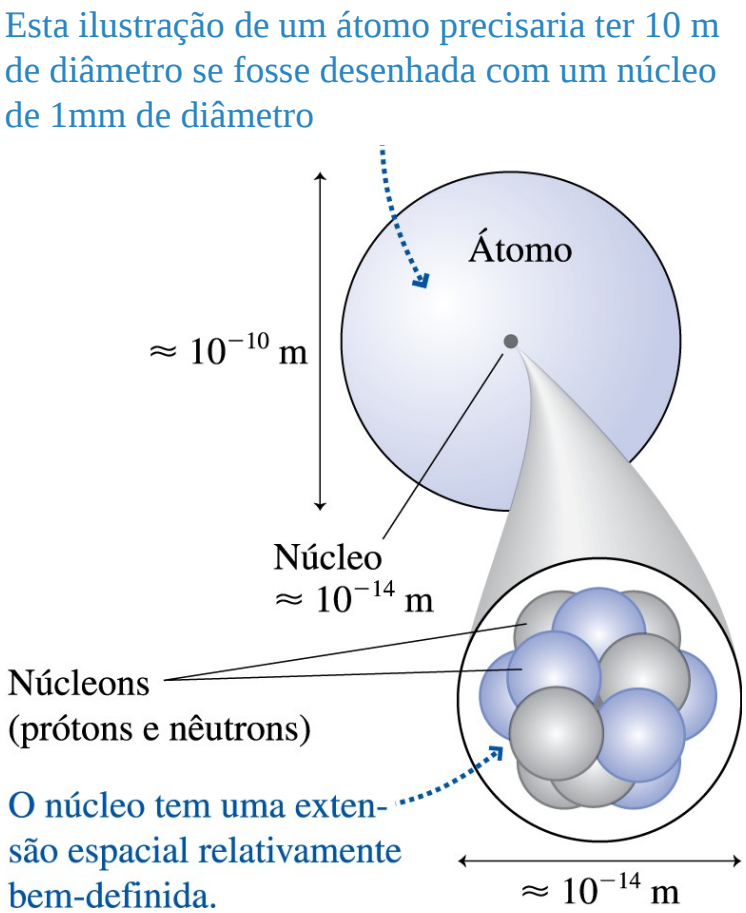
Física 4

Física Nuclear
(Cap 43; Halliday, Resnik, Walker 8ª ou 9ª ed.)

Instrutor: Prof. Carlos Eduardo (Cadu)

13/07/2016

Estrutura do Núcleo



- *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)

Estrutura do Núcleo

Teste Conceitual:

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

D) Pode ser maior, dependendo do valor de Z. É maior se Z>8!

Estrutura do Núcleo

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

- $1\ u = 1{,}6605 \times 10^{-27}\ kg \rightarrow uc^2 = (1{,}6605 \times 10^{-27}\ kg)(2.9979 \times 10^{8}\ m/s)^2$
  $= 1{,}4924 \times 10^{-10}\ J = 931.49\ MeV$

$$\boxed{1\ u = 931.49\ MeV/c^2}$$

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 %)* $\rightarrow m_{Cl} = 35.45u$

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

Estrutura do Núcleo

Teste Conceitual:

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

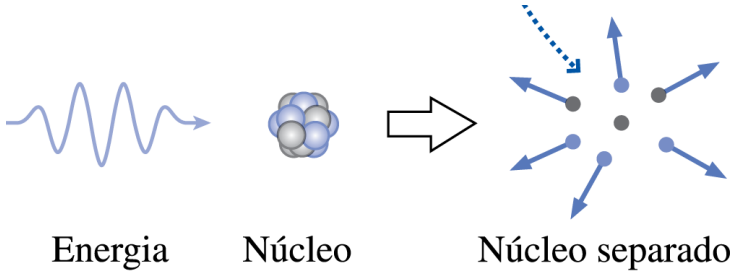
B) Menor, pois energia é liberada quando formamos o núcleo a partir das partículas

C) Igual, pois em ambos os casos o número de partículas se mantém

D) Pode ser maior, dependendo do valor de Z. É maior se Z>8!

Energia de Ligação

Energia necessária para separar o núcleo em núcleons individuais.



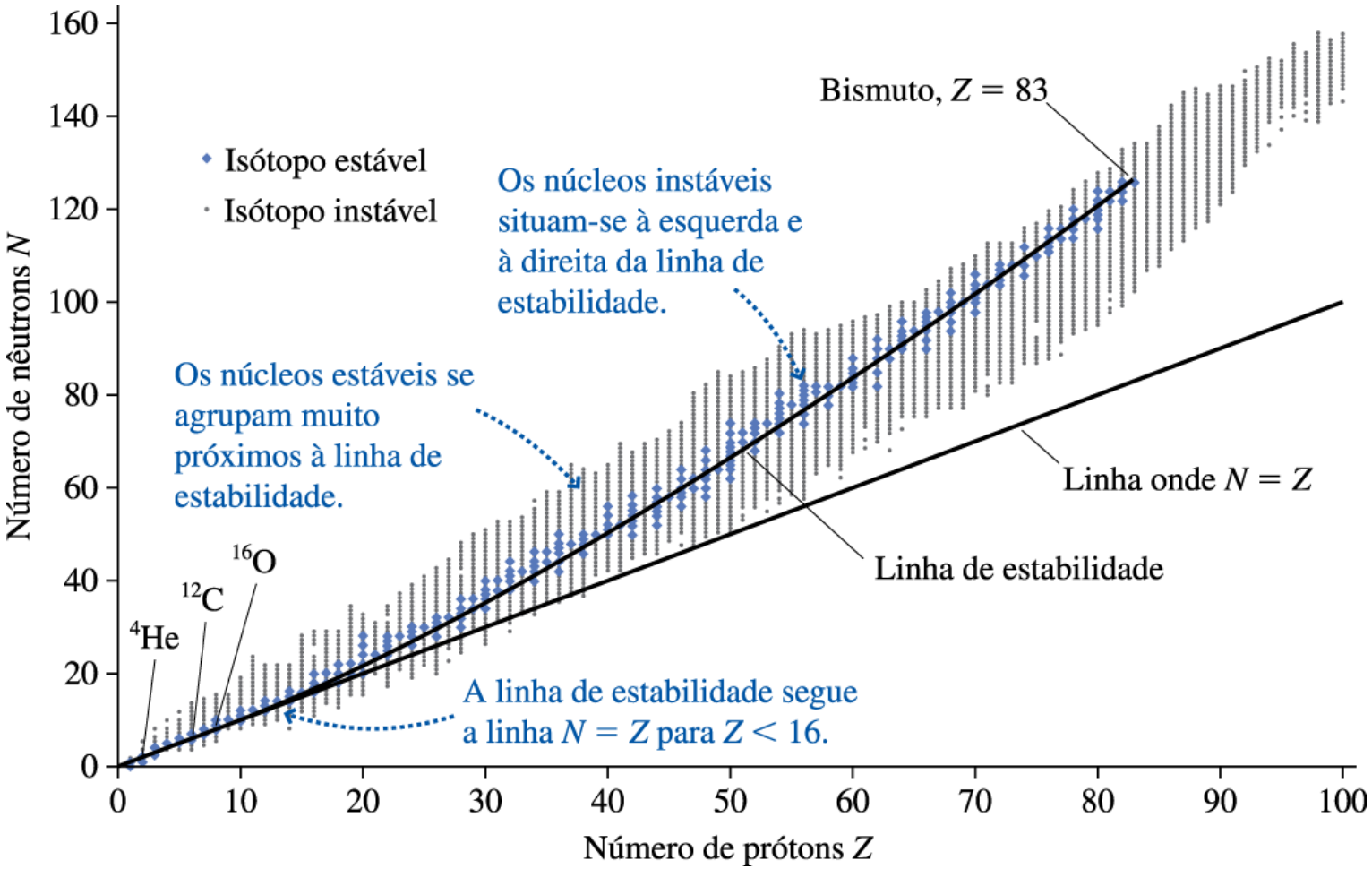
$$B \quad + \quad m_{\text{nuc}}c^2 \quad = \quad (Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}})c^2$$

