

Os constituintes da Matéria

- A matéria é constituída de **átomos**.
- Os átomos são formados por um **núcleo** circundado por **elétrons**.
- O **núcleo** é formado por **prótons** e **nêutrons** (chamados genericamente de “**nucleons**”).
- Veremos ainda na última aula: os **nucleons** são constituídos por **quarks** e **glúons**.

Como sabemos isso tudo?

- A Física é uma ciência **experimental!**
- Logo, tudo o que sabemos é deduzido de **resultados experimentais**, ou confirmado a partir desses resultados.

O elétron

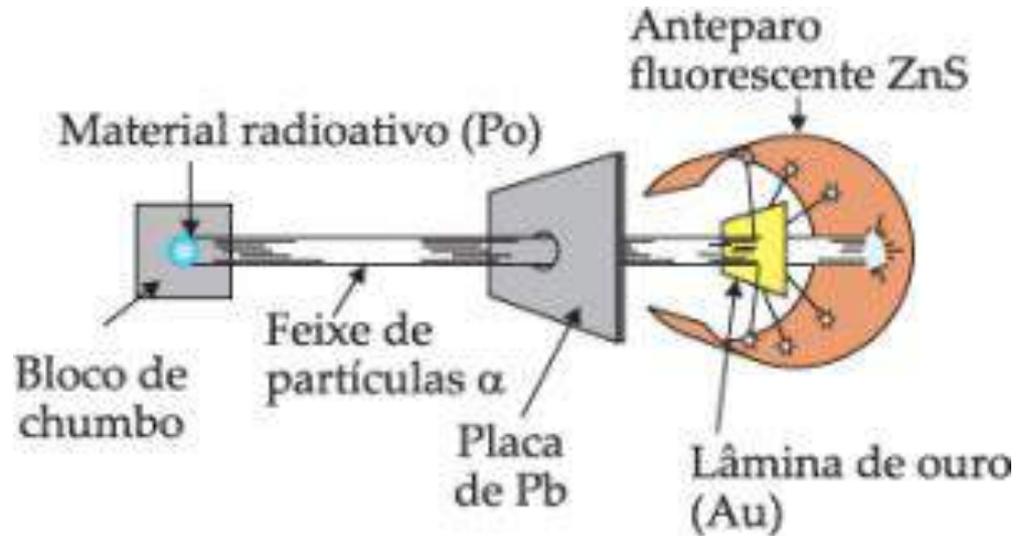
- J.J. Thomson (1897) descobriu o elétron e mediu seu e/m :



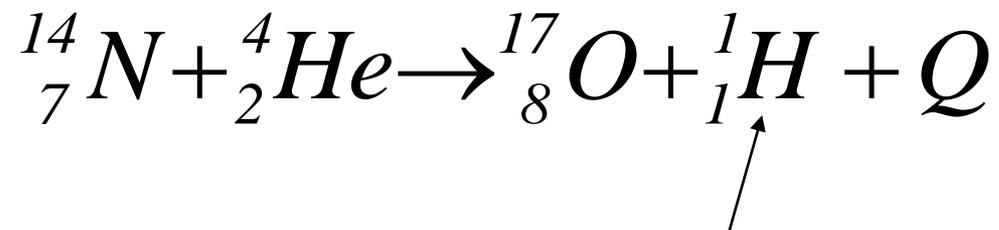
O pai da Física Nuclear: Ernest Rutherford



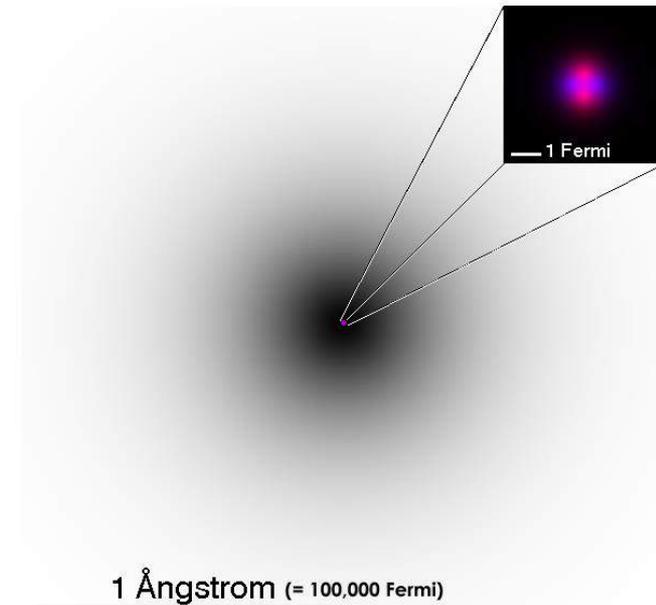
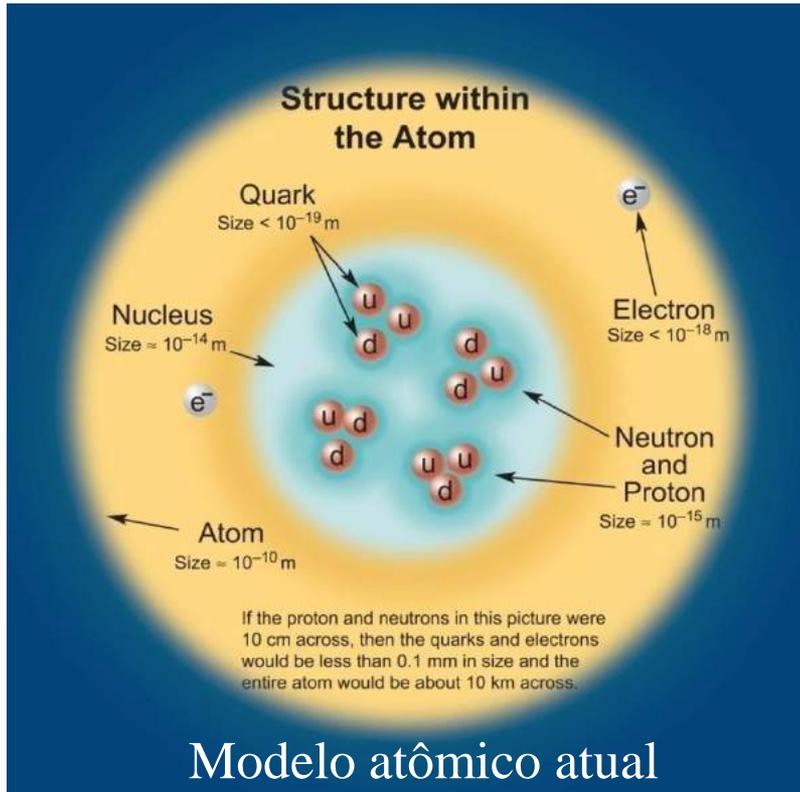
1911 – descoberta do núcleo atômico



1919 – 1ª transmutação nuclear:



A descoberta do núcleo atômico



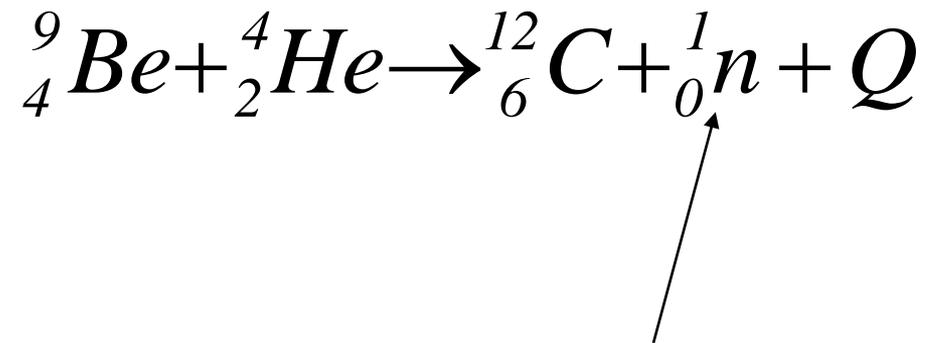
1 Ångstrom (= 100,000 Fermi)

Átomo de hélio. Observe as ordens de grandeza e os elétrons distribuídos em uma nuvem eletrônica.

Em 1911, Rutherford propôs um modelo no qual toda a carga positiva dos átomos, que comportaria praticamente toda a sua massa, estaria concentrada numa pequena região do seu centro, chamada de **núcleo**. Os elétrons o orbitariam como em um sistema planetário.

O nêutron

- J. Chadwick (1932) descobriu o nêutron identificando corretamente o produto da seguinte reação:



Algumas propriedades dos núcleos

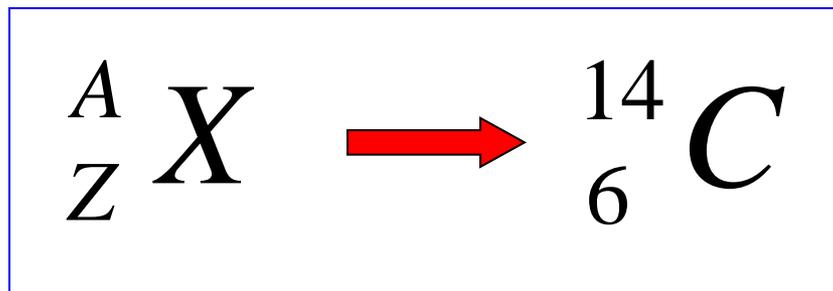
Número Atômico (Z) – número de prótons do núcleo

Número de Nêutrons (N) – número de nêutrons do núcleo

Número de Massa (A) – soma do número de prótons e

nêutrons: $A = Z + N$

Símbolo:



Nuclídeo: termo utilizado para se referir aos núcleos atômicos quando se está interessado em suas propriedades intrínsecas.

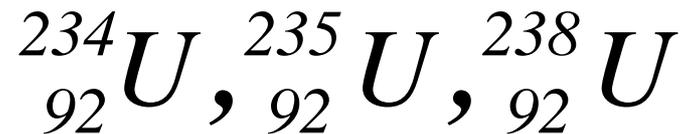
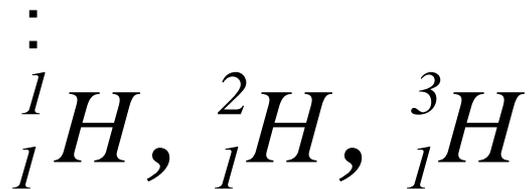
Nuclídeo

- Um dado núcleo com Z prótons e N nêutrons é um **nuclídeo** .
- Nós o chamamos de ${}^A_Z X_N$
- Ou, mais abreviado, ${}^A_Z X$, ou ainda, ${}^A X$.
- Alguns exemplos:





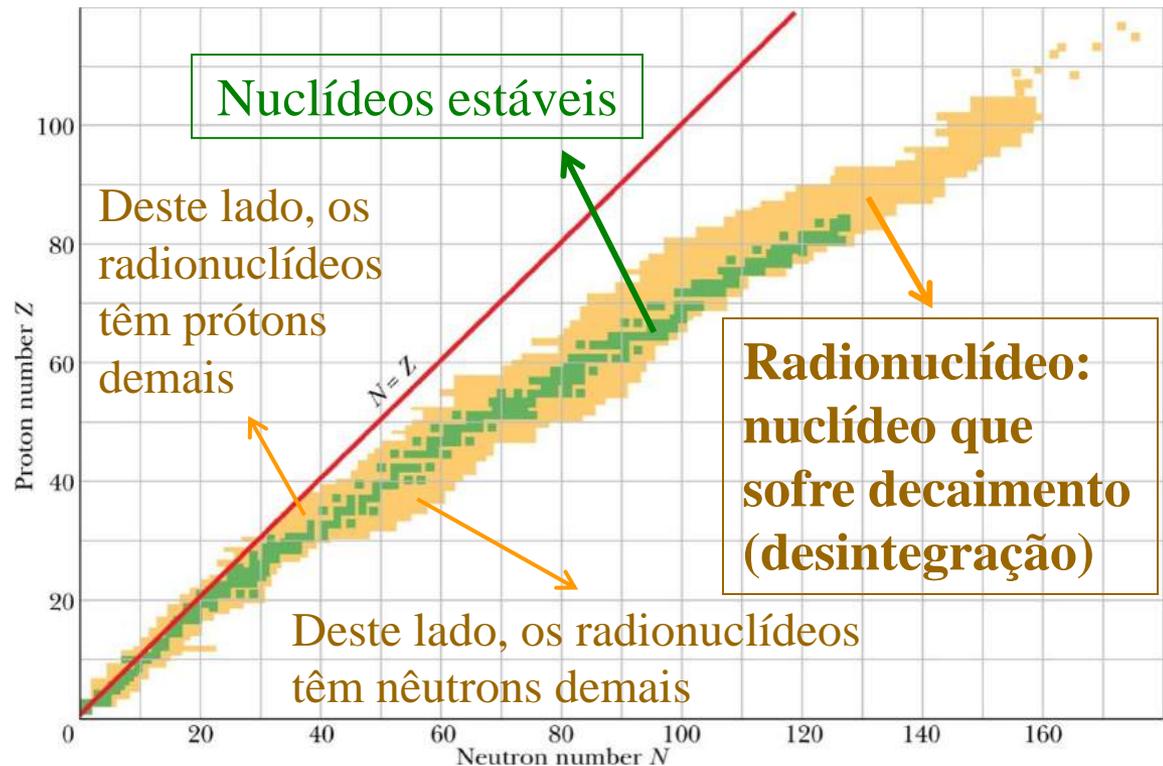
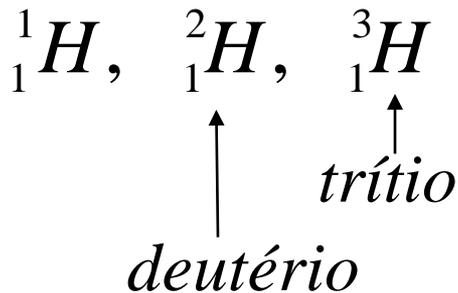
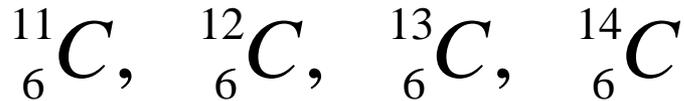
- Z é o número atômico \Rightarrow número de prótons do núcleo = número de elétrons do átomo (\Rightarrow propriedades químicas do átomo);
- A é o número de massa $\Rightarrow Z+N$;
- **Isótopos** \Rightarrow têm o mesmo Z , mas A diferentes



Nomenclatura

Isótopos – Os isótopos de um elemento têm o mesmo valor Z , mas diferentes números de N e A .

