabe bastante para enriquecer a 90%. Já é metade do esforço!
- Países que sabem enriquecer (em geral) não ensinam a outros
- Problema de não proliferação (controle) X segredo industrial
- O Brasil está entre os poucos países que dominou essa tecnologia: o urânio usado em Angra I e II é enriquecido no centro nuclear de Aramar, perto de Resende (RJ)

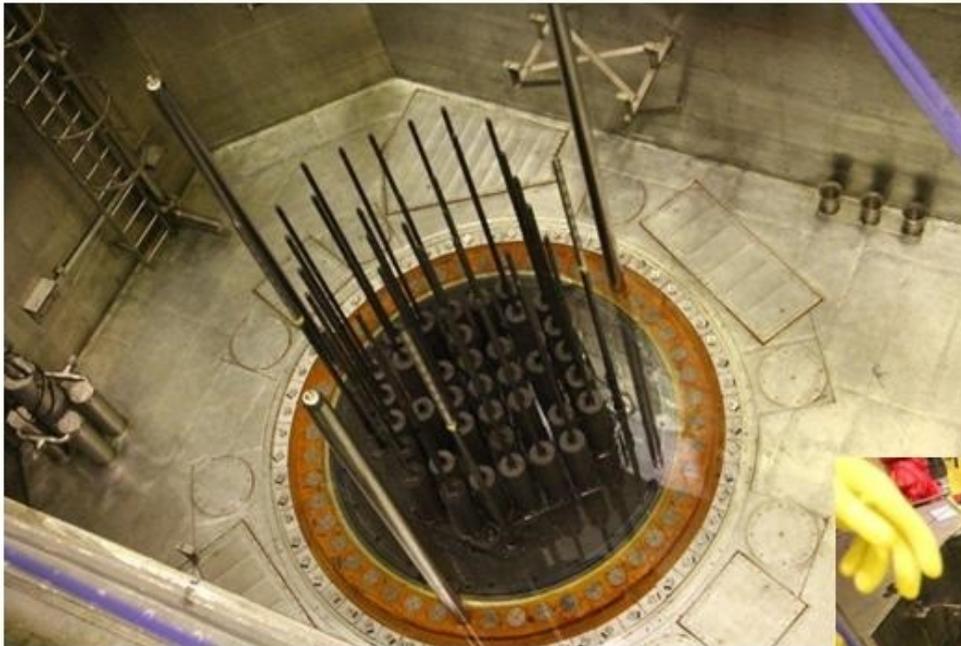


Materiais Fissionáveis



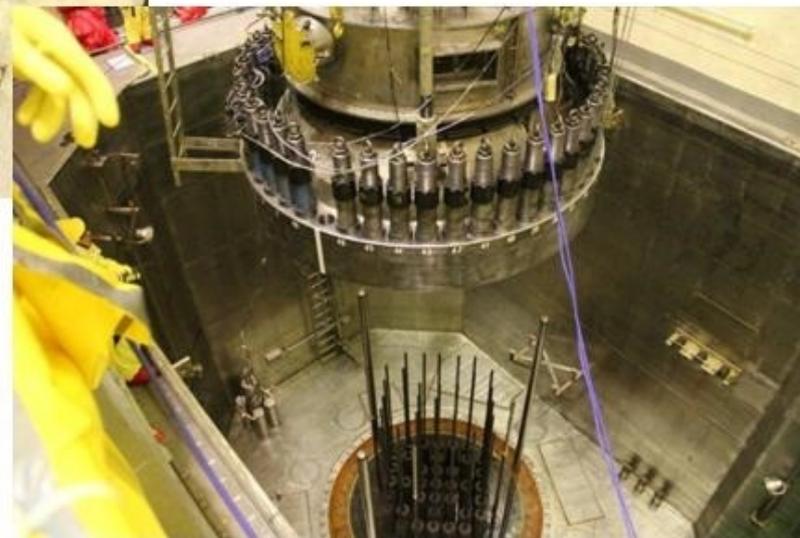


Materiais Fissionáveis



À esquerda: detalhe das barras de controle de Angra 1

À direita: a cabeça do reator sendo acoplada ao sistema de barras de controle de Angra 1





Materiais Fissionáveis



**Local: União Soviética (hoje
fronteira Ucrânia / Bielorrússia)**

56 mortes (até agora): 47
trabalhadores e 9 crianças com
câncer.

Causa: erro na inserção das barras de
controle, levando a reação com $k > 1$ e
derretimento do núcleo do reator.



Prós e contras da Energia Nuclear

- É “limpa”, i.e., está entre as que causam menos danos ecológicos (se não houver acidentes): não polui a atmosfera, não alaga grandes regiões, não causa aquecimento global (efeito estufa).

Desvantagens

- É cara (custos de construção / enriquecimento / segurança / deposição de lixo radioativo/ desativação de usinas...)
- Como o petróleo, o combustível um dia vai acabar
- Em caso de acidente, produz radiação no ambiente.
- Ainda não há solução para o lixo radioativo, em escala industrial (já se sabe como fazer, mas é caro e há perigo de proliferação de material para bombas).