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

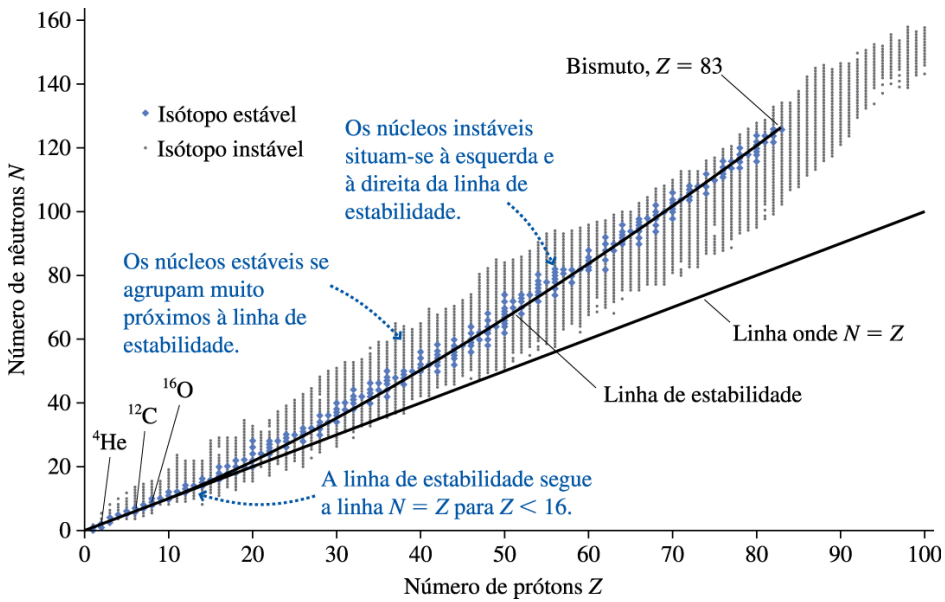
Partícula	Símbolo	Massa (u)	Massa (MeV/c^2)
Elétron	e	0,00055	0,51
Próton	p	1,00728	938,28 > u !
Nêutron	n	1,00866	939,57
Hidrogênio	^{1}H	1,00783	938,79
Deutério	^{2}H	2,01410	1876,12 < m(^{1}H) + m(p) !
Hélio	^{4}He	4,00260	3728,40 < 2 m(^{2}H) !

Curva de Estabilidade

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



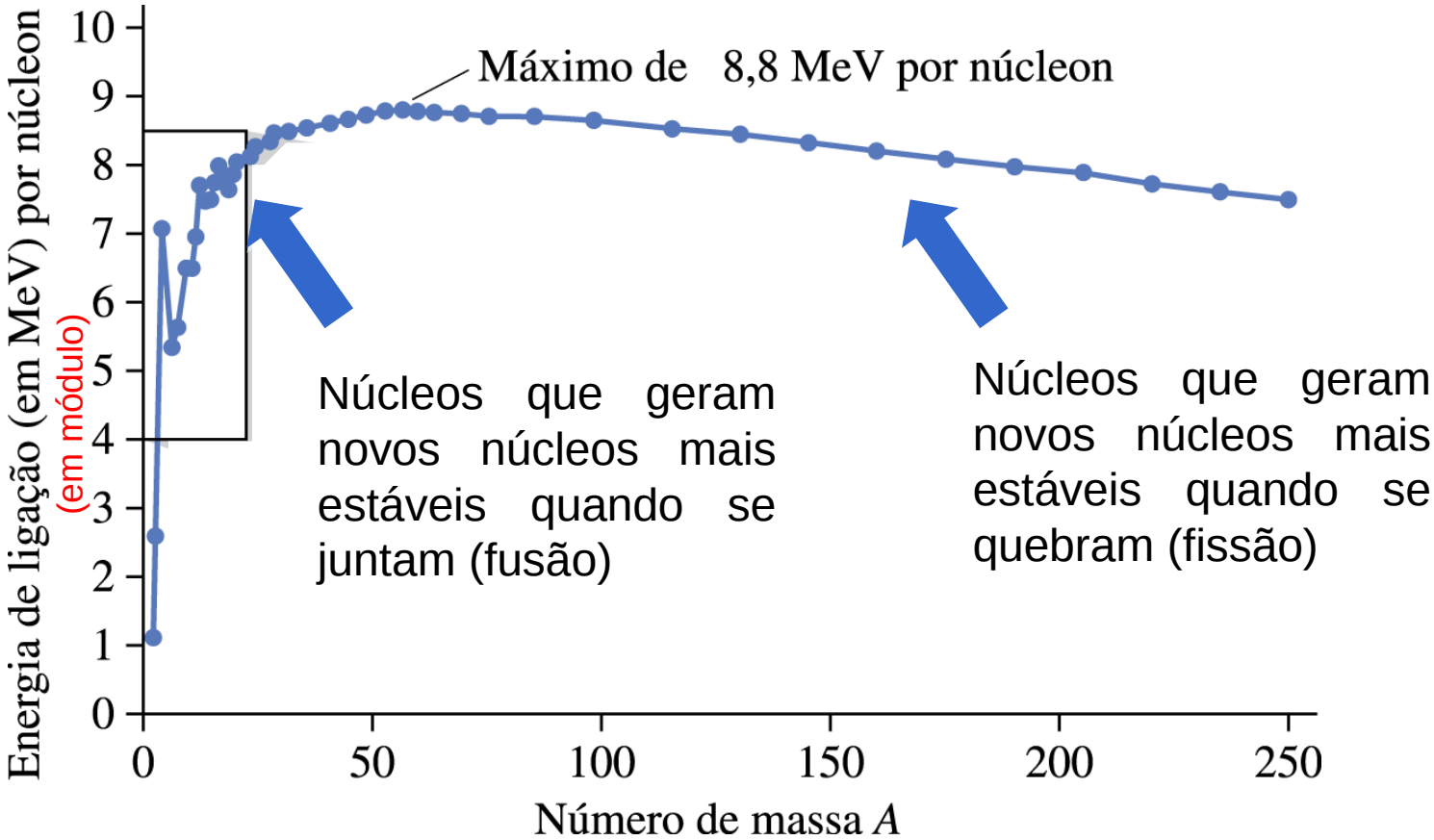
Curva de Estabilidade



- 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 ≅ 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)

Curva da Energia de Ligação

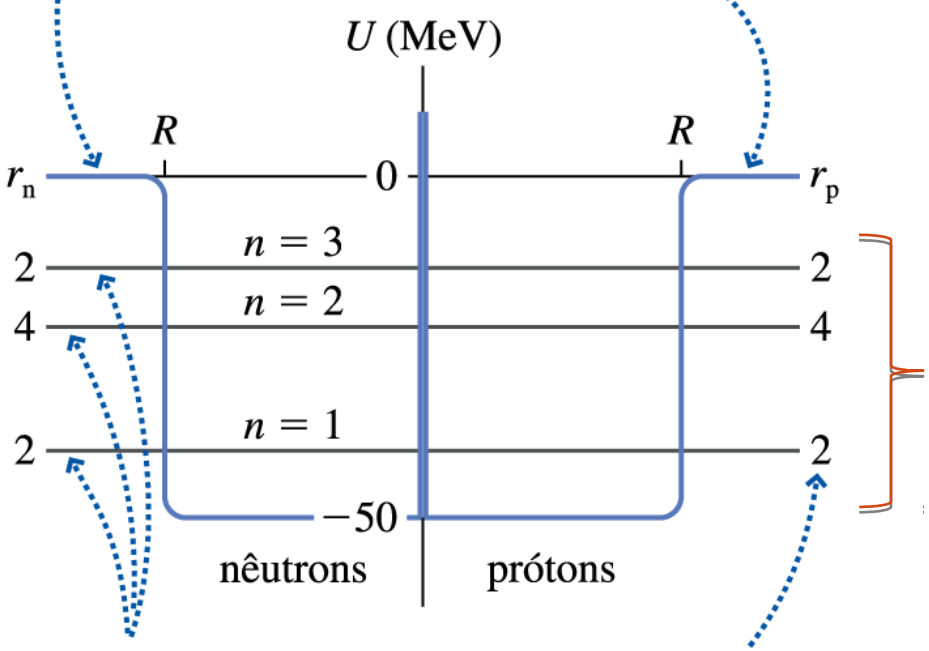
Um núcleo é mais coeso (i.e., mais estável) quanto maior for a sua **energia de ligação por núcleon** (= B/A)