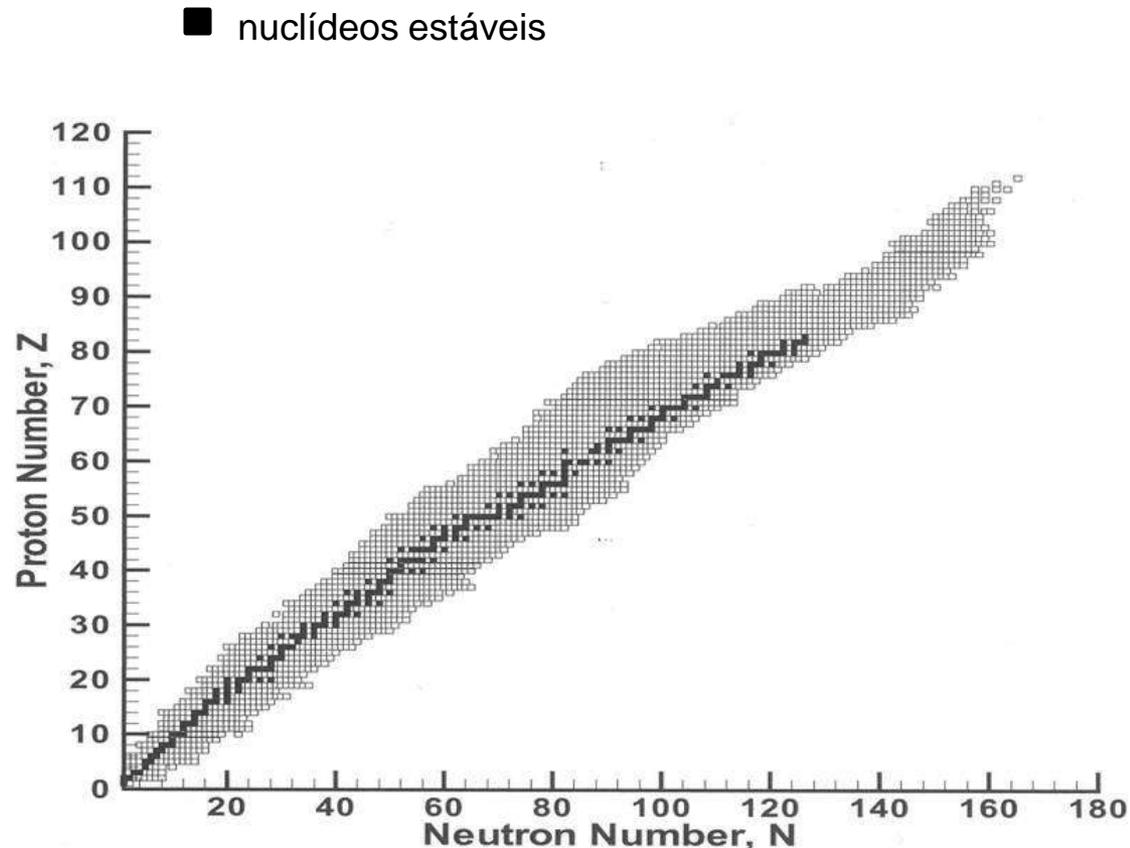
Exemplos:



Carta de Nuclídeos

Carta de Nuclídeos

- Átomos neutros de todos os **isótopos** do mesmo elemento apresentam as **mesmas propriedades químicas**, porém **propriedades nucleares bastante diferentes**.
- Assim, é conveniente a definição de **nuclídeos**.



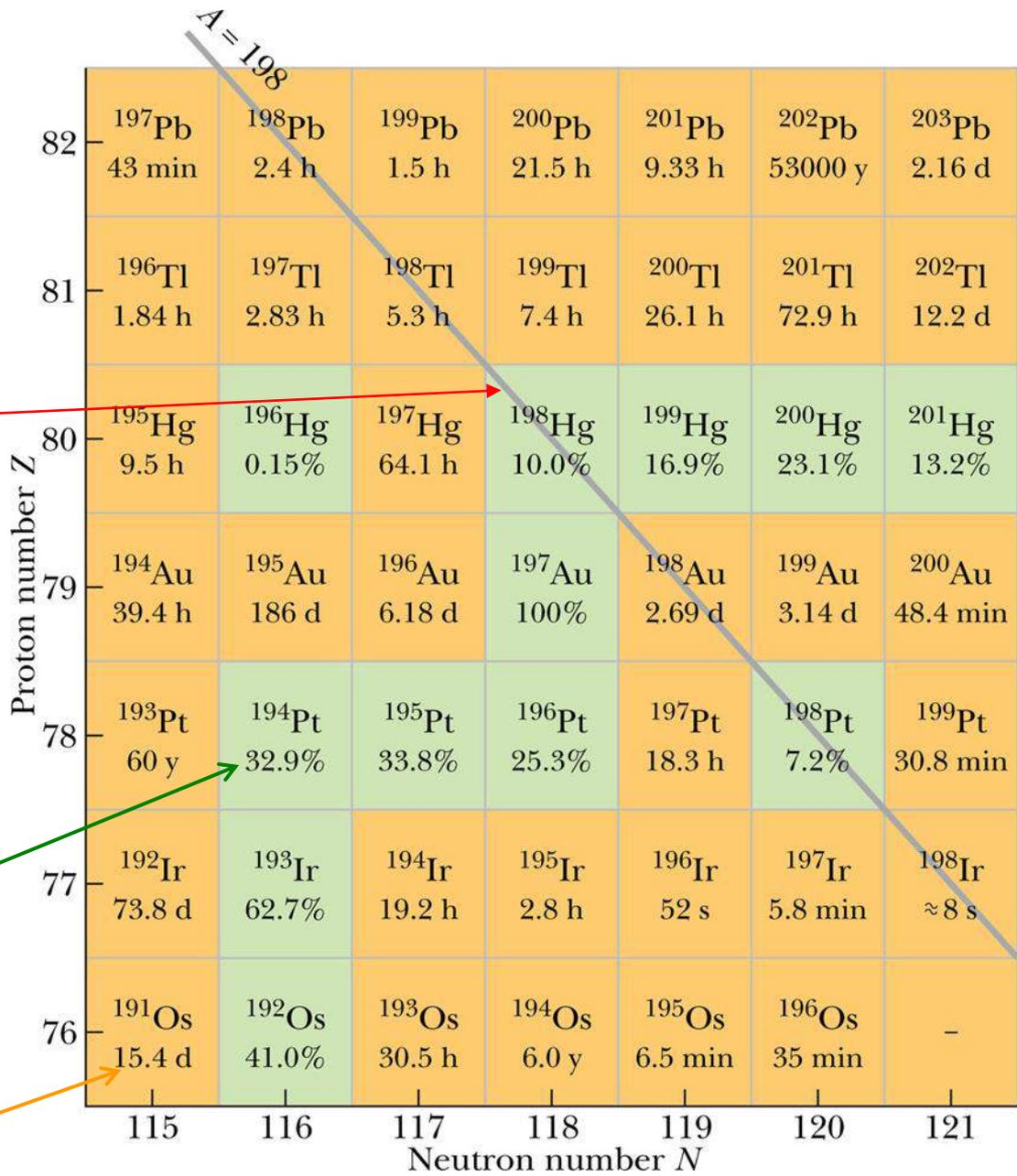
Vista ampliada da carta de núclídeos

Reta isobárica

Isóbaros:
 $A = N + Z = const.$

Abundância relativa do isótopo estável (fração desse isótopo em uma amostra típica)

Meia-vida do radionuclídeo



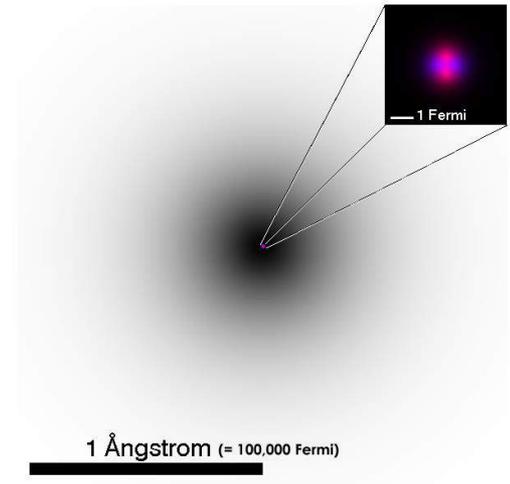
Ordens de grandeza

Qual é o tamanho do nosso problema?

Raio do núcleo

Unidade conveniente:

$$1 \text{ femtômetro} = 1 \text{ fermi} = 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$



O raio do núcleo pode ser estimado por:

$$R = R_0 A^{1/3}$$

onde A é o número de massa e $R_0 \approx 1,2 \text{ fm}$

Compare com a escala típica usada em física atômica

$$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m} \quad \text{e} \quad 1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$$

(tamanhos dos átomos e distâncias interatômicas em sólidos)

Carga e massa dos núcleos

- A unidade de massa atômica **u** é definida de modo que a massa atômica do ^{12}C neutro seja exatamente **12u**. Logo:

$$1 \text{ u} = 1 \text{ g}/N_A \cong 1,661 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

onde $N_A \cong 6,02 \times 10^{23}$ (número de Avogadro)

- Utilizando a relação **$E = mc^2$** , verificamos que **1u** em repouso corresponde a uma energia de **$1\text{u } c^2 \cong 931,5 \text{ MeV}$** .

A massa de prótons, nêutrons e elétrons isolados também podem ser expressas em termos de **u**:

Partícula	Massa		
	kg	u	MeV/c ²
Próton	$1,6726 \times 10^{-27}$	1,007 276	938,27
Nêutron	$1,6749 \times 10^{-27}$	1,008 665	939,56
Elétron	$9,109 \times 10^{-31}$	$5,486 \times 10^{-4}$	0,511

Unidades de Energia

- Lembrando $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$
- $1 \text{ eV} \Rightarrow$ energia cinética adquirida por um elétron quando acelerado a partir do repouso por uma ddp de 1 Volt.
- $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$
- $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} \Rightarrow$ escala principal na FN
- $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$
- $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

Densidade da matéria nuclear

Nuclídeos são formados por prótons e nêutrons.

Qual a densidade da matéria nuclear?

$$\rho \cong \frac{Am_p}{4\pi R^3 / 3} = \frac{Am_p}{4\pi R_0^3 A / 3} = \frac{3m_p}{4\pi R_0^3}$$

$$R = R_0 A^{1/3}$$

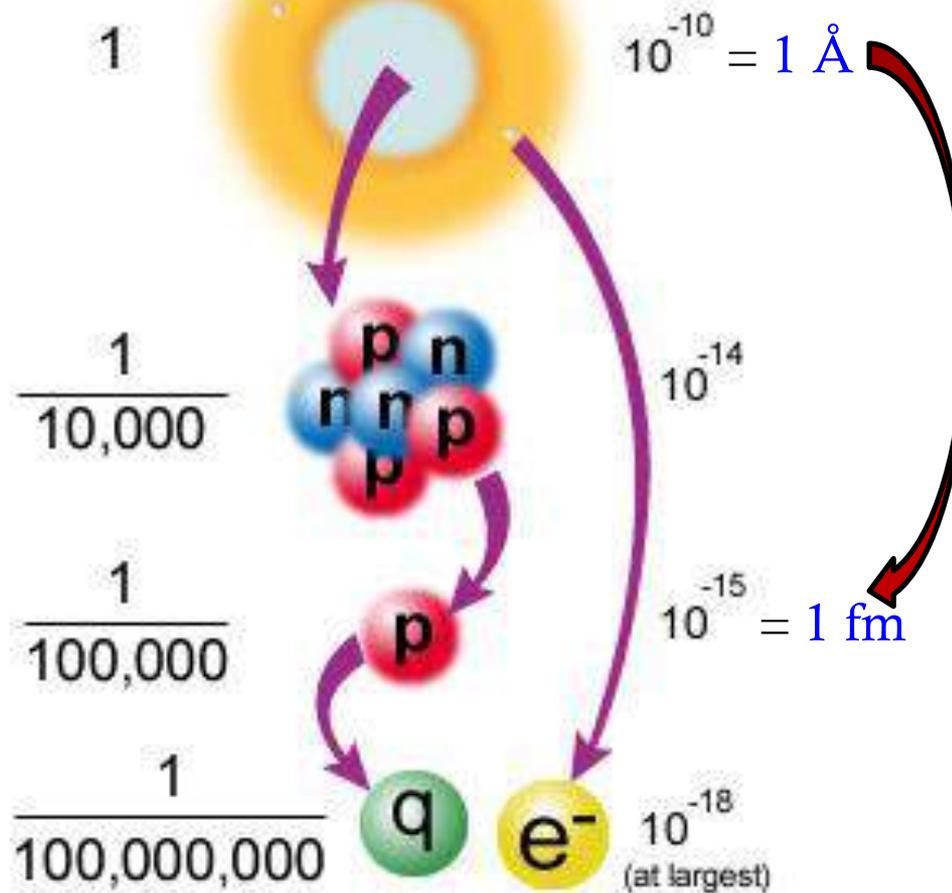
$$\rho = \frac{3 \times 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}}{4\pi (1,2 \times 10^{-15} \text{ m})^3} \cong 2,3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

Este resultado vale para qualquer núcleo.

Esta densidade é $\sim 10^{14}$ vezes maior que a densidade da água!

As escalas dos átomos e núcleos

size in atoms and in meters



Comparação

$\times 10^{-5}$	Diâmetro Netuno-Sol	$\sim 10^{12} \text{ m}$
	Distância Terra-Sol	$\sim 10^{11} \text{ m}$
	Diâmetro do Sol	$\sim 10^9 \text{ m}$
	Diâmetro da Terra	$\sim 10^7 \text{ m}$

Estabilidade nuclear

- Os núcleos são estáveis devido à existência da **força nuclear**. Trata-se de uma **força atrativa intensa** (muito mais intensa do que a força coulombiana), **de curto alcance** (da ordem de fm), que age entre todos os nucleons independentemente de sua carga elétrica.
- Atualmente, acredita-se que a força nuclear seja uma manifestação da **interação forte**, que mantém os **quarks** unidos para formarem os **prótons** e os **nêutrons**.

Energia de ligação dos núcleos

- A massa M de um núcleo é menor que a soma das massas isoladas m_i das partículas que o compõe: $M < \sum_i m_i$

- A energia de ligação de um núcleo é dada por:

$$\begin{aligned} E_{\text{lig}} &= \sum_i (m_i c^2) - M c^2 = \\ &= \left(\sum_i m_i - M \right) c^2 = \left(Z m_p + (A - Z) m_n - M \right) c^2 \end{aligned}$$

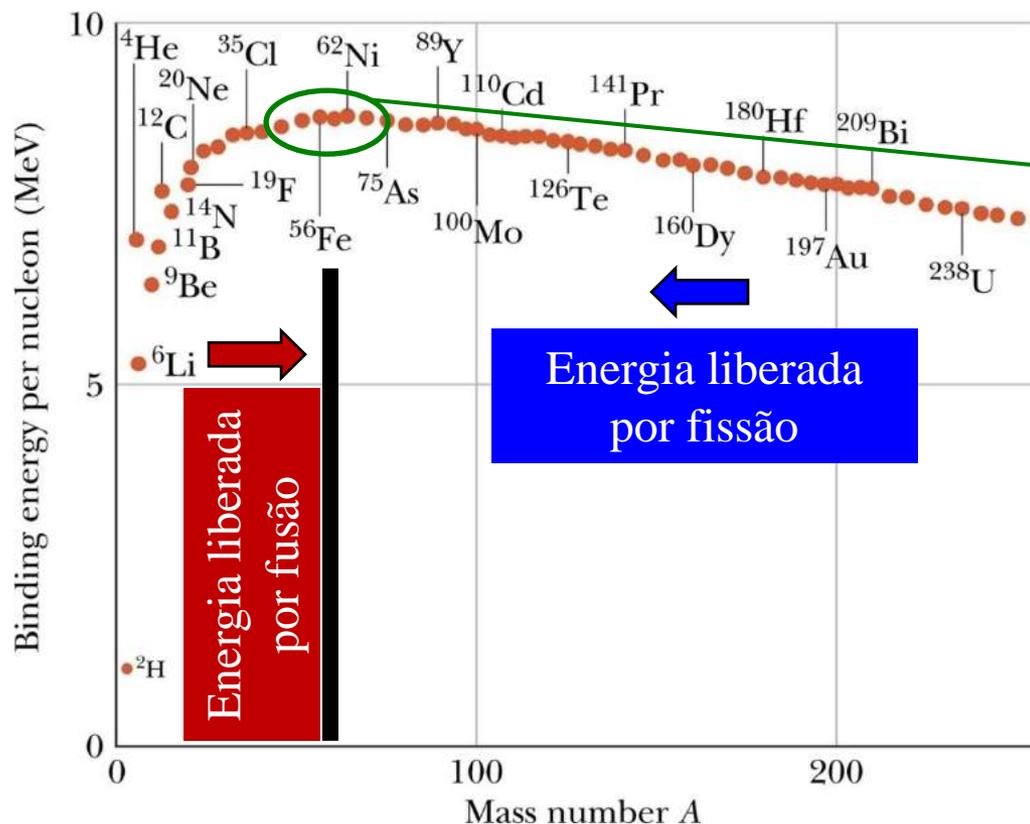
massa do próton massa do nêutron

- E_{lig} : quantidade de energia que deve ser fornecida ao sistema (núcleo) para separá-lo em todas as suas partículas constituintes (partículas com massas de repouso isoladas com valor m_i).
- Na prática, um núcleo não é desintegrado dessa forma, mas a energia de ligação é uma medida conveniente da estabilidade de um núcleo.