As usinas estão sendo desativadas?

- A Alemanha fechou algumas usinas, e agora compra energia nuclear da França!!!!!! A China quer construir mais...



Fusão Nuclear



Fusão Nuclear

Fusão Termonuclear:

Combinação de dois núcleos leves com consequente formação de um núcleo mais pesado.

Ex.:



→ Um processo muito raro em condições normais devido a repulsão eletrostática entre núcleos positivos... Funciona como uma barreira de potencial.

No caso acima, a altura da barreira é de 400keV.



Fusão Nuclear

Fusão Termonuclear:

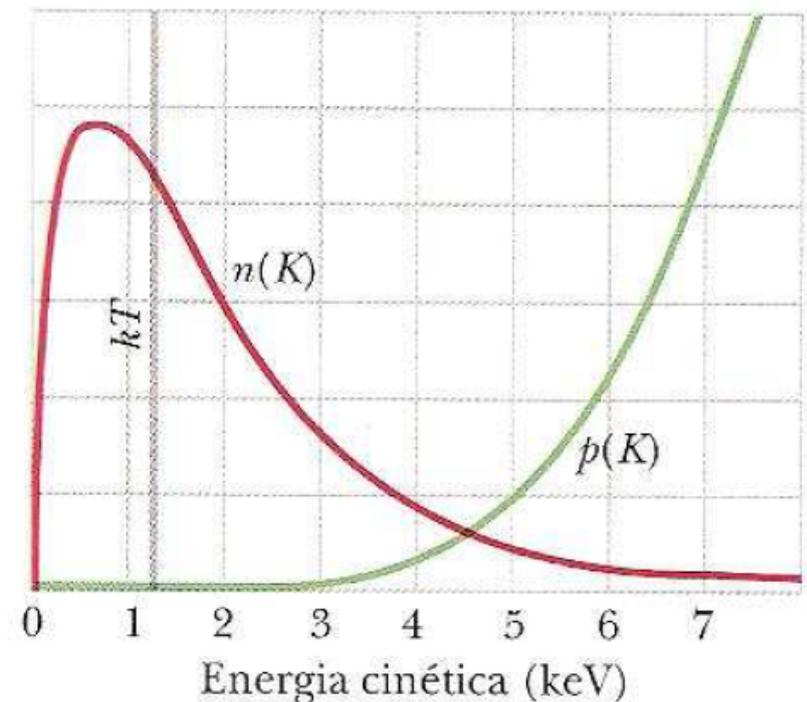
Combinação de dois núcleos leves com conseqüente formação de um núcleo mais pesado.

Ex.:



→ Um processo muito raro em condições normais devido a repulsão eletrostática entre núcleos positivos... Funciona como uma barreira de potencial.

— Prob. de fusão vs K
— N° de prótons vs K



$K = k_B T$ (energ. cinética típica): **1,3 keV** na temp. do núcleo solar ($1,5 \times 10^7$ K)

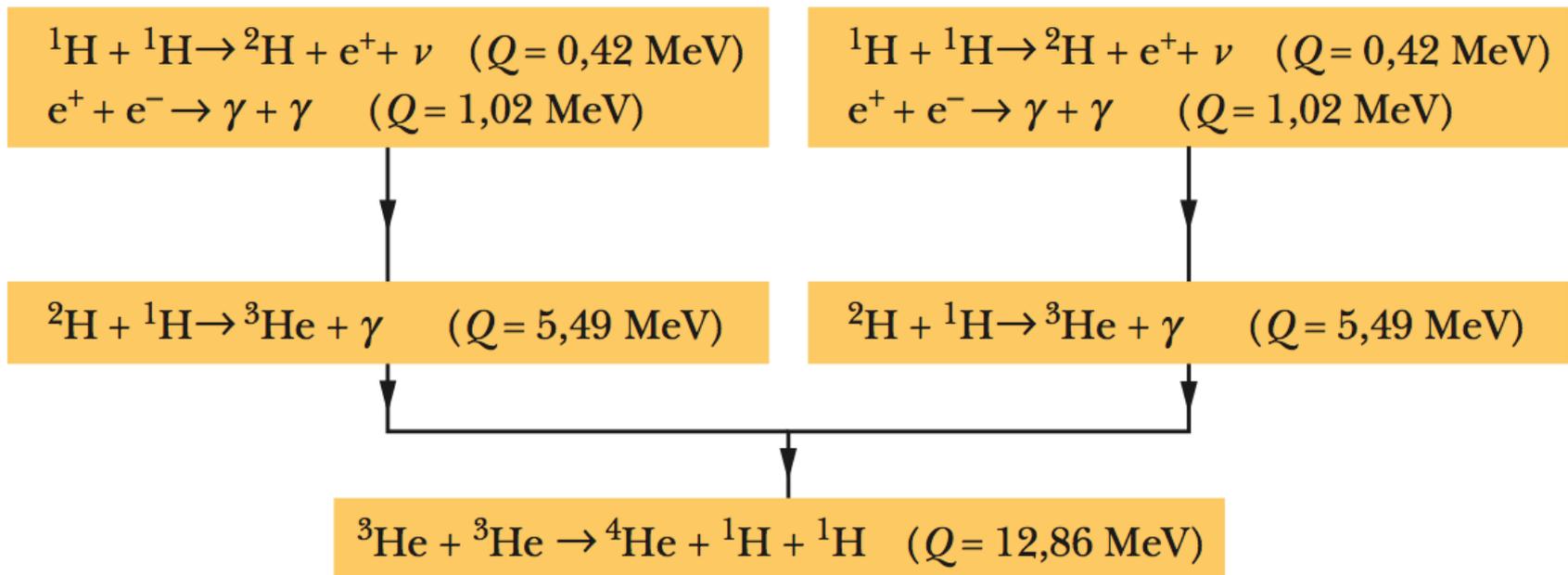
Barreira de potencial eletrostático para prótons: **400 keV** (muito maior!!)