Modelo de Camadas: Z < 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.



num. de estados permitidos em cada camada (obs: diferentes das camadas eletrônicas)

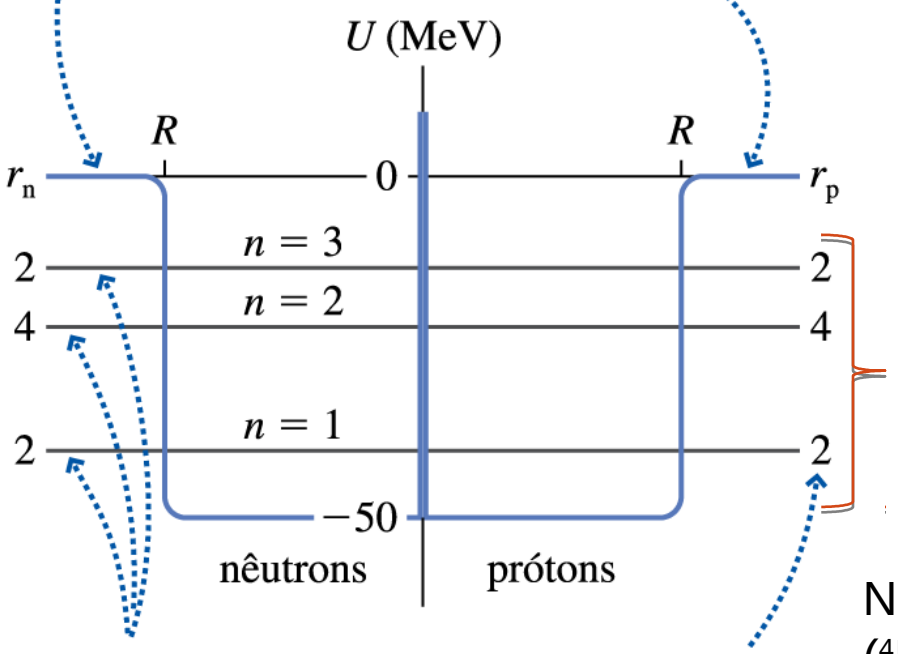
Estes são os três primeiros níveis de energia permitidos. Eles estão separados por muitos MeV.

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

Modelo de Camadas: Z < 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.



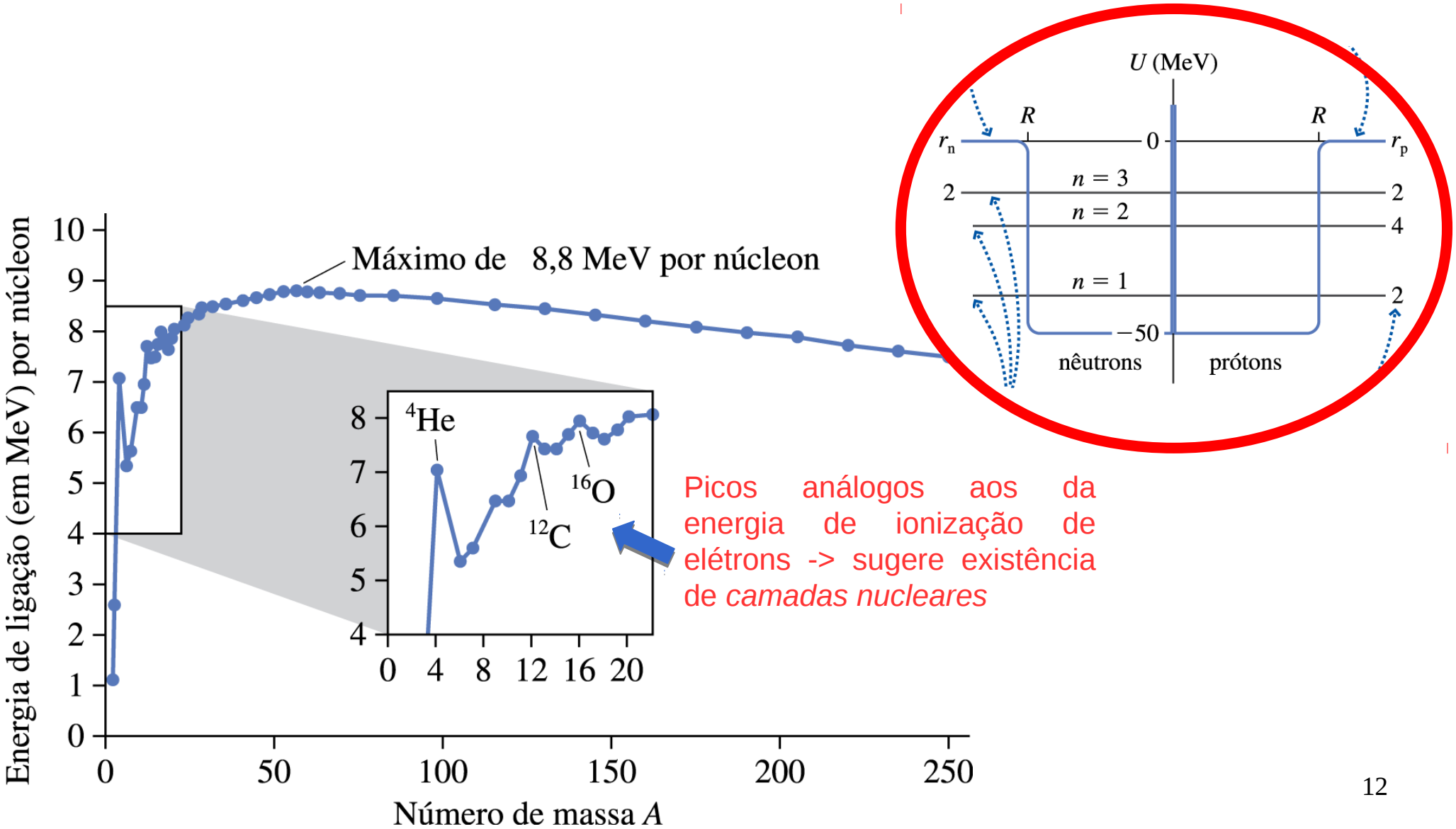
num. de estados permitidos em cada camada (obs: diferentes das camadas eletrônicas)

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

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

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

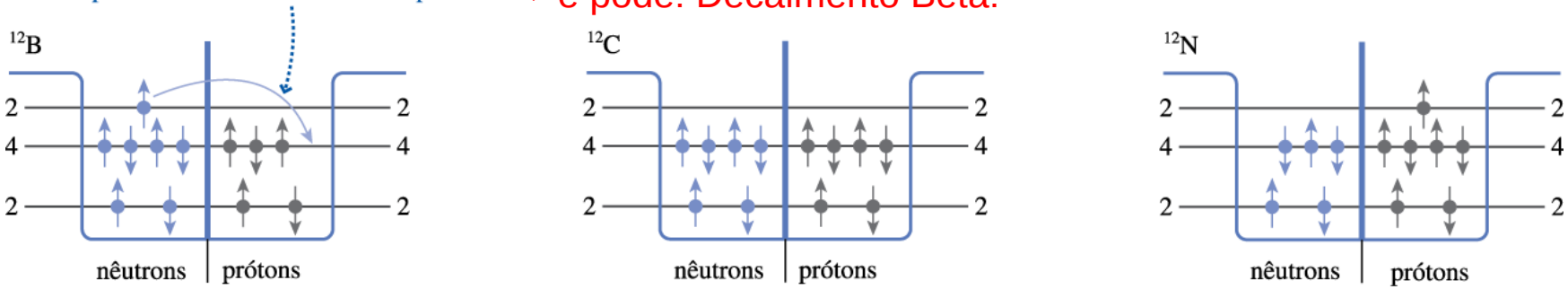
Modelo de Camadas: Z < 8!!



Picos análogos aos da energia de ionização de elétrons -> sugere existência de *camadas nucleares*

Modelo de Camadas: Z < 8!!