Energia de ligação por núcleon

- Uma medida ainda melhor é a energia de ligação por núcleon (próton ou nêutron), que é a energia média necessária para arrancar um núcleon do núcleo:

$$E_{lign} = \frac{E_{lig}}{A}$$



Q de uma reação nuclear

- A energia Q (ou de decaimento ou desintegração) de uma reação envolvendo **produtos nucleares iniciais e finais** é:

$$Q = \Delta E_{\text{ligação}} = E_{\text{lig,produtos}} - E_{\text{lig,reagentes}}$$

ou

$$Q = \Delta K = -\Delta M c^2 = (M_{\text{reagentes}} - M_{\text{produtos}}) c^2,$$

onde M_X são as massas nucleares

(e não as massas atômicas que normalmente são fornecidas)

A reação pode ser:

- $Q < 0 \Rightarrow$ **endotérmica** (precisa receber energia para ocorrer)
- $Q > 0 \Rightarrow$ **exotérmica** (reação espontânea com liberação de energia)

Decaimento radioativo

- A maioria dos núcleos conhecidos são instáveis e, portanto, *radioativos*. Estes núcleos emitem **espontaneamente** uma ou mais partículas, transformando-se em um outro **nuclídeo**.
- A taxa na qual ocorre um processo de decaimento em uma amostra radioativa é proporcional ao número de nuclídeos radioativos presentes na amostra:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

λ [s⁻¹]: constante de desintegração (ou de decaimento)

λ tem um valor particular para cada decaimento

Decaimento radioativo

Integrando de $t = 0$ (quando temos N_0 núcleos radioativos não desintegrados) a t (quando restam N núcleos):

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad \longrightarrow \quad \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t$$

Logo:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

N_0 : nº de núcleos radioativos no instante $t = 0$

$N(t)$: nº de núcleos que restam na amostra em $t > 0$

λ : constante de desintegração

Decaimento radioativo

Podemos também determinar diretamente a evolução da taxa de decaimento (decaimentos por unidade de tempo) $R = -dN/dt$.

Derivando a equação anterior em relação ao tempo:

$$R(t) \equiv -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N(t)$$

Logo, podemos definir:

$$R(t) = R_0 e^{-\lambda t} \quad ; \quad R_0 = \lambda N_0$$

R_0 : taxa de decaimento no instante $t = 0$

$R(t)$: taxa de decaimento em $t > 0$

λ : constante de desintegração

- Não se pode determinar qual nuclídeo decairá num dado instante.
- Mas sabemos:
 - λ : probabilidade por unidade de tempo que um dado radionuclídeo vai decair
 - $N(t)/N_0 = e^{-\lambda t}$: probabilidade de um radionuclídeo estar presente no instante t

Decaimento radioativo

- **Atividade** de uma amostra: taxa de decaimento de todos os radionuclídeos presentes na amostra
- A unidade para a atividade (no SI) é:

$$1 \text{ becquerel} = 1 \text{ Bq} = 1 \text{ decaimento por segundo}$$

- Eventualmente utiliza-se também o **curie**, definido por:

$$1 \text{ curie} = 1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Decaimento radioativo

Meia-Vida:

Tempo necessário para que N e R caiam à **metade do seu valor inicial**:

$$R(t) = R_0 e^{-\lambda t} \quad \Rightarrow \quad R(T_{1/2}) = \frac{1}{2} R_0 = R_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\Rightarrow \ln(1/2) = -\lambda T_{1/2}$$

$$T_{1/2} = \ln(2) / \lambda$$

$$\Rightarrow R(t) = R_0 e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\frac{t \ln 2}{T_{1/2}}} = R_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Decaimento radioativo

$$R(t) = R_0 e^{-\lambda t}$$

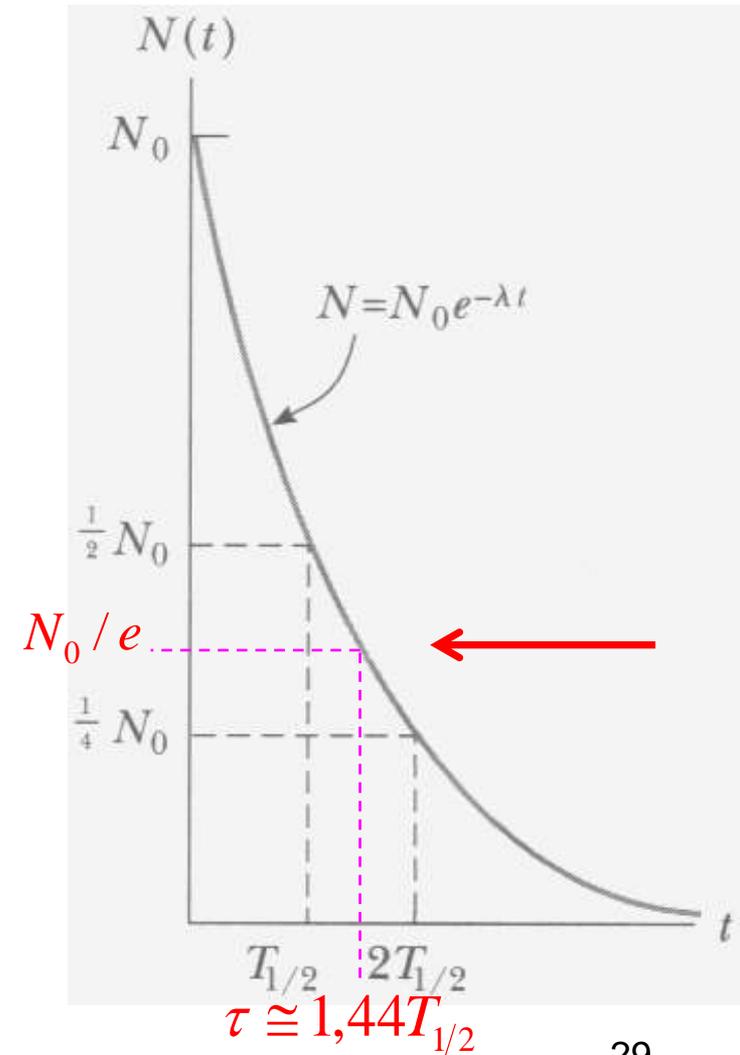
Vida média:

Tempo necessário para que N e R caiam a $1/e \cong 36,8\%$ do valor inicial:

$$R(\tau) = \frac{1}{e} R_0 = R_0 e^{-\lambda \tau} \Rightarrow \tau = 1/\lambda$$

Portanto:

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} = \ln(2)\tau \approx 0,693\tau$$



Observamos que...

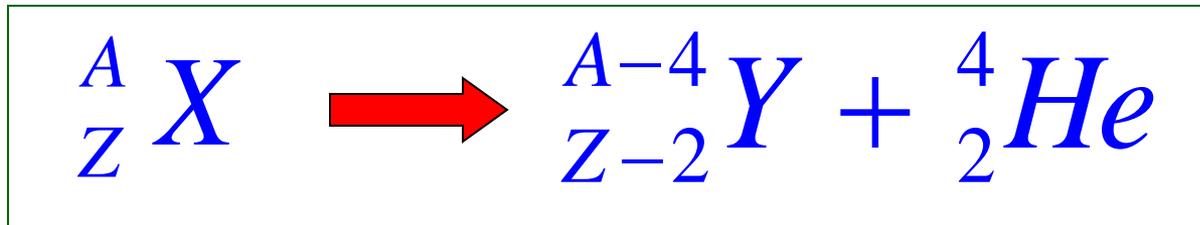
- Se núcleo estiver em um estado excitado, ele pode desexcitar emitindo um fóton (usualmente na faixa de raios gama);
- Se houver excesso de nêutrons/prótons, o núcleo pode sofrer decaimento beta;
- Outros processos são possíveis, tais como captura eletrônica, emissão de prótons ou nêutrons, decaimento alfa ou emissão de partícula mais complexa (carbono, por exemplo), e ainda fissão nuclear.

Processos de decaimento radioativo

- Os núcleos radioativos desintegram-se **espontaneamente** através de decaimentos *alfa* e *beta*, por exemplo.

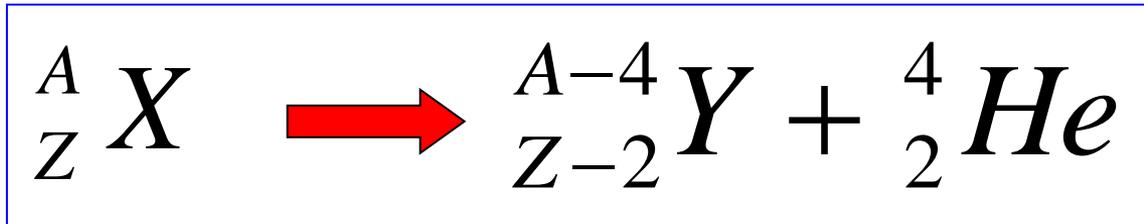
a) Decaimento alfa

O núcleo pai X , emite uma partícula alfa (núcleo de ${}^4\text{He}$: 2 prótons + 2 nêutrons) transformando-se no núcleo filho Y :

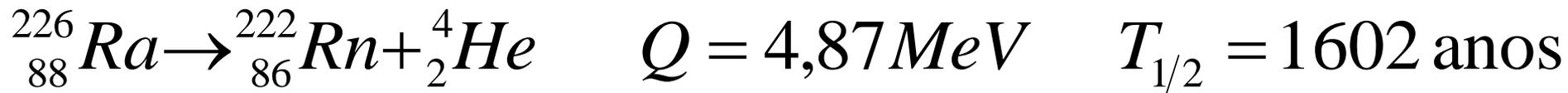


(conservação de carga e do número de núcleons)

Decaimento alfa



Exemplos:



Decaimento alfa

- O decaimento alfa pode ocorrer **espontaneamente** quando o núcleo pai X apresenta uma energia de repouso (massa) maior que a soma das energias de repouso do núcleo filho Y e da partícula α . A energia de desintegração é dada por:

$$Q = -\Delta M c^2 = (M_i - M_f) c^2$$

$$Q = (M_X - M_Y - M_\alpha) c^2 > 0$$

Só no decaimento α , M pode ser a massa nuclear ou atômica (pois as massas dos elétrons se cancelam)

- Esta energia aparece como **energia cinética** do núcleo filho e da partícula α .
- A **partícula α** , por ser normalmente muito mais leve, carregará quase toda a energia cinética.

Antes do decaimento

Após o decaimento

$${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$$

33

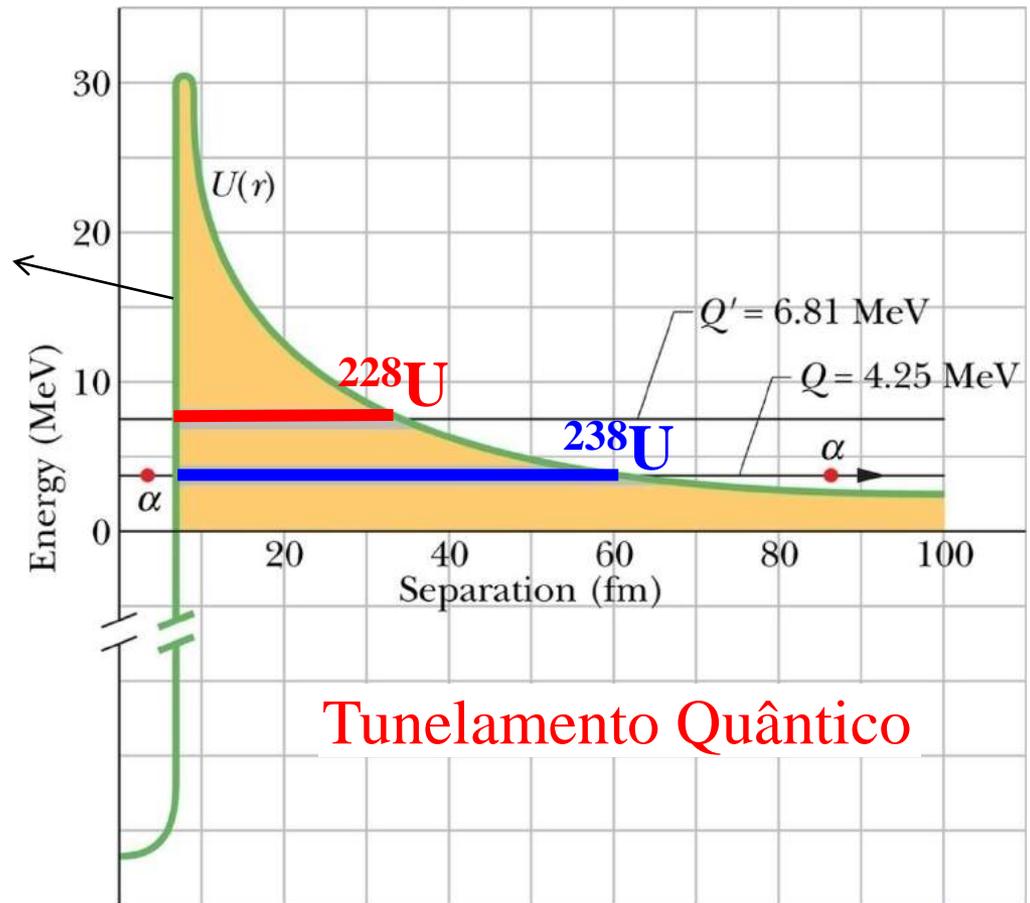
Decaimento alfa

O mecanismo de decaimento alfa

- A meia vida do ^{238}U é de $4,5 \times 10^9$ anos. Se o processo de decaimento é *energeticamente favorável*, por que os núcleos não decaem todos rapidamente?
- O processo de decaimento α foi explicado em 1928 por Gamow, Gurney e Condon. Segundo o seu modelo:
 - A partícula α existe previamente no interior do núcleo,
 - Ela possui energia total Q ,
 - Ela está aprisionada no núcleo por uma barreira de potencial $U(r)$,
 - Ela só é capaz de atravessar a barreira de potencial gerada pelo núcleo através de um **processo quântico de tunelamento**.