Somente uma fração minúscula de prótons têm essa energia – mas mesmo assim são muitos numa estrela ! Suficiente p/ sustentar fusão!



Fusão Nuclear

Ciclo próton-próton:



Produção de Energia no Sol

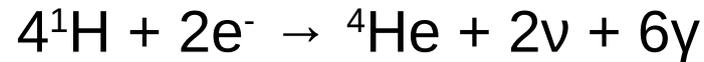


Fusão Nuclear

Fusão Termonuclear:

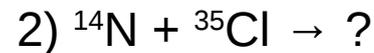
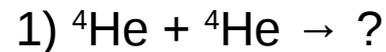
Formação de He

Ex.:



$$Q = -\Delta mc^2 = -[m_{\text{He}} - 4*m_{\text{H}}] = 26,7\text{MeV}$$

Problema: Qual a energia liberada?





Fusão Nuclear

Fusão Termonuclear:

Combinação de dois núcleos leves com consequente formação de um núcleo mais pesado.

Ex.:



→ Um processo muito raro em condições normais devido a repulsão eletrostática entre núcleos positivos... Funciona como uma barreira de potencial.

Dois núcleos quando se fundem produzem um terceiro núcleo com excesso de energia!



No dia 24 de novembro de 2006 vários jornais do mundo notificaram que Alexander Litvinenko, um ex-agente de espionagem russo, tinha morrido em Londres após ser envenenado por Polônio-210 (^{210}Po), uma substância radioativa extremamente tóxica ao organismo humano. Esse fato ganhou grande notoriedade pelos contornos de filme de espionagem (o agente teria ingerido chá contaminado por ex-colegas). O ^{210}Po tem meia vida de 138,4 dias, decaindo para o isótopo estável ^{206}Pb . Ele pode ser produzido artificialmente em aceleradores de partículas através do bombardeio de átomos estáveis de Bismuto ^{209}Bi com nêutrons, e também ocorre naturalmente como parte da cadeia de decaimento do Urânio-238. Dados:

massa atômica $^{210}\text{Po} = 209.9828737\text{u}$

energia térmica liberada em cada decaimento de um átomo de ^{210}Po : 5,3 MeV

1- Qual das seguintes alternativas melhor descreve a transição do ^{210}Po até seu descendente estável?

a) quatro decaimentos β^-

b) quatro decaimentos β^+

c) um único decaimento α

d) um único decaimento γ

e) quatro decaimentos β^- e um decaimento γ



No dia 24 de novembro de 2006 vários jornais do mundo notificaram que Alexander Litvinenko, um ex-agente de espionagem russo, tinha morrido em Londres após ser envenenado por Polônio-210 (^{210}Po), uma substância radioativa extremamente tóxica ao organismo humano. Esse fato ganhou grande notoriedade pelos contornos de filme de espionagem (o agente teria ingerido chá contaminado por ex-colegas). O ^{210}Po tem meia vida de 138,4 dias, decaindo para o isótopo estável ^{206}Pb . Ele pode ser produzido artificialmente em aceleradores de partículas através do bombardeio de átomos estáveis de Bismuto ^{209}Bi com nêutrons, e também ocorre naturalmente como parte da cadeia de decaimento do Urânio-238. Dados:

massa atômica $^{210}\text{Po} = 209.9828737\text{u}$

energia térmica liberada em cada decaimento de um átomo de ^{210}Po : 5,3 MeV

2*- Considerando-se que experimentos em laboratório mostraram que a ingestão de 6,67 nanogramas de ^{210}Po por quilograma de peso mata uma pessoa em 23 dias e que o ex-agente pesava 79,4kg, qual era a Atividade da amostra ingerida do dia do envenenamento (01 de novembro de 2006, exatamente 23 dias antes)?