Um núcleo de ^{12}B poderia baixar sua energia se um nêutron pudesse se transformar em um próton. → e pode! Decaimento Beta!



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

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

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

Radioatividade

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

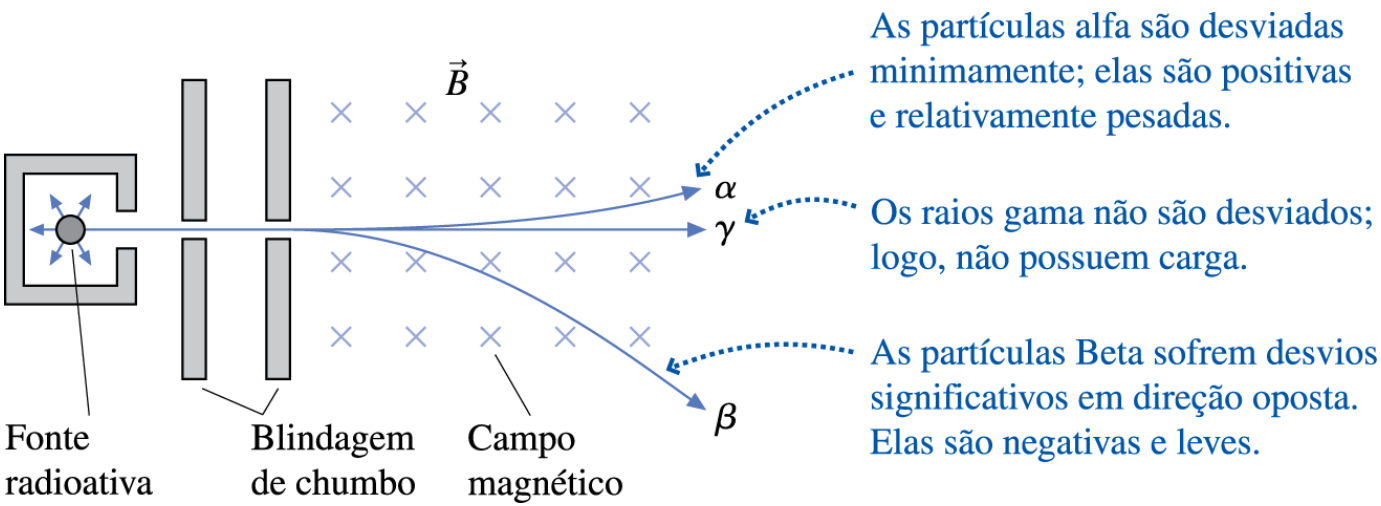


TABELA 43.3 Os três tipos de radiação

Radiação	Identificação	Carga	Blindada por
Alfa, α	Núcleo de ^{4}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

Teste Conceitual:

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}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

Teste Conceitual:

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?

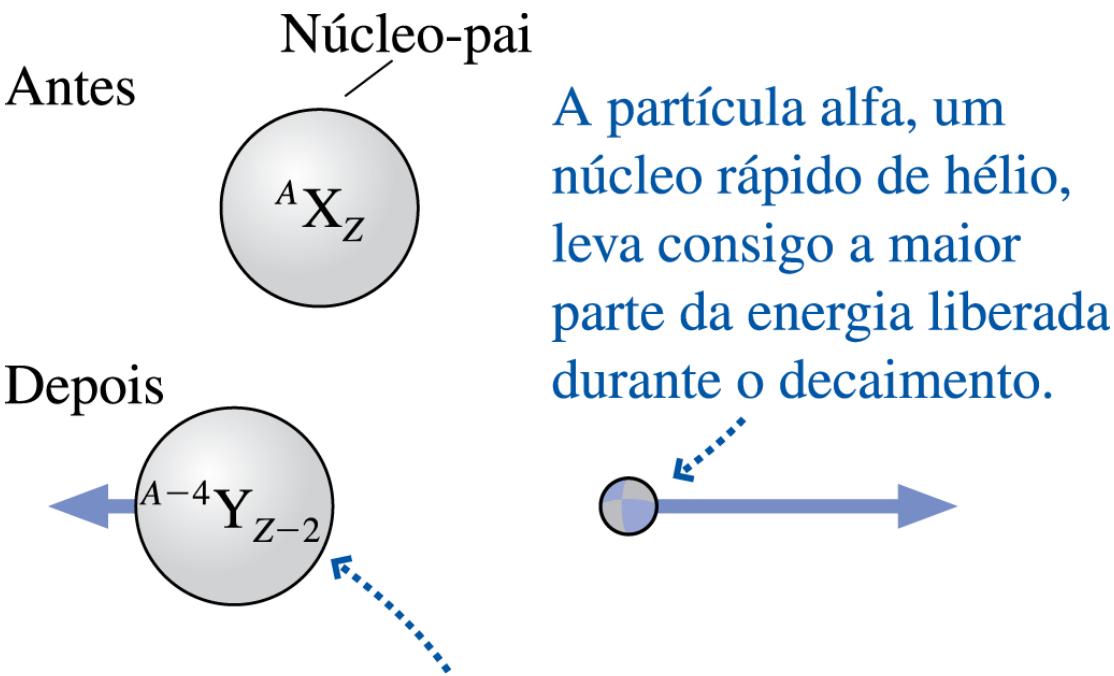
	Engole	Bolso	Mão
a)	α	β	γ
b)	β	α	γ
c)	β	γ	α
d)	γ	α	β

TABELA 43.3 Os três tipos de radiação

Radiação	Identificação	Carga	Blindada por
Alfa, α	Núcleo de ^{4}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

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.

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

Ex: $^{238}U \rightarrow {}^{234}Th + {}^{4}\alpha$

$m_U = 238{,}0505u$;