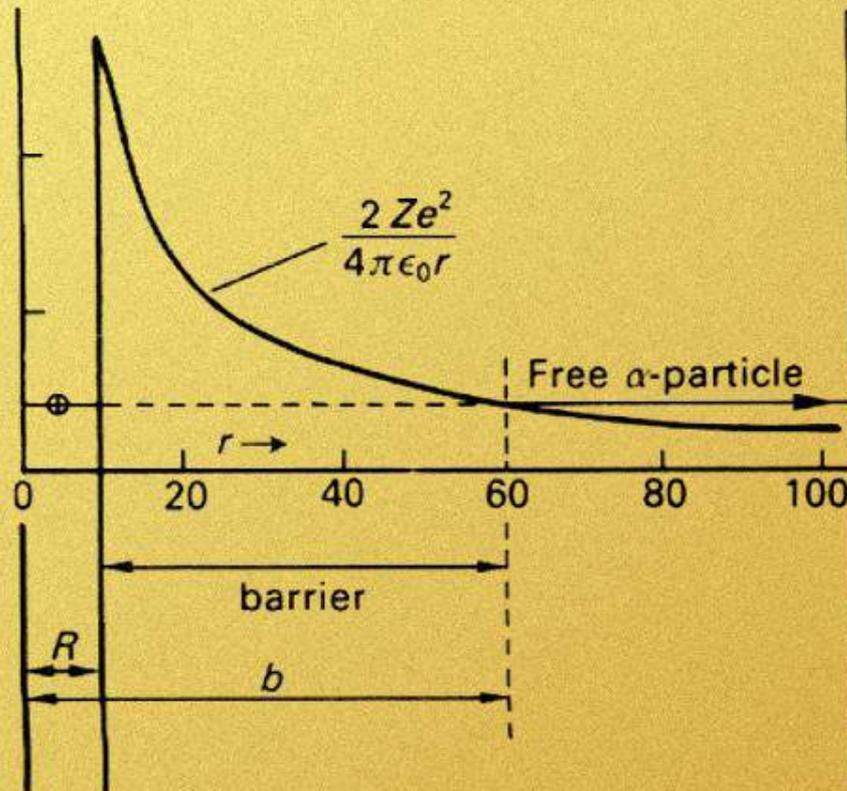
O mecanismo de decaimento alfa

Barreira de potencial



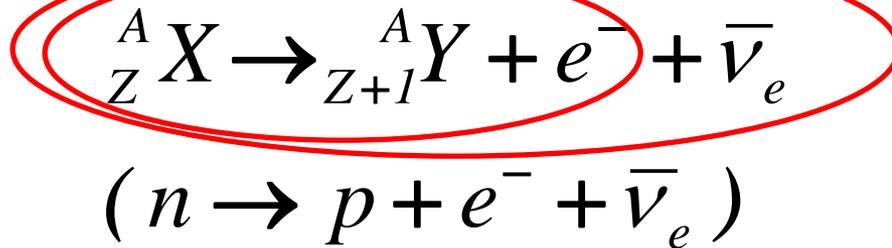
- O isótopo ^{228}U , com $Q' = 6,81 \text{ MeV}$, tem uma meia-vida de apenas $T_{1/2} = 9,1 \text{ min}$.
- Isso ocorre porque o coeficiente de transmissão de uma barreira é muito sensível a variações da energia total da partícula.

O tunelamento da alfa pela barreira

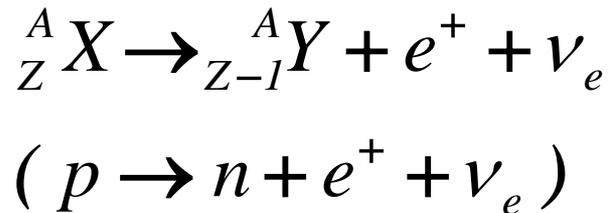


Decaimento Beta (β^- e β^+)

- Alguns núcleos espontaneamente sofrem β^- :



- Outros sofrem β^+ :



O neutrino

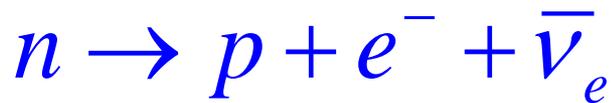
- Em 1930, Pauli postulou a existência do neutrino, para preservar a conservação da energia/momento/momento angular no decaimento beta:
- Em 1956, Reines e Cowan confirmaram experimentalmente sua existência (portanto 26 anos após a previsão de Pauli).

Processos de decaimento radioativo

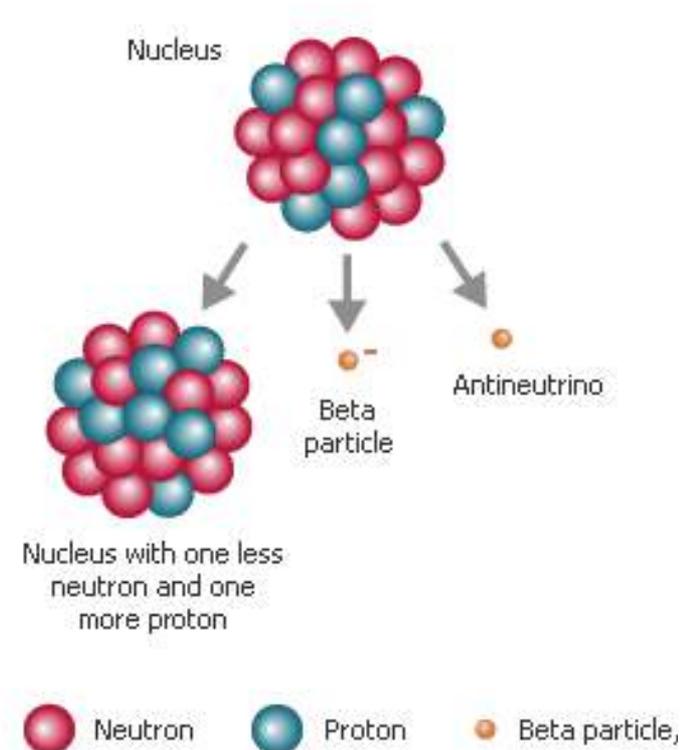
b) Decaimento beta

- O decaimento beta ocorre em núcleos que têm **excesso ou falta de nêutrons**, para tornar o núcleo mais estável.

- No decaimento *beta menos* um dos **nêutrons** no interior do núcleo se transforma **espontaneamente** em um **elétron e um antineutrino**, resultando em um **próton**:

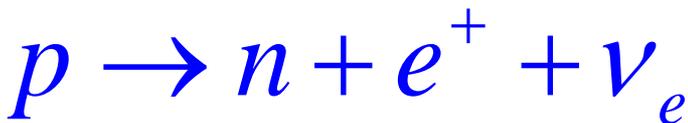


(conservação de carga e do número de núcleons)



Processos de decaimento radioativo

- No decaimento *beta mais* um dos **prótons** no interior do núcleo se transforma espontaneamente em um **pósitron** (anti-elétron) e um **neutrino**, resultando em um **nêutron**:



Cuidado: Esse decaimento não pode ocorrer para um *próton isolado* pois $m_p < m_n$. Ele só ocorre dentro do núcleo, pois utiliza parte da energia de ligação (valor Q) no decaimento.

- Neutrino (“pequeno nêutron”), ν :
 - Foi postulado em 1930 por Pauli, para dar conta da conservação de **energia**, **momento angular** e **linear** nas reações acima.
 - Possui carga nula, massa quase nula ($< 2 \text{ eV}/c^2$) e spin $1/2$.
 - Apresenta uma interação muito fraca com a matéria (um **livre caminho médio** que pode atingir **milhares de anos luz**).
 - Os neutrinos foram detectados experimentalmente pela primeira vez em 1953, por Reines (Prêmio Nobel de Física em 1995) e Cowan.

Descoberta da radioatividade artificial

- Em 1934, **Frédéric e Irène Joliot-Curie** bombardearam alumínio com partículas alfa e observaram a reação nuclear ${}^4_2\text{He} + {}^{27}_{13}\text{Al} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}$.
- Eles observaram que o isótopo ${}^{30}_{15}\text{P}$ produzido emitia um pósitron idêntico àqueles que haviam sido encontrados nos raios cósmicos por Carl David Anderson em 1932. Este foi o primeiro exemplo de decaimento β^+ (emissão de pósitron).
- O casal chamou o fenômeno de **radioatividade artificial**, já que o ${}^{30}_{15}\text{P}$ é um nuclídeo de vida curta que não existe na natureza. Eles receberam o Prêmio Nobel de Química em 1935.

Processos de decaimento radioativo

- Em termos dos núclídeos, as fórmulas para os **decaimentos beta** são:



Número de massa
A se mantém !

- Exemplos de decaimento beta: carbono-14 e nitrogênio-12:



- **Lembre-se:** para calcular $Q = -\Delta M c^2$, M deve ser a massa nuclear:

$$Q_\beta = (M_X - M_Y - m_e)c^2$$

Essa expressão vale para os decaimentos β^- e β^+ , pois a massa do elétron e do pósitron são iguais.

Processos de decaimento radioativo

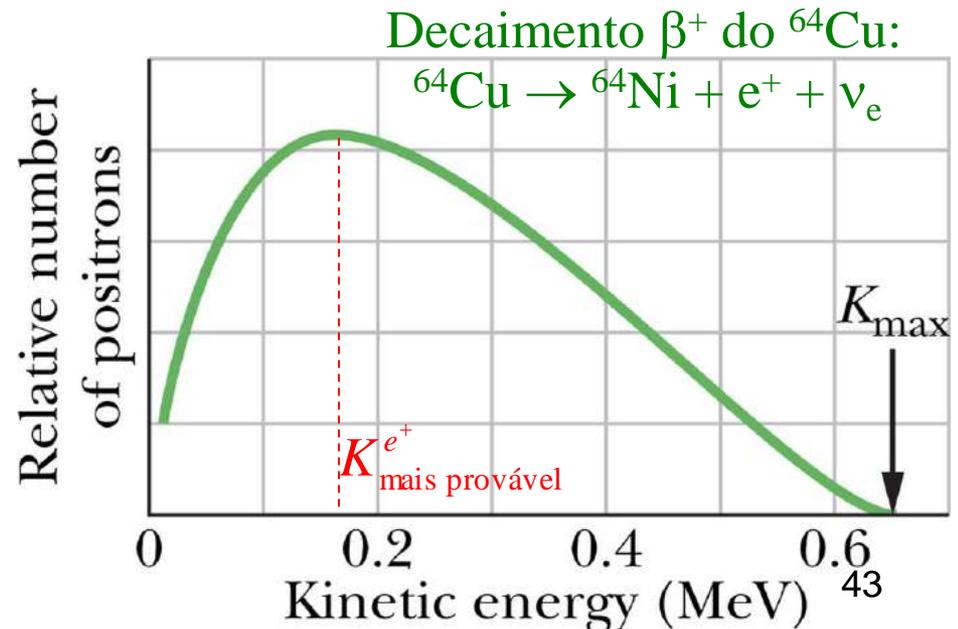
- Enquanto no decaimento α praticamente toda a energia liberada Q vai para a partícula α , no decaimento β esta energia pode se distribuir de diferentes formas entre a energia do elétron (ou pósitron) e do anti-neutrino (ou neutrino).
- Por exemplo, no decaimento β^+ do ${}^{64}\text{Cu}$, os pósitrons apresentam uma energia cinética máxima igual a Q , quando os neutrinos saem com energia nula (ver figura):

$$Q = K^{e^\pm} + K^\nu$$

(descartando o recuo o núcleo filho)

$$K_{m\acute{a}x}^{e^\pm} = Q$$

(quando $K^\nu = 0$)



Excesso de massa

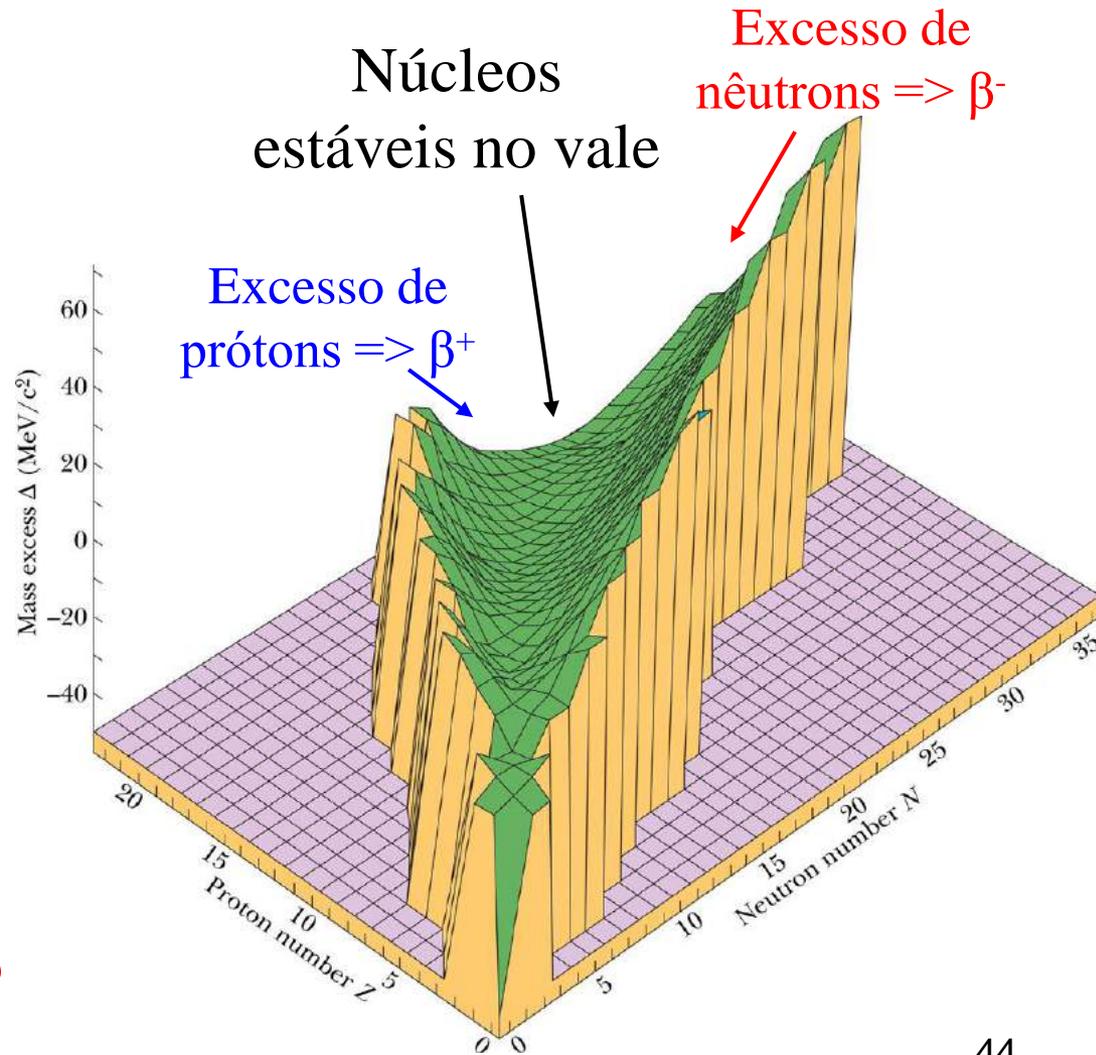
- O excesso de massa Δ é definido por:

$$\Delta \equiv M - A$$

M : massa do átomo em unidades de massa atômica

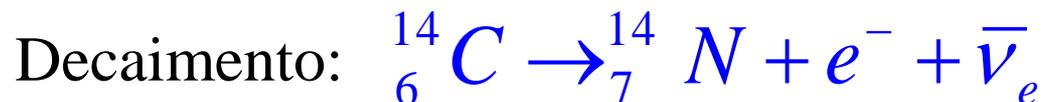
A : número de massa do núcleo

- Os núclídeos atingem as configurações mais estáveis através do decaimento alfa, beta ou fissão (divisão do núcleo em dois fragmentos).



Datação radioativa

- O decaimento do ^{14}C é utilizado para datar amostras orgânicas.
- A razão entre o ^{14}C e o ^{12}C na nossa atmosfera é de $1,3 \times 10^{-12}$ (^{14}C é produzido pelo choque de raios cósmicos com o nitrogênio do ar na alta atmosfera)
 - Todos os organismos vivos apresentam esta mesma razão em sua constituição, graças à respiração ou fotossíntese
- Porém, quando morrem esta troca com o ambiente cessa; o ^{14}C do organismo sofre o decaimento β^- , com uma meia-vida de 5730 anos.
- Assim, pode-se determinar a idade do material orgânico medindo a razão entre os isótopos de carbono: $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$



Medida da dose de radiação

a) Dose absorvida:

Energia absorvida por unidade de massa:

Unidade no SI: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ gray} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$ (*radition absorbed dose*)

Ex.: Uma dose de raios gama de 3 Gy aplicada ao corpo inteiro em um curto período de tempo causa a morte de 50% das pessoas expostas.

b) Dose equivalente:

Dose Equivalente = Dose Absorvida \times Efeito Biológico (RBE)

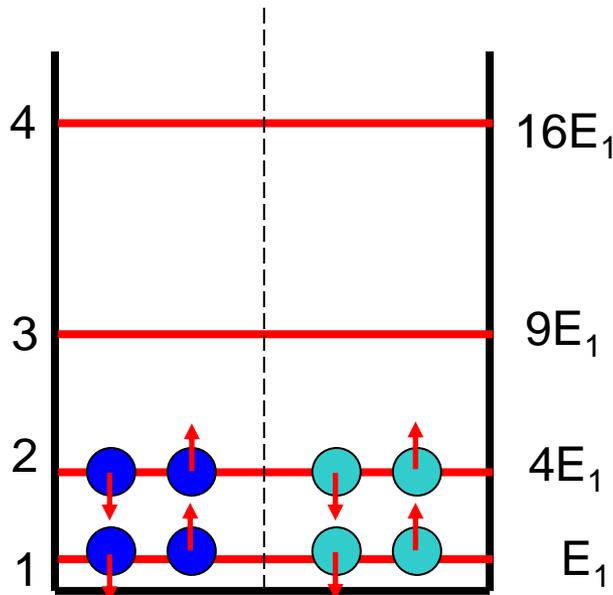
Raios X, gama e elétrons: RBE = 1; nêutrons lentos: RBE = 5;
partículas alfa: RBE = 20

Unidade no SI: $1 \text{ Sv} = 1 \text{ sievert} = 1 \text{ J/kg equivalente} = 100 \text{ rem}$

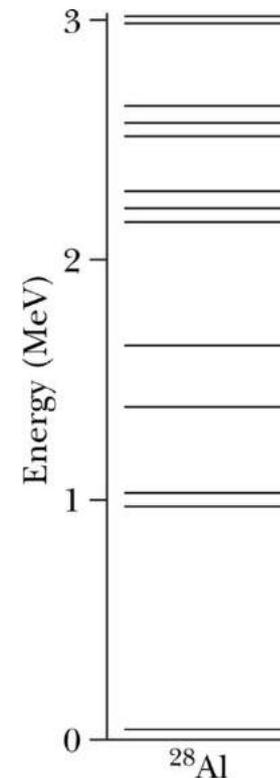
Ex.: Recomenda-se que nenhum indivíduo exposto (não profissionalmente) a radiação receba uma dose equivalente maior que 5 mSv em um ano.

Níveis de energia dos núcleos

- A energia dos núcleos, assim como a dos átomos, é **quantizada**. Quando um núcleo sofre uma transição para um estado de menor energia geralmente emite um fóton na *região dos raios gama* do espectro eletromagnético.



Quatro nêutrons e quatro prótons numa caixa unidimensional



Níveis de energia do núcleo ^{28}Al

Spin e magnetismo dos núcleos

- Assim como os elétrons, os prótons e os nêutrons também apresentam **spins**. Normalmente, o **momento angular total** do núcleo é chamado de **spin nuclear**, já que o núcleo dificilmente é desfeito.
- O **spin nuclear** é dado por uma expressão da forma:

$$I = \sqrt{i(i+1)}\hbar \quad I_z = m_S^{nuclear} \hbar \quad m_S^{nuclear} = -i, -i+1, \dots, i-1, i$$

Associado a este spin, temos um momento magnético nuclear:

$$\mu_{s,z}^{nuclear} = g_S m_S^{nuclear} \mu_N \quad \mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$$

(magneton nuclear)

onde m_p é a massa do próton, cerca de 2000 vezes maior que a massa do elétron.

- Cada núcleo em seu estado fundamental possui um fator g_S e um número quântico de spin i específicos.

Modelos nucleares

- O modelo da gota líquida:

Modelo mais antigo (~1935), em que o núcleo é tratado como uma esfera de densidade constante com os núcleons se movendo aleatoriamente no seu interior.

- O modelo do gás de Fermi:

Considera o núcleo no estado fundamental ou pouco excitado;
Os prótons e nêutrons são vistos como dois sistemas independentes;

Os nucleons podem se mover livremente no núcleo;

Cada nucleon sente um potencial que é a sobreposição dos potenciais dos outros nucleons: os nucleons estão num **poço!**

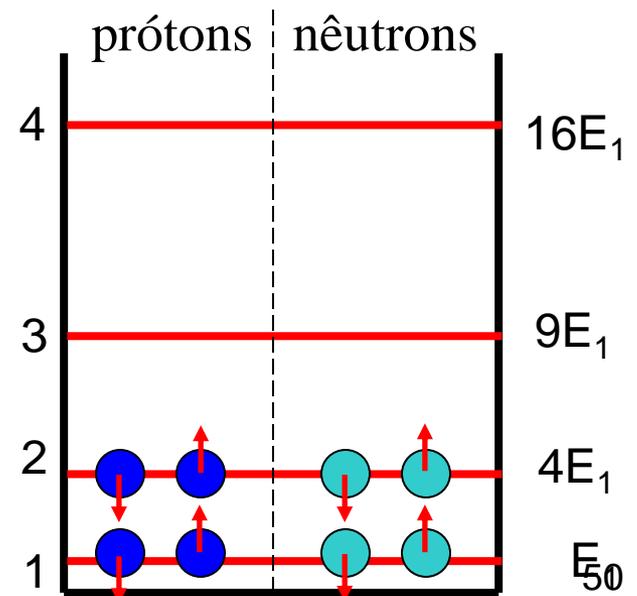
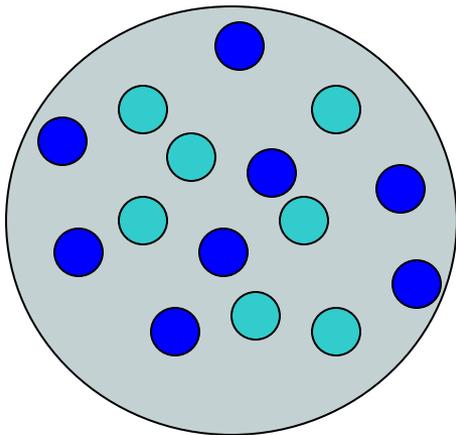
Restrição: precisam obedecer o princípio da exclusão de Pauli (nucleons têm spin $\frac{1}{2}$!)

Modelos nucleares

- O Modelo de Camadas (de Partículas Independentes):

(Na *física atômica* vimos que o modelo inicial era o de *partículas independentes movendo-se sob a ação de um potencial central*.)

Na *física nuclear*, devido à suposta homogeneidade da distribuição de partículas no interior do núcleo, o modelo inicial foi o de *partículas* (prótons e nêutrons) livres, movendo-se no interior de um potencial efetivo do tipo “esfera impenetrável”.



Modelos nucleares

(Na *física atômica* o passo seguinte foi introduzir a *interação entre os elétrons*. Este cálculo é numérico e orientado pela disposição dos elétrons em camadas ao redor do núcleo.)

Na *física nuclear*, o passo seguinte foi considerar um *potencial efetivo radial, $V(r)$* , mais geral do que o de uma esfera impenetrável. Assim os prótons e nêutrons se organizariam em *camadas*.

A ideia original era que a adoção de um potencial $V(r)$ apropriado explicaria os núclídeos com uma estabilidade especial. Isso ocorre quando:

$$Z \text{ e/ou } N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$$

Compare com os números mágicos dos átomos: Z dos gases nobres

Entretanto, dentro deste modelo, *não há nenhum potencial $V(r)$ que leve diretamente a estes números mágicos*. É necessário incluir uma interação *spin-órbita nuclear* (E.P. Wigner, M.G. Mayer, J.H.D. Jensen, 1949; Nobel de Física em 1963).

Modelos Nucleares

- O modelo coletivo:

Modelo de ~1950 (Nobel de Física de 1975 para A.N. Bohr B.R. Mottelson e J. Rainwater), combina características dos modelos da gota líquida e de camadas. Os núcleons das subcamadas incompletas de um núcleo se movem de forma independente em um potencial nuclear efetivo produzido pelo *caroço*, formado pelas subcamadas totalmente ocupadas.

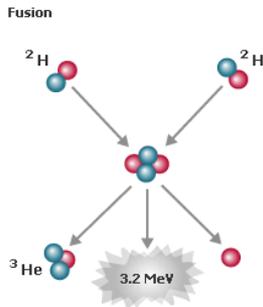
O potencial efetivo não é esfericamente simétrico e estático. É considerado um potencial capaz de se deformar.

Energia nuclear

- Reações químicas: mudanças nas configurações eletrônicas
 - Interação eletromagnética
 - Energias envolvidas : $\sim \text{eV}$
- Reações nucleares: mudanças nos níveis de energia dos núcleons
 - Interação forte
 - Energias envolvidas : $\sim \text{MeV}$
- Queima de combustíveis:
 - Reações químicas ou nucleares
 - Fornecimento de energia em diferentes taxas (potências): explosão ou queima lenta

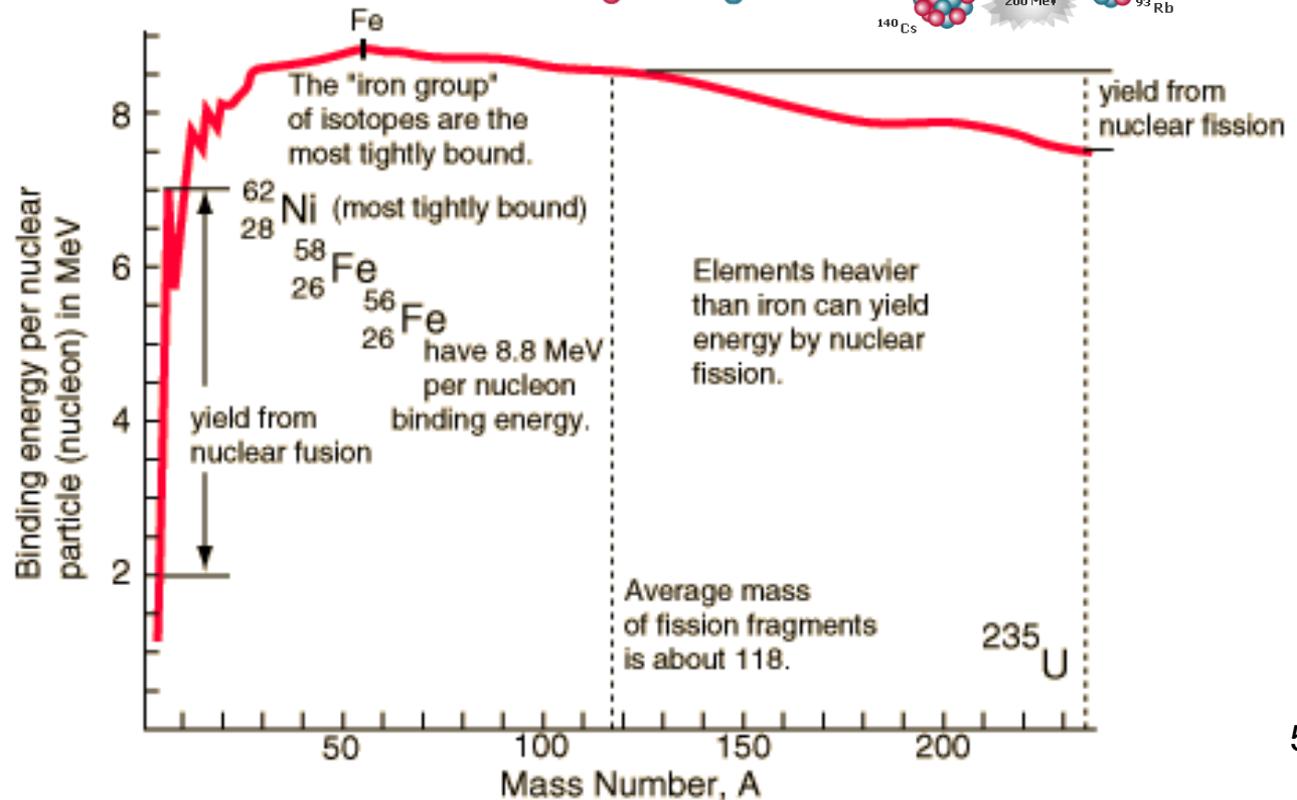
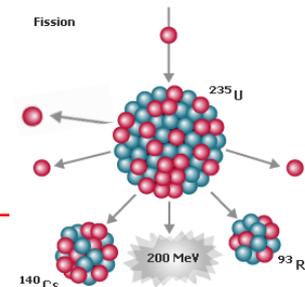
Energia nuclear

- Vimos que $\Delta E_{eln} = \frac{\Delta E_{el}}{A}$ é a energia média necessária para arrancar um núcleon do núcleo.