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

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

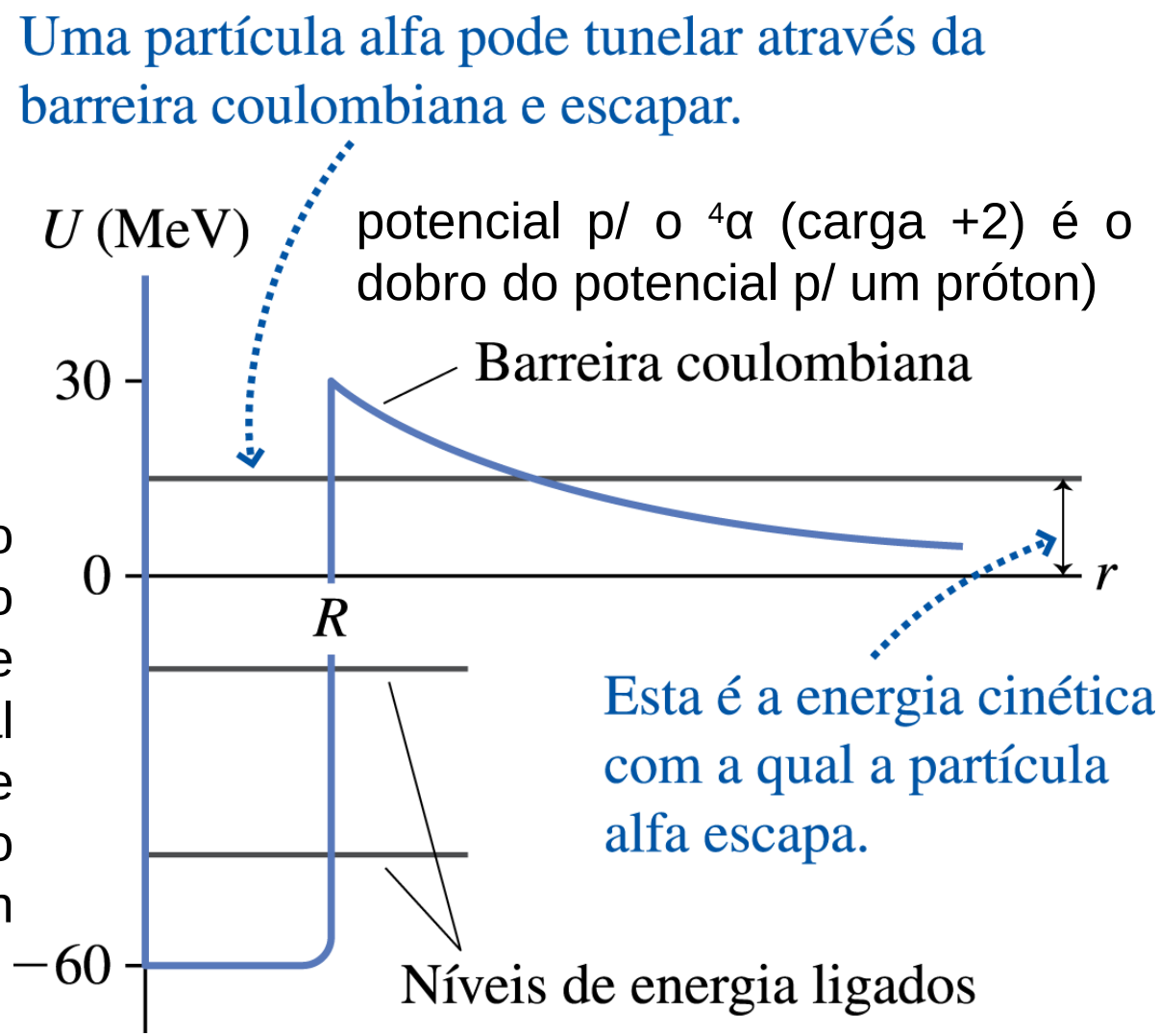
$\Delta E = (m_U - m_{Th} - m_{He})c^2$

$= 0{,}0046u = 4{,}3MeV \sim K_\alpha$

Decaimento Alfa

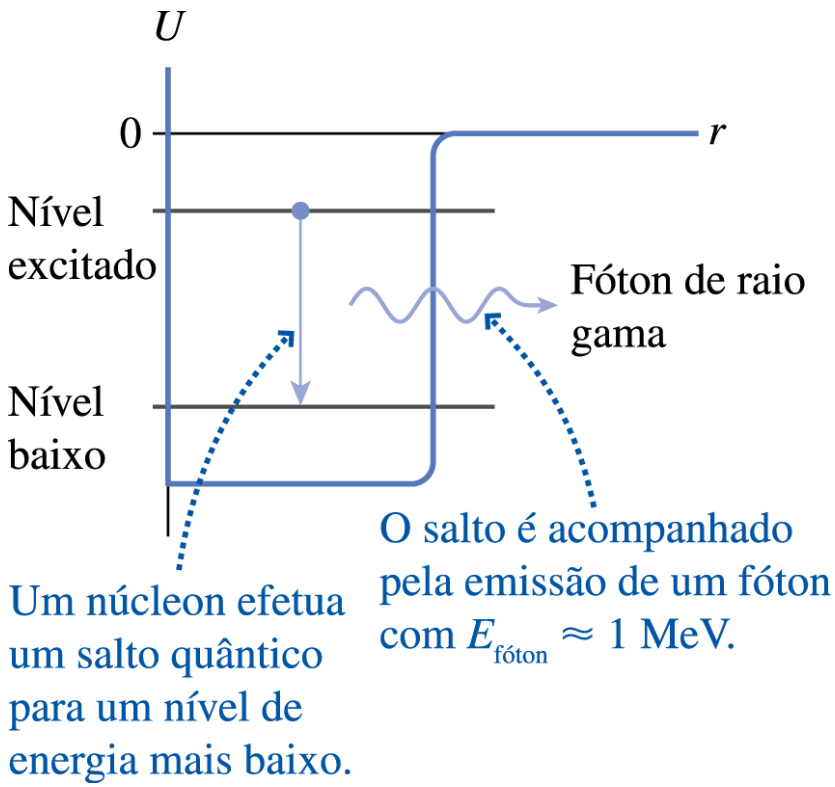
Mecanismo: tunelamento através da barreira Coulombiana

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!

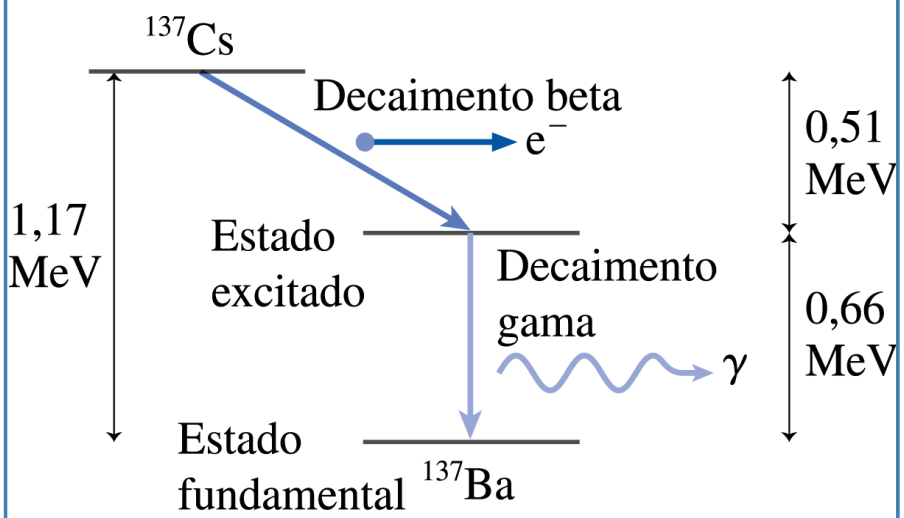


Decaimento Gama

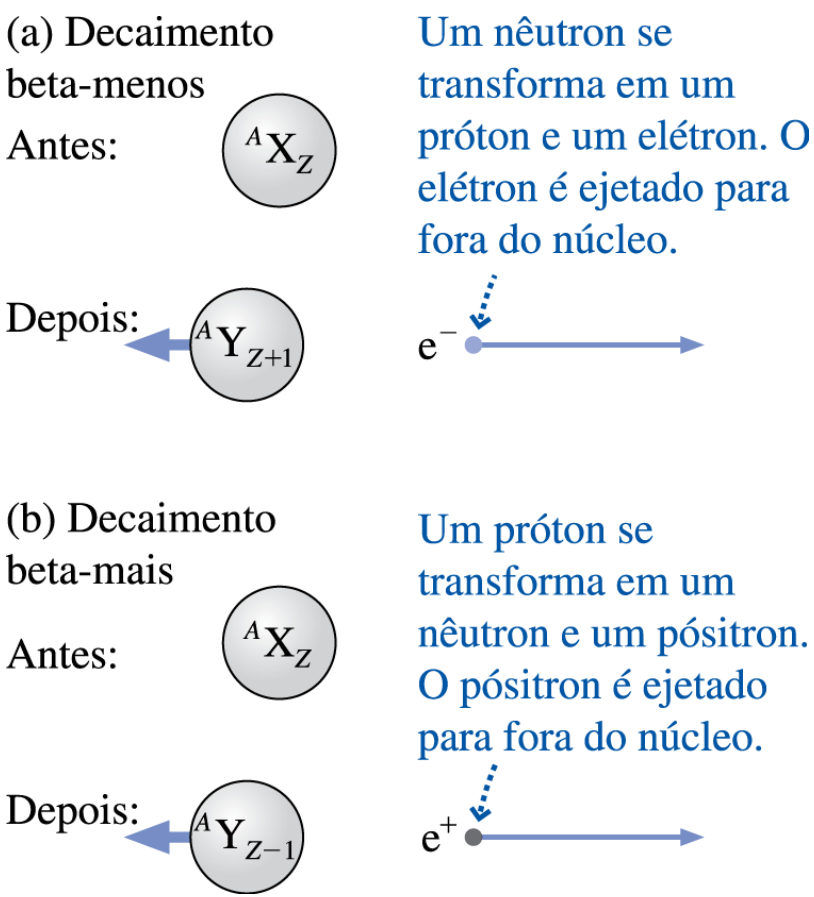
Mecanismo: emissão de um fóton pelo decaimento espontâneo de um núcleon de um nível mais excitado para um menos excitado. Note que isso não altera Z ou A



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



Decaimento Beta



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 <u>isolado</u> (fora de um núcleo)? E decaimento β^+ de um próton <u>isolado</u>?

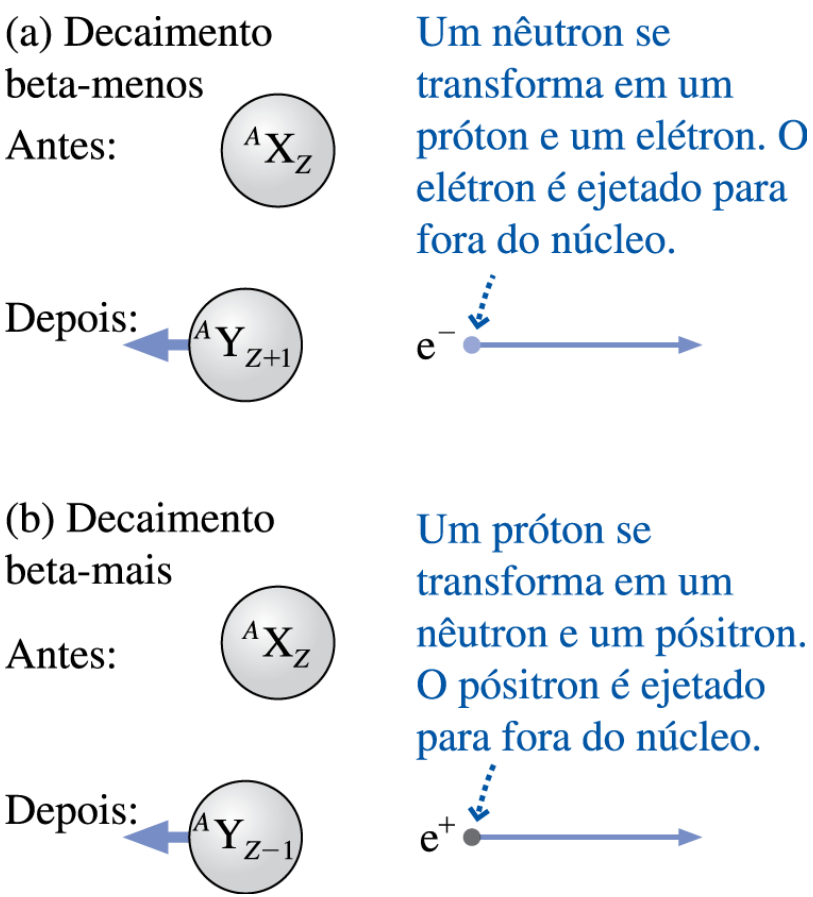
A) Sim e Sim

B) Sim e Não

C) Não e Sim

D) Não e Não

Decaimento Beta



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 <u>isolado</u> (fora de um núcleo)? E decaimento β^+ de um próton <u>isolado</u>?

A) Sim e Sim

B) Sim e Não

C) Não e Sim

D) Não e Não

Nêutrons isolados decaem após aprox. 10 minutos!

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

Decaimento Beta

O decaimento β^+ de um núcleo ${}^{A}_{Z}X$ para ${}^{A}_{Z-1}Y$ só é possível se $\mathbf{m_X > m_Y + m_e}$.

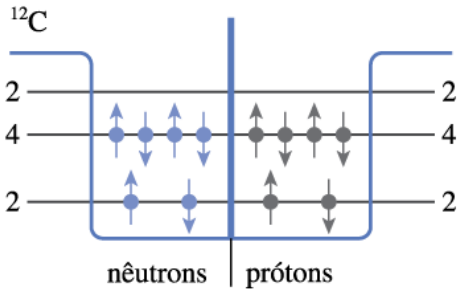
Como $m_p < m_n$, então para isto acontecer a energia de ligação de Y precisa ser bem maior que a de X. Comparemos ${}^{12}_{7}N$ e ${}^{12}_{6}C$:

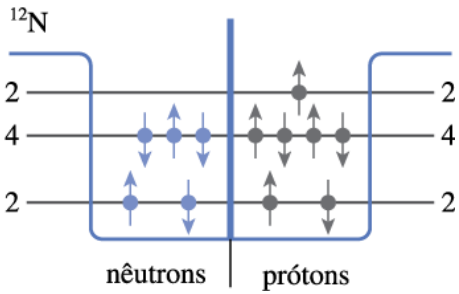
$$B_{N12} = (7m_P + 5m_N - m_{N12})c^2$$

$$= (0{,}0757u)c^2 = 70{,}5 \text{ MeV}$$

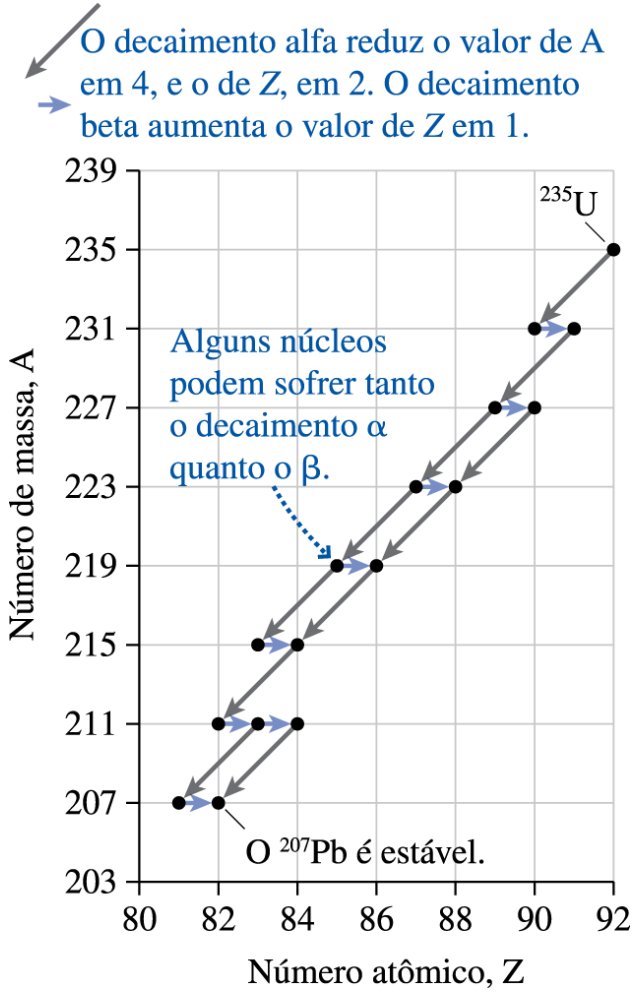
$$B_{C12} = (6m_P + 6m_N - m_{C12}))c^2$$

$$= (0{,}0956u)c^2 = 89 \text{ MeV}$$



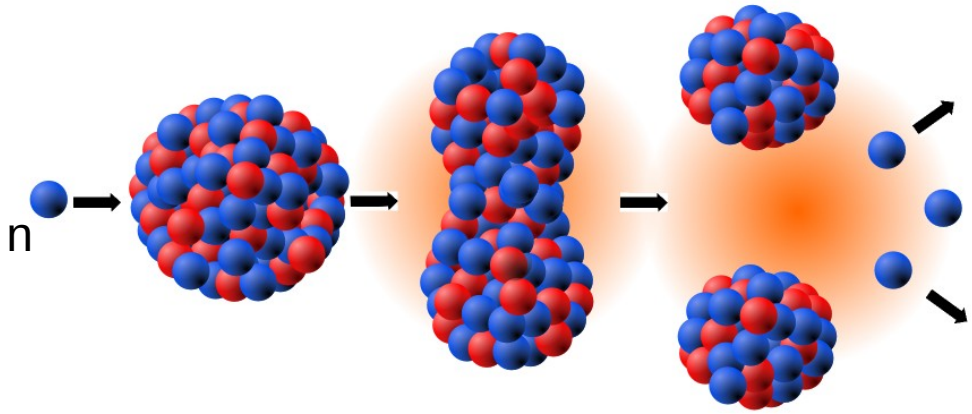


Sequências de decaimentos



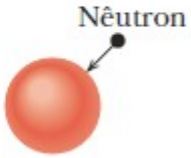
Fissão Nuclear

(Halliday)



Fissão Nuclear

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

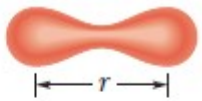


Parte da massa se transforma em energia, que faz o núcleo oscilar.

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.