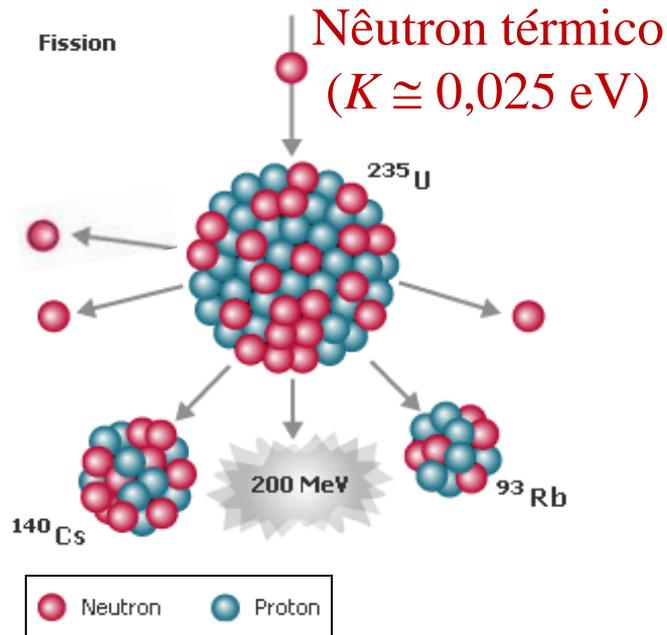
Fusão nuclear

Fissão nuclear

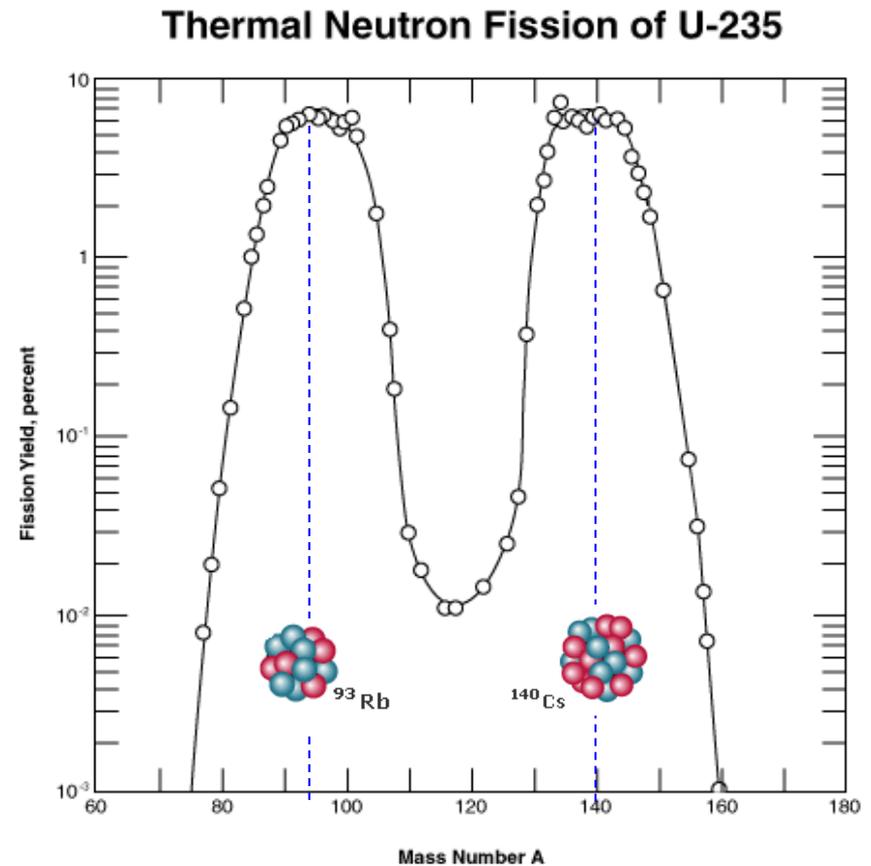


Fissão nuclear

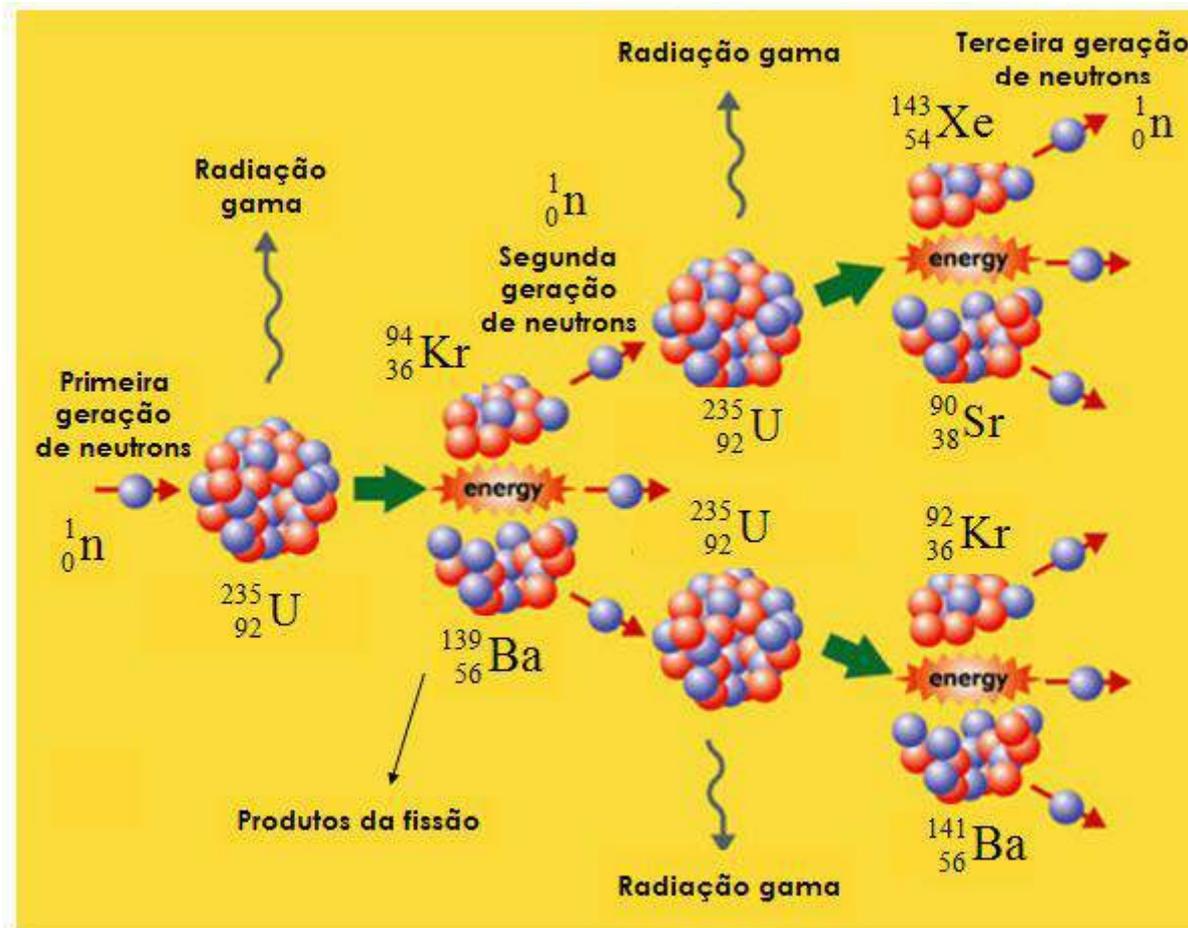
- Núcleo se desintegra em fragmentos menores (Nobel de Química de 1944 para O. Hahn)
- Número total de prótons e de nêutrons se conserva
- $^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{236}\text{U} \rightarrow$ várias formas de fissão. Um exemplo:



Energia liberada: $Q = -\Delta m c^2$



Reações em cadeia



Bomba atômica



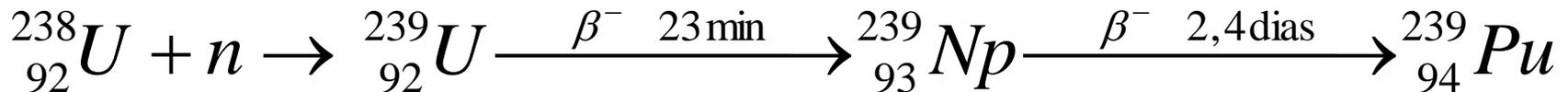
- Termo impróprio: energia vem do núcleo do átomo
- Bomba por fissão principalmente do urânio-235 e plutônio-239
 - $^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{236}\text{U} \rightarrow$ várias formas de fissão
 - $^{239}\text{Pu} + \text{n} \rightarrow ^{240}\text{Pu} \rightarrow$ várias formas de fissão

Bomba atômica: material

- **Enriquecimento do urânio:**

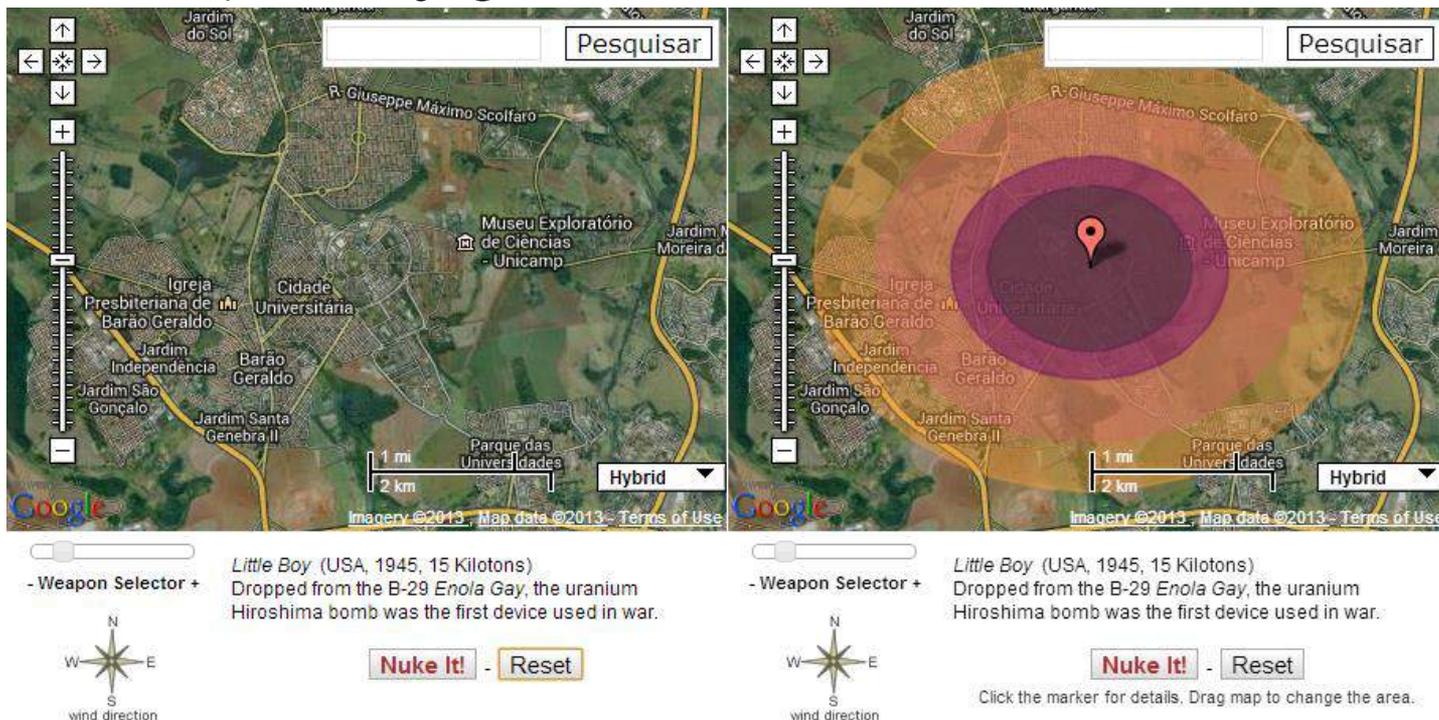
- Urânio natural: ~99,3% ^{238}U e ~0,7% ^{235}U
- Sequência de processos para aumentar a concentração de ^{235}U , pois ^{238}U não pode ser fissionado por nêutrons térmicos.
- Bomba: pelo menos ~85% ^{235}U
- Reator nuclear: ~3% de ^{235}U

- **Fabricação do ^{239}Pu no reator nuclear:**



Bomba atômica: usos

- Somente um teste antes do uso: 16/07/1945 com bomba de ^{239}Pu (Projeto Manhattan)
- Bomba de Hiroshima (*Little Boy*): 06/08/1945 (^{235}U)
- Bomba de Nagasaki (*Fat Man*): 09/08 (^{239}Pu , pois não possuíam mais ^{235}U)
- Se *Little Boy* fosse jogada no IFGW:

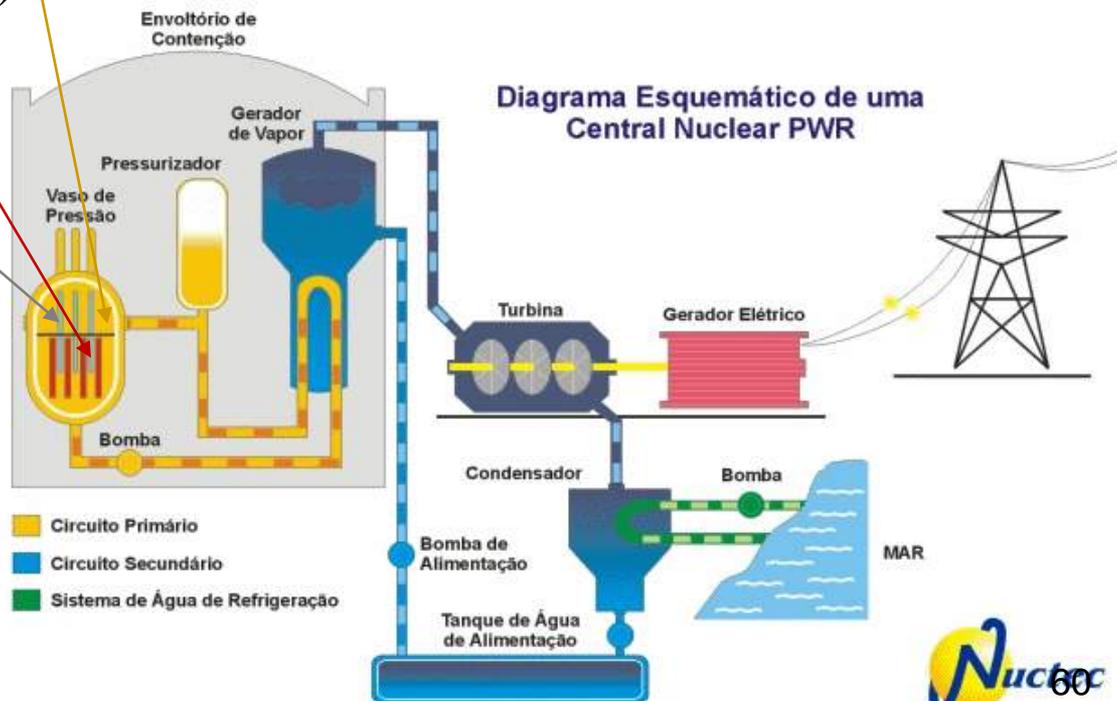


Reator de Fissão Nuclear

Reação em cadeia controlada

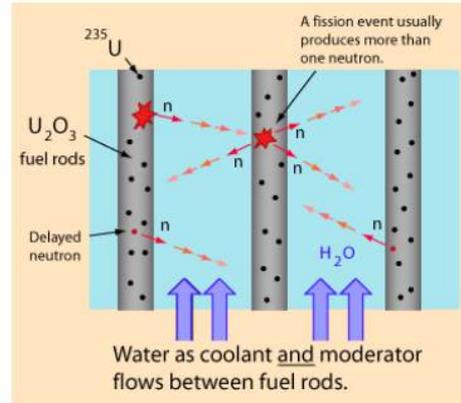
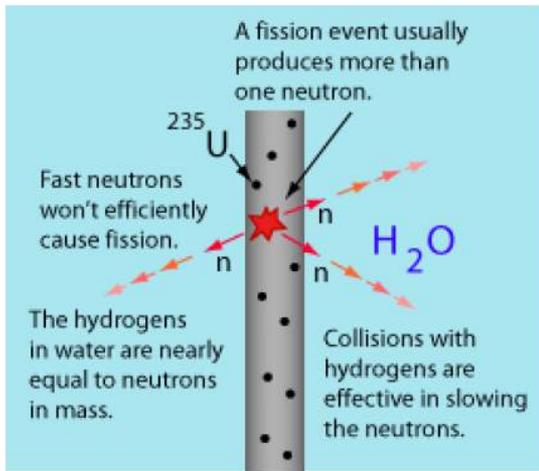


- **Moderador**: freia nêutrons produzidas na fissão sem absorvê-los, para que induza mais fissões. Normalmente: próton do hidrogênio da água.
- **Combustível em barras** (^{235}U): intercala urânio e moderador
- **Barra de controle**: absorve nêutrons para regular a potência do reator. Ex.: liga de prata, cádmio e índio; boro
- Água também é o fluido de transferência de calor