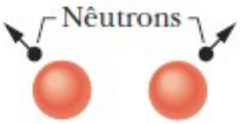
A interação nuclear diminui rapidamente com a distância.



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.



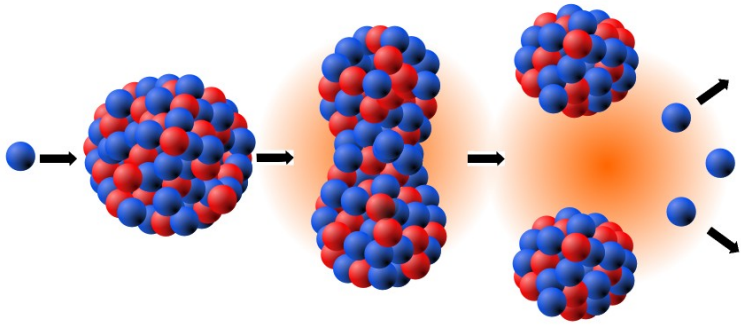
1939 - Modelo de Niels Bohr e John Wheeler baseado em uma gota de líquido carregada eletricamente.

Fissão Nuclear

Urânio - ^{235}U

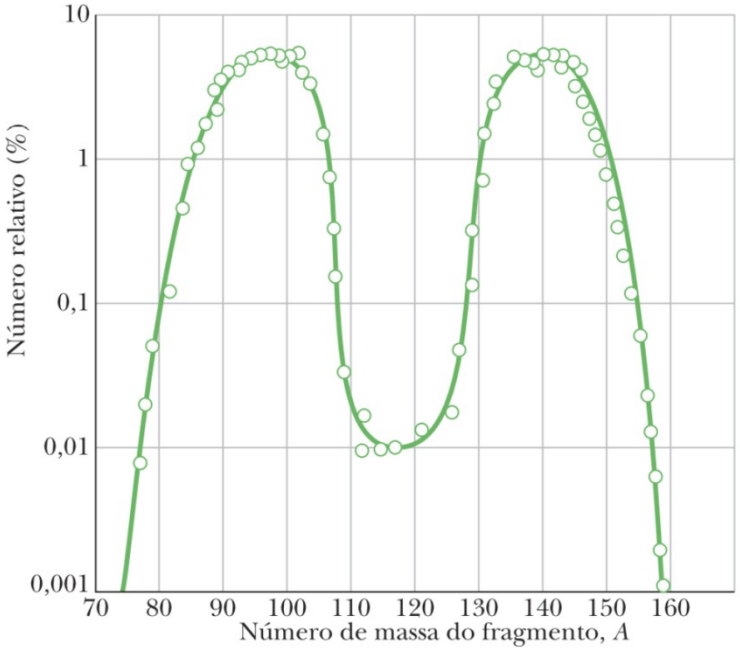
nêutron térmico (lento)

K = 3/2 kT ~0,04eV



nêutrons rápidos

K ~ 1MeV ou mais

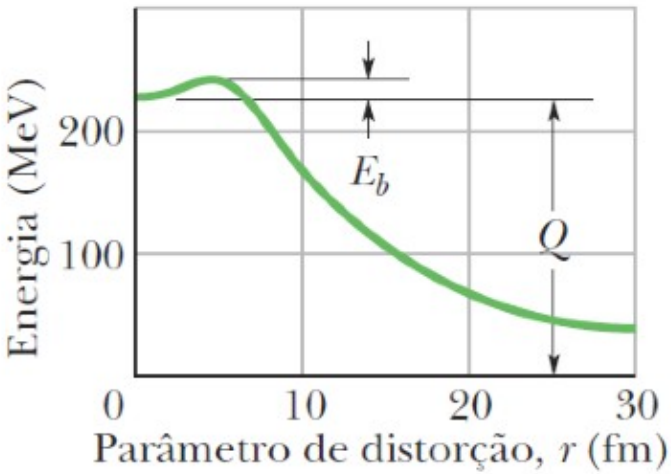


Um mesmo núcleo pode se fissionar de muitas maneiras, com diferentes probabilidades

Ex: 7% dos eventos de fissão do urânio há a produção de núcleos com A ~ 94 e 140 (ex: ^{140}Xe e ^{94}Sr)

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.

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

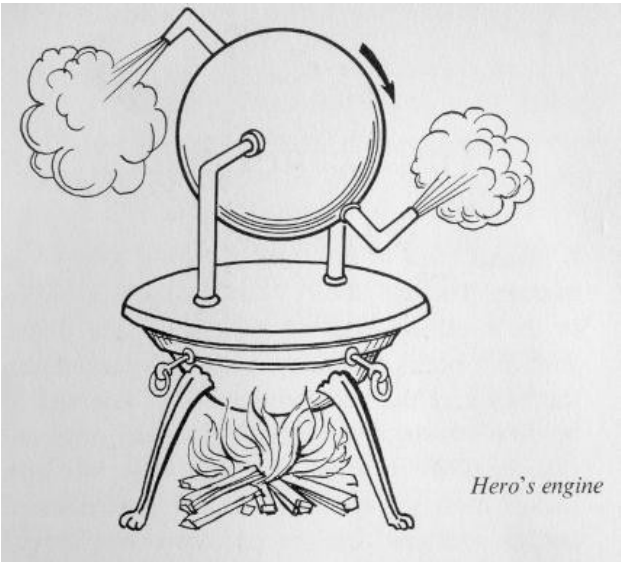
Porque então tanta “preocupação” com que países “não confiáveis” aprendam a enriquecer urânio?

- 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)

Energia Nuclear

Máquina Térmica: Protótipo de uma Usina Nuclear

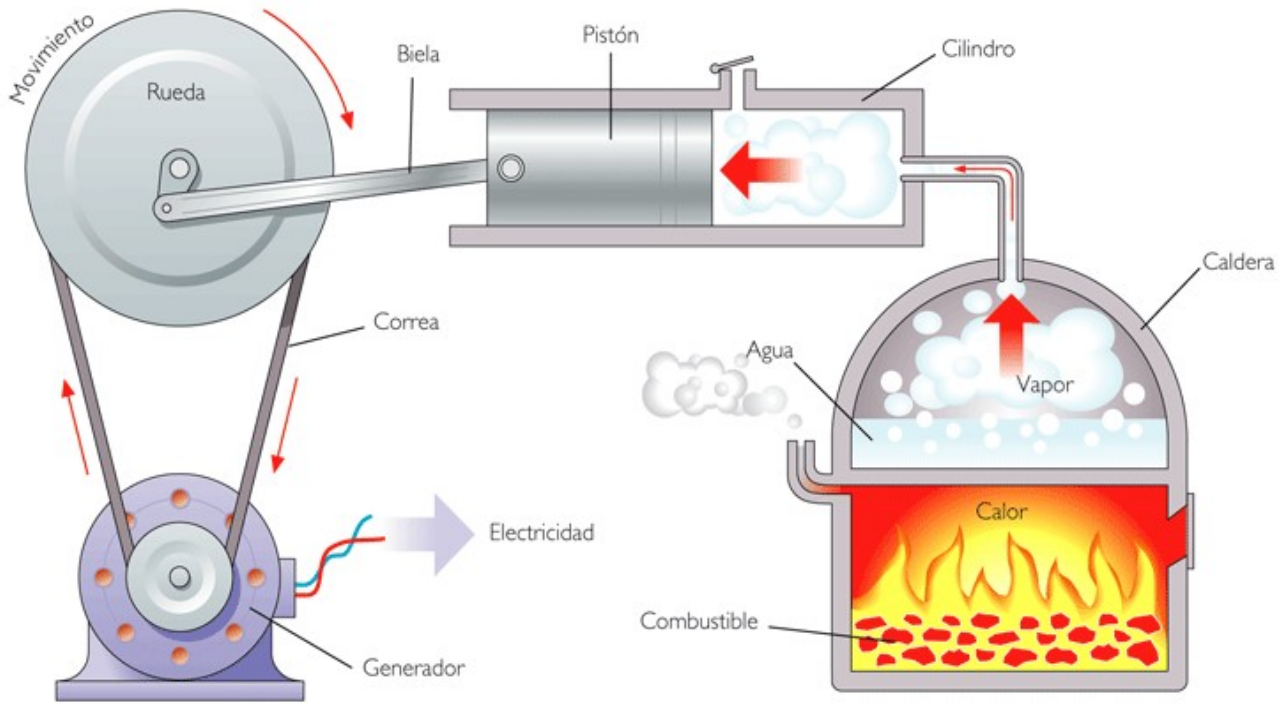
É possível converter Calor em Trabalho...



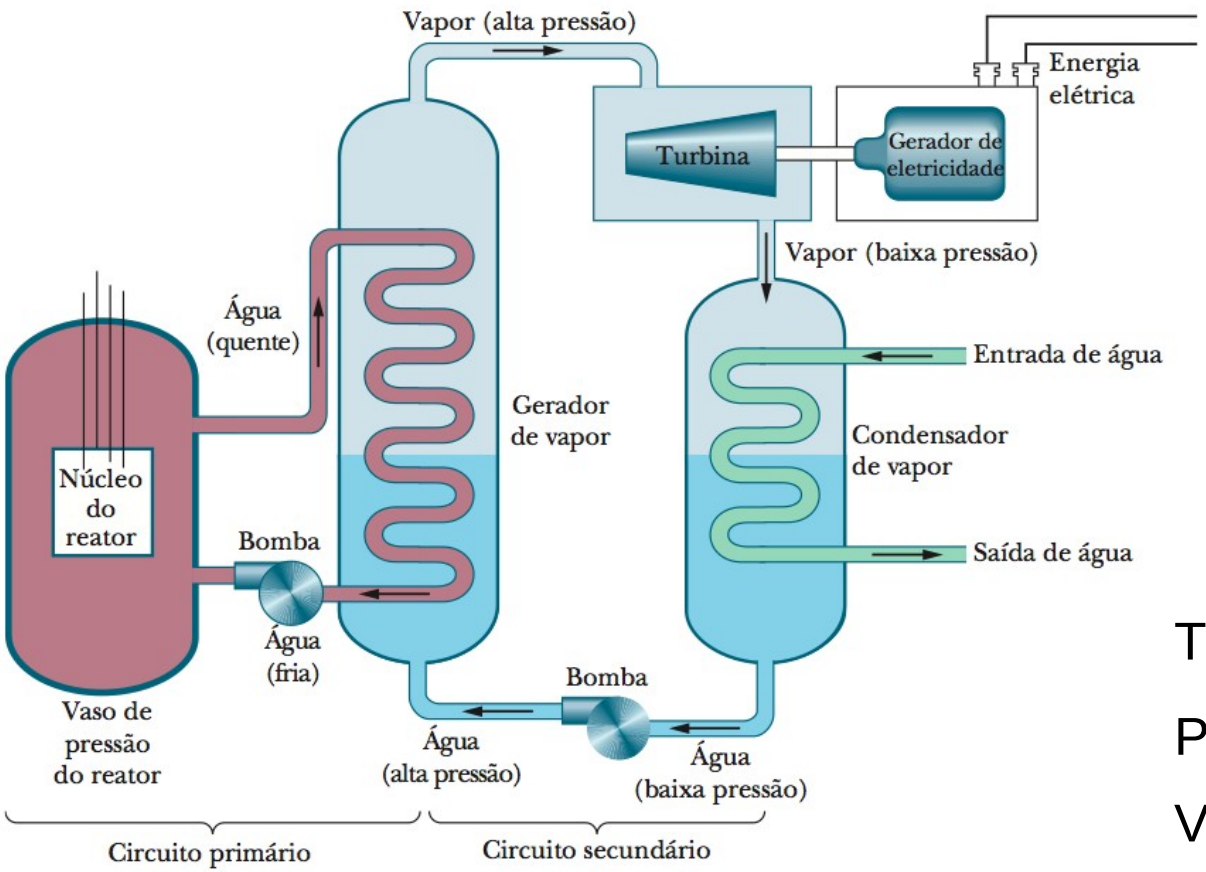
Energia Nuclear

Máquina Térmica: Protótipo de uma Usina Nuclear

Uma máquina Térmica é um dispositivo que opera em ciclos convertendo calor em trabalho útil.



Reator Nuclear



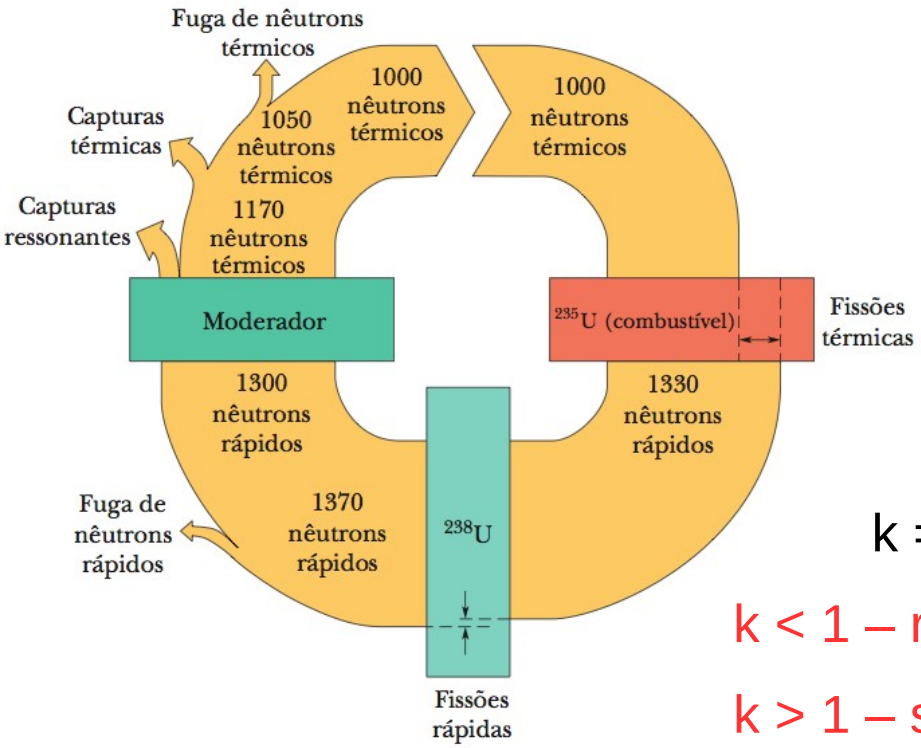
T_{H2O} = 600 K

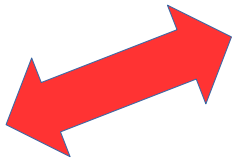
P = 1000 Mw

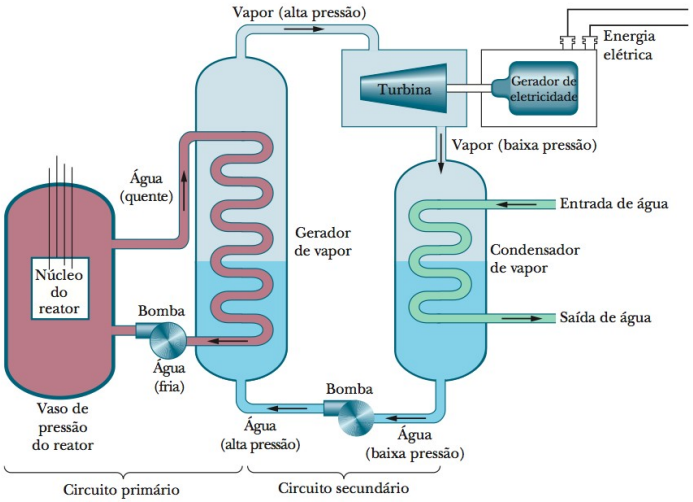
Vazão = 1 ML/min

Água utilizada como moderador e tb fluido de transferência de calor...

Reator Nuclear







Fator de multiplicação

k = (nêutrons 2ª geração)/(nêutrons 1ª ger.)

k < 1 – regime subcrítico: reação não se sustenta

k > 1 – supercrítico: reação sai de controle

k = 1 – regime crítico (ideal)

Para manter crítico: preparar com k> 1, e inserir **barras de controle** (materiais que absorvem nêutrons) no reator para baixar até k = 1.

Energia Nuclear: Prós e Contras

- 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/ descomissionamento 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...