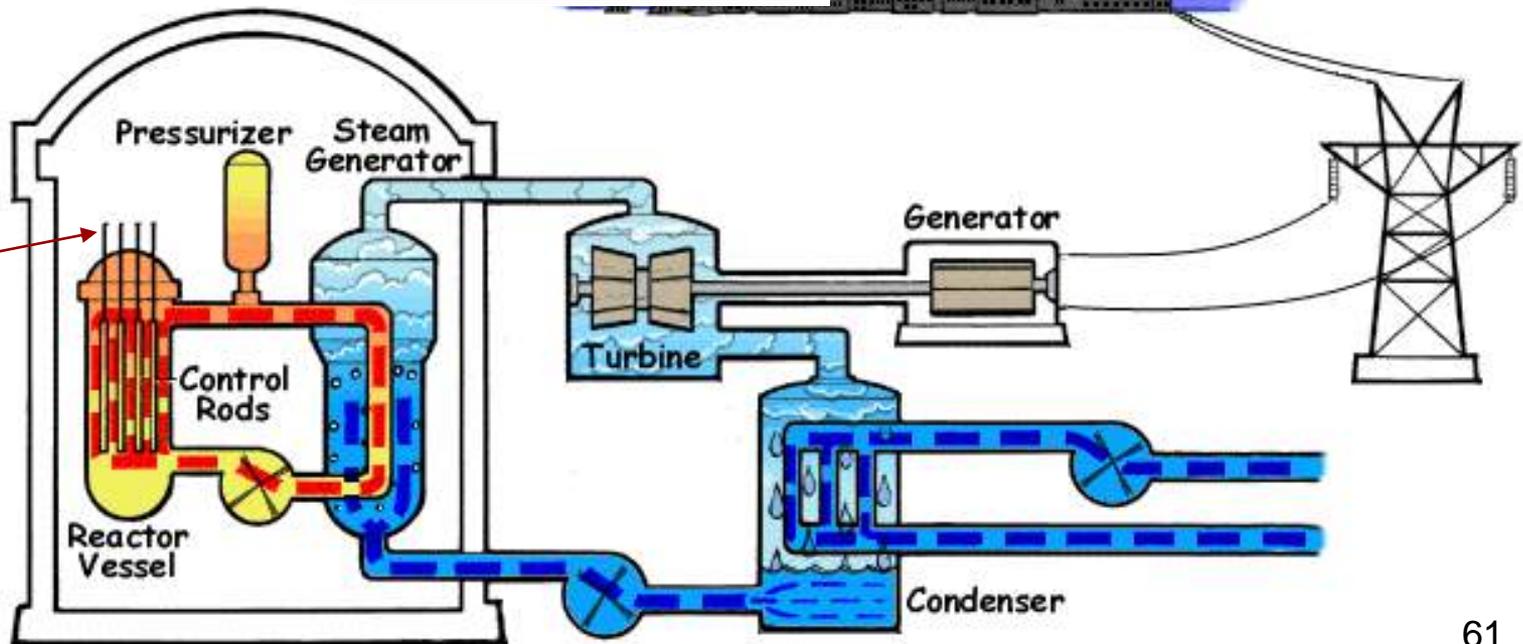


Reator de água pressurizada (PWR)

Reator de Fissão Nuclear



Moderador: H_2O
(ou grafite)



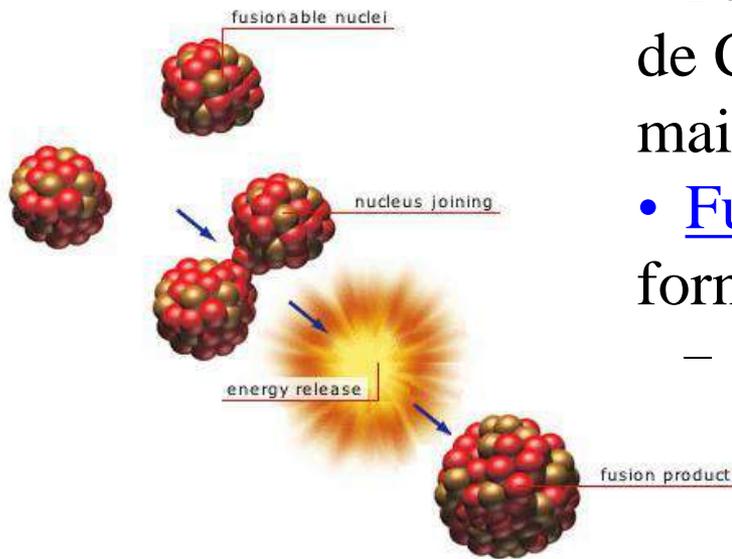
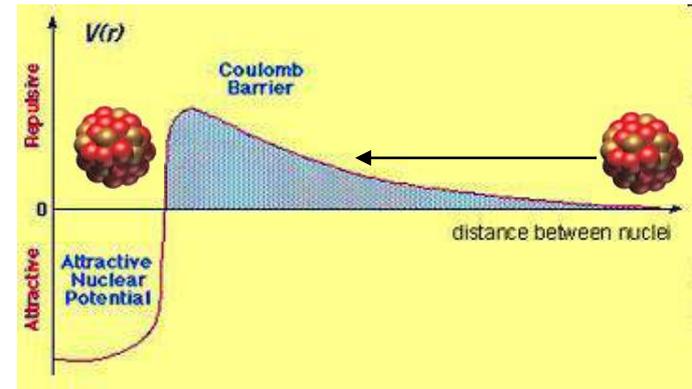
Barras de Combustível (^{235}U) e de Controle (Cd)

Reator de Fissão Nuclear

PROBLEMA: *Os rejeitos radioativos*



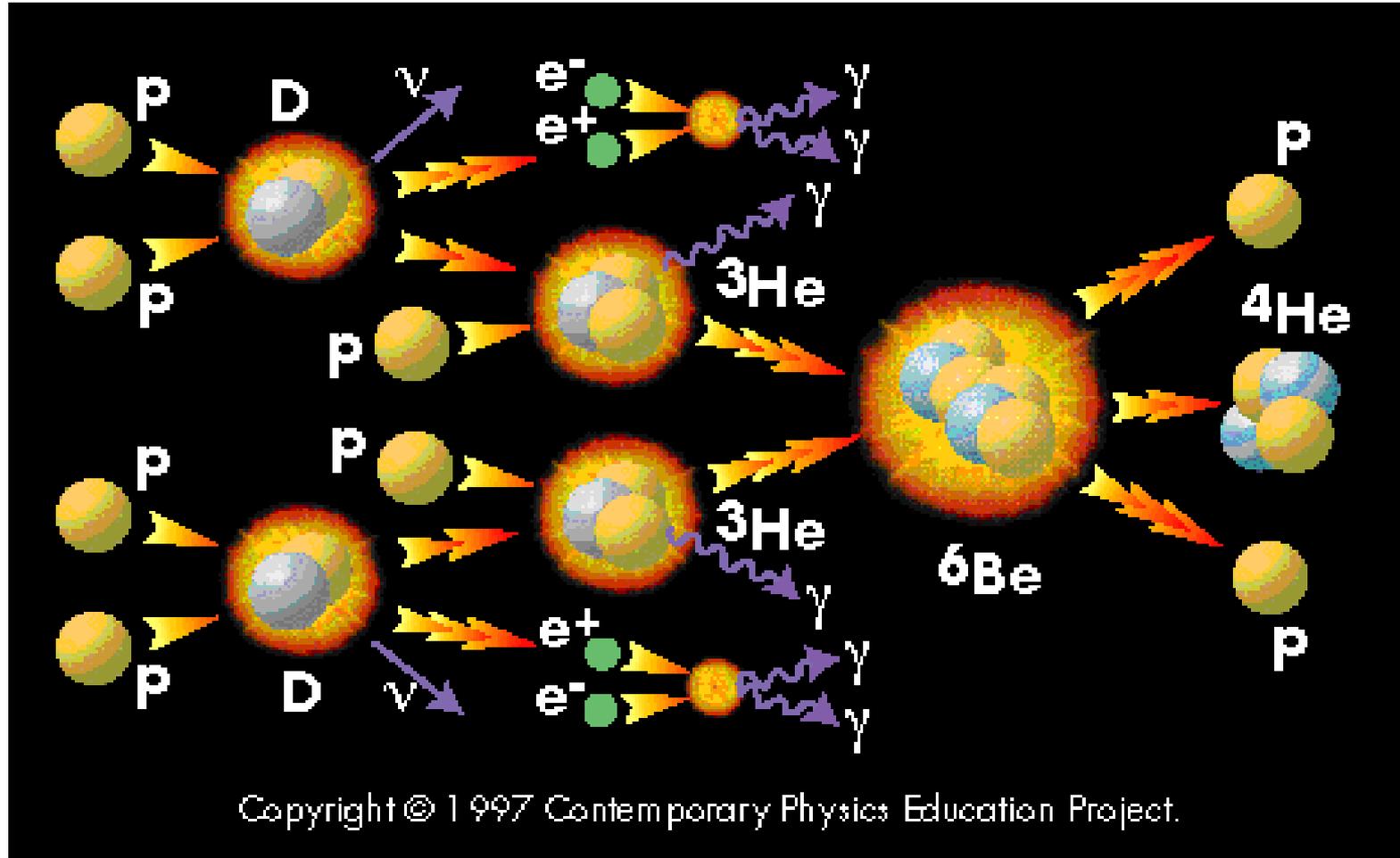
Energia nuclear: FUSÃO



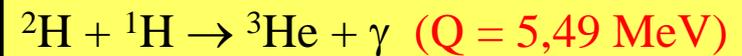
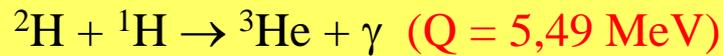
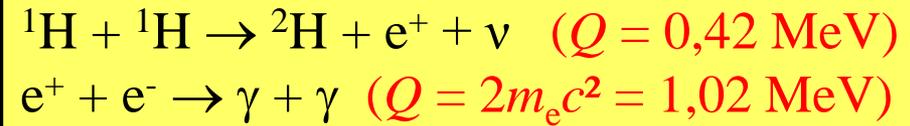
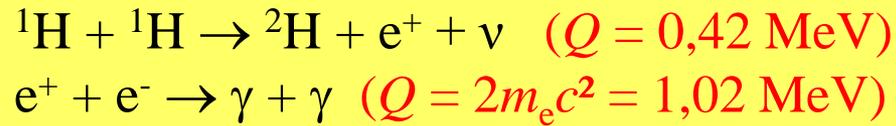
FUSION

- Para a fusão nuclear ocorrer, a barreira de Coulomb precisa ser vencida: energia maior ou tunelamento
- Fusão termonuclear: agitação térmica fornece energia necessária
 - Geração de energia nas estrelas

Fusão Termonuclear no Sol (ciclo próton-próton)



Fusão Termonuclear no Sol (ciclo $p-p$)



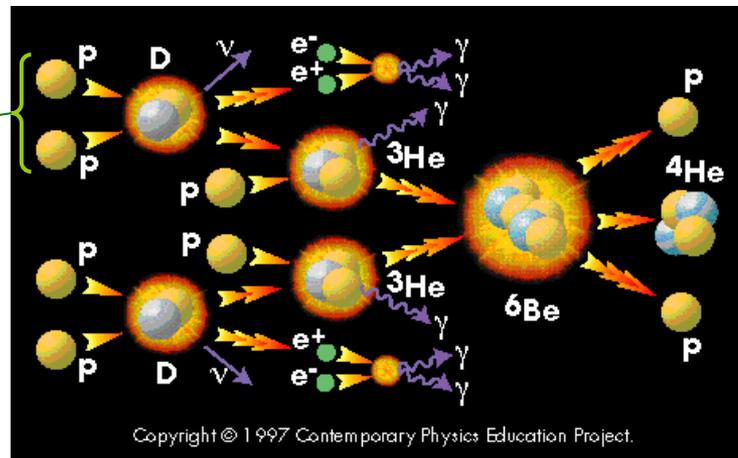
Tempo médio:
 $\sim 10^5$ anos!



$$Q_{\text{total}} = 2 \times (0,42 + 1,02 + 5,49) + 12,86 = 26,72 \text{ MeV}$$

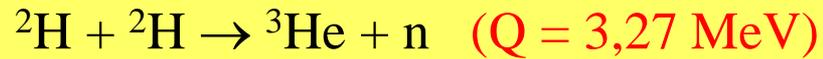


Processo lento:
 1 em 10^{26} colisões
 (restante é só espalhamento)

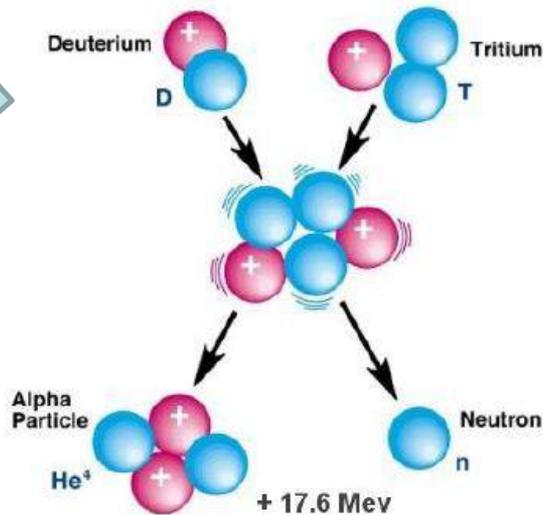


Fusão Nuclear Controlada

Possíveis reações de fusão para produzir energia elétrica na Terra:



- ${}^2\text{H}$: deutério (núcleo: dêuteron)
- ${}^3\text{H}$: deutério (núcleo: trítion)



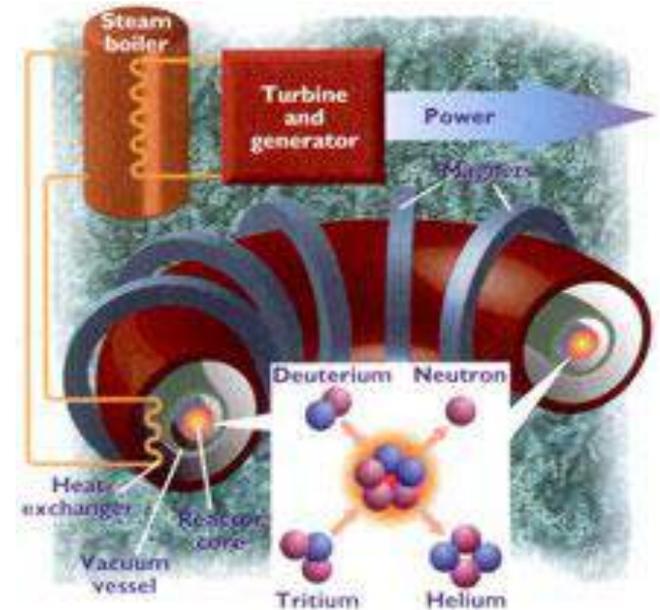
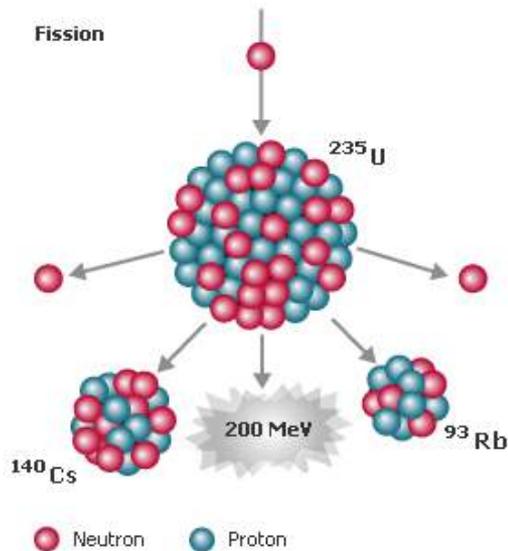
Reator termonuclear precisa de:

1. Alta concentração de partículas: garante muitas colisões por unidade de tempo;
2. Alta temperatura: garante que as partículas terão a energia necessária para vencer a barreira de Coulomb. Será formado plasma;
3. Longo tempo de confinamento: resulta em um grande número total de colisões.

Energia nuclear

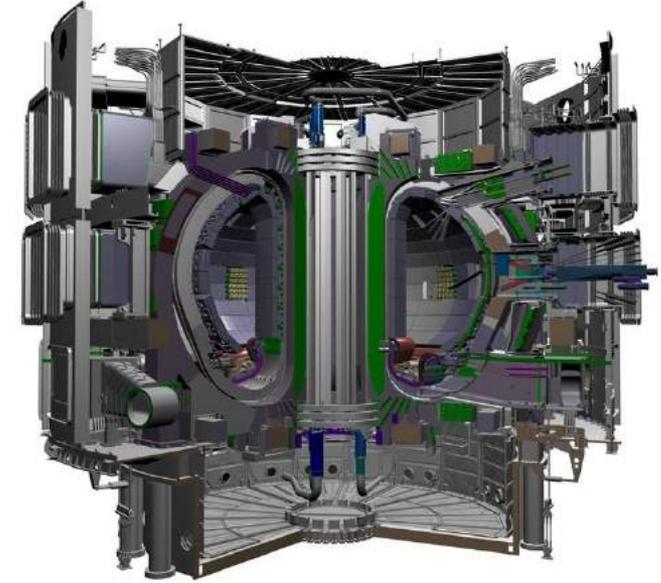
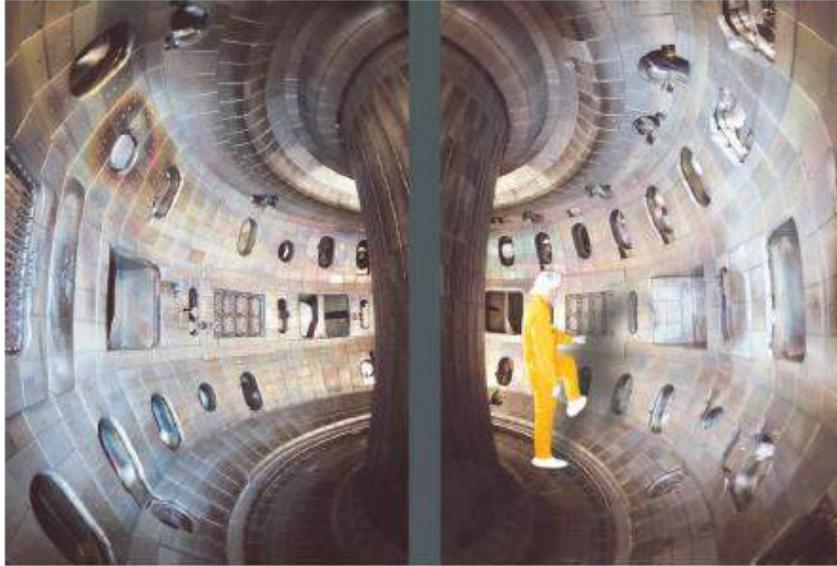
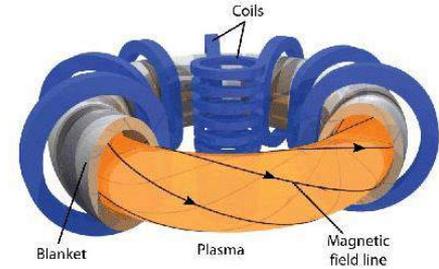
A fissão nuclear já é controlada há muito tempo.

Seria possível controlar a fusão nuclear?



Confinamento do
plasma

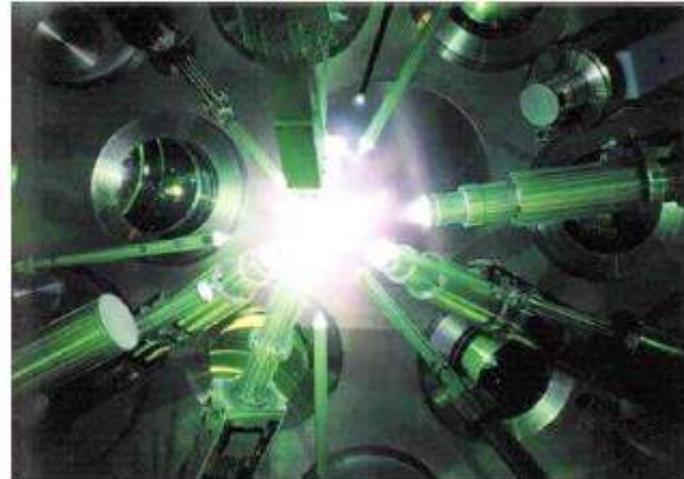
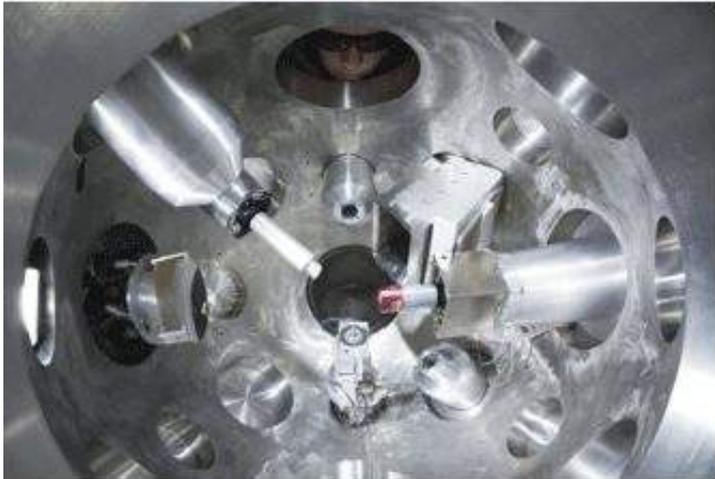
Confinamento magnético: tokamak



- Projeto em andamento: ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*).
- Local da construção: Cadarache, França; Início: 2008; Previsão do 1º teste: 2020
- Objetivo: Produzir 500 MW de energia com um consumo de 50 MW pela fusão de 0,5 g de deutério/trítio a mais de 150×10^6 °C
- Membros: União Europeia, China, Coreia do Sul, EUA, Índia, Japão, Rússia.

Confinamento inercial

1. Pequena esfera de combustível sólido é bombardeada de todos os lados por laser de alta intensidade
2. Material da superfície evapora
3. Onda de choque comprime parte central da esfera => \uparrow densidade e temperatura



Combustível: ${}^2\text{H} + {}^3\text{H}$



Resumo da aula:

- Núcleos, nuclídeos, isótopos, isóbaros,..
- Raios e massas dos nuclídeos,
- Energias de ligação,...
- Q de uma reação,..
- Lei do decaimento radioativo;
- Decaimentos radioativos alfa, beta, gama;
- Fissão e fusão nuclear;
- Reatores.

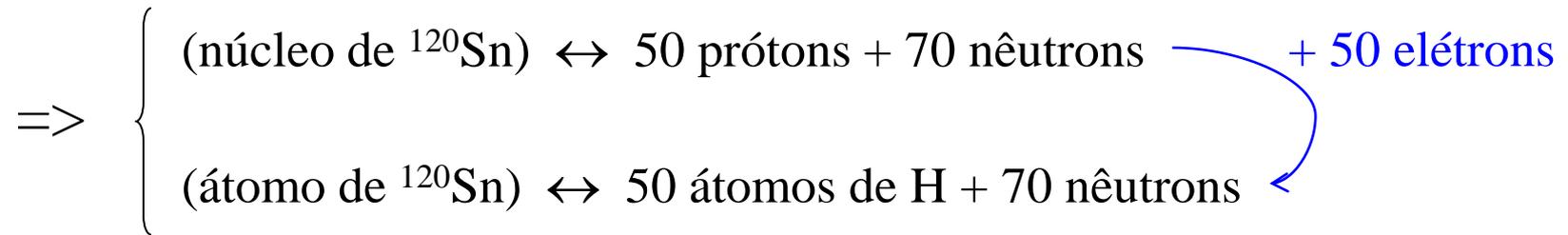
Ex. 1) Qual é a energia de ligação por núcleon do ^{120}Sn ?

Dados: $Z_{\text{Sn}} = 50$, $M_{\text{Sn}} = 119,902197$ u (massa atômica), $M_{\text{H}} = 1,007825$ u (massa atômica), $m_{\text{n}} = 1,008\,664$ u, $c^2 \cong 931,5$ MeV/u

[Halliday, cap. 42, exemplo resolvido]

Resposta:

^{120}Sn tem: $Z = 50$ (prótons), $A = 120$, $N = 120 - 50 = 70$ (nêutrons)



$$\Delta E_{el} = E_{lig} = \sum_i (m_i c^2) - M c^2 = (M_{final} - M_{inicial}) c^2$$

$$\begin{aligned} E_{lig} &= 50m_p c^2 + 70m_n c^2 - m_{\text{Sn}} c^2, \text{ onde } m_{\text{Sn}} \text{ é a massa nuclear do } ^{120}\text{Sn} \\ &= 50(m_p + m_e) c^2 + 70m_n c^2 - (m_{\text{Sn}} + 50m_e) c^2 \\ &= 50m_{\text{H}} c^2 + 70m_n c^2 - M_{\text{Sn}} c^2 \cong 1020,50 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$E_{lig} / A \cong 8,50 \text{ MeV/núcleon}$$

Ex. 2) Determine a energia Q da reação abaixo e verifique se a reação é endotérmica ou exotérmica: ${}_1\text{H}^1 + {}_3\text{Li}^7 \rightarrow {}_2\text{He}^4 + {}_2\text{He}^4$

Dados de massa atômica: ${}_3\text{Li}^7$: 7,016004 u ${}_2\text{He}^4$: 4,002602 u ${}_1\text{H}^1$: 1,007825 u
 $c^2 \cong 931,5 \text{ MeV/u}$

Resposta:

É necessário utilizar a massa nuclear em vez da massa atômica, mas foram dadas as massas atômicas, então as massas do elétrons precisam ser descontadas.

Q da reação:

$$\begin{aligned} Q &= (M_i - M_f)c^2 \\ &= \{ [(M_{\text{H}} - m_e) + (M_{\text{Li}} - 3m_e)] - 2(M_{\text{He}} - 2m_e) \} c^2 \\ &= (M_{\text{H}} + M_{\text{Li}} - 2M_{\text{He}})c^2 \\ &\cong 17,35 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$Q > 0 \Rightarrow$ reação exotérmica

Ex. 3) Na mistura de isótopos que se encontra atualmente na Terra, o ^{238}U tem uma abundância de 99,3%, e o ^{235}U tem uma abundância de 0,7%. Supondo que eles eram igualmente abundantes quando o urânio foi formado inicialmente na Terra, estime quanto tempo decorreu desde essa época.

Dados de vida média: ^{238}U : $6,52 \times 10^9$ anos; ^{235}U : $1,02 \times 10^9$ anos

Resposta:

Dados: $\tau_{238} = 6,52 \times 10^9$ anos; $\tau_{235} = 1,02 \times 10^9$ anos; $\lambda = 1/\tau$

Inicialmente: $N_0^{U^{238}} = N_0^{U^{235}}$ (Eq.1)

Hoje: $N^U = \frac{N^{U^{238}}(\tilde{t})}{0,993} = \frac{N^{U^{235}}(\tilde{t})}{0,007} \Rightarrow \frac{N^{U^{238}}(\tilde{t})}{N^{U^{235}}(\tilde{t})} = \frac{0,993}{0,007}$ (Eq. 2)

Equações de desintegração:

$$\begin{cases} N^{U^{238}}(\tilde{t}) = N_0^{U^{238}} e^{-\tilde{t}/\tau_{238}} & \text{(Eq. 3a)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} N^{U^{235}}(\tilde{t}) = N_0^{U^{235}} e^{-\tilde{t}/\tau_{235}} & \text{(Eq. 3b)} \end{cases}$$

Dividindo a Eq. 3a pela Eq. 3b e usando as Eqs. 1 e 2, temos:

$$\frac{0,993}{0,007} = e^{\tilde{t}(-1/\tau_{238} + 1/\tau_{235})} \Rightarrow \tilde{t} = \ln\left(\frac{0,993}{0,007}\right) \times \frac{1}{1/\tau_{235} - 1/\tau_{238}} \cong 5,99 \times 10^9 \text{ anos}$$

Ex. 4) (a) Calcule a energia liberada no decaimento alfa do ^{238}U ;

(b) Mostre que o ^{238}U não pode emitir espontaneamente um próton, isto é, que a repulsão entre os prótons não é suficiente para ejetar um próton do núcleo.

Dados de massa atômica (em u): $_{92}\text{U}^{238}$: 238,05079; $_{90}\text{Th}^{234}$: 234,04363; $_{91}\text{Pa}^{237}$: 237,05121; $_{2}\text{He}^4$: 4,00260; $_{1}\text{H}^1$: 1,00783. $c^2 = 931,5 \text{ MeV/u}$

[Halliday, cap. 42, exemplo resolvido]

Respostas:

Dados: $M_{^{238}\text{U}} = 238,05079 \text{ u}$, $M_{^{234}\text{Th}} = 234,04363 \text{ u}$, $M_{^{237}\text{Pa}} = 237,05121 \text{ u}$, $M_{^4\text{He}} = 4,00260 \text{ u}$, $M_{^1\text{H}} = 1,00783 \text{ u}$

(a) Reação: $_{92}^{238}\text{U} \rightarrow _{90}^{234}\text{Th} + _2^4\text{He}$

$$Q = (M_i - M_f)c^2 = (M_{^{238}\text{U}} - M_{^{234}\text{Th}} - M_{^4\text{He}})c^2 \cong 4,25 \text{ MeV (energia liberada)}$$

Usar a massa nuclear ou a massa atômica no decaimento α dá o mesmo resultado, porque (descartando a energia de ligação dos elétrons):

$$\begin{aligned} m_{^{238}\text{U}} - m_{^{234}\text{Th}} - m_{^4\text{He}} &= (M_{^{238}\text{U}} - 92m_e) - (M_{^{234}\text{Th}} - 90m_e) - (M_{^4\text{He}} - 2m_e) = \\ &= M_{^{238}\text{U}} - M_{^{234}\text{Th}} - M_{^4\text{He}} \quad , \text{ onde } m_X \text{ denotam as massas nucleares, } M_X, \text{ as massas atômicas e } m_e, \text{ a massa do} \\ &\text{elétron} \end{aligned}$$

(b) Reação: $_{92}^{238}\text{U} \rightarrow _{91}^{237}\text{Pa} + _1^1\text{H}$ (as massas dos elétrons também se cancelam)

$$Q = (M_i - M_f)c^2 = (M_{^{238}\text{U}} - M_{^{237}\text{Pa}} - M_{^1\text{H}})c^2 \cong -7,68 \text{ MeV (energia precisa ser absorvida} \Rightarrow \text{não é espontânea)}$$