

Aula 14

Física Nuclear

16										S 26	S 27	S 28	S 29	S 30								
15										0.012s	0.021s	0.125s	0.187s	1.178s								
14										P 25	P 26	P 27	P 28	P 29								
13										0.0368s	0.0437s	0.26s	0.2703s	4.142s								
12										Si 22	Si 23	Si 24	Si 25	Si 26	Si 27	Si 28						
11										0.029s	0.0423s	0.14s	0.22s	2.234s	4.16s	92.2297						
10										Al 21	Al 22	Al 23	Al 24	Al 25	Al 26	Al 27						
9										0.0428s	0.0911s	0.446s	2.053s	7.183s	7.17e+05y	100						
8										Mg 19	Mg 20	Mg 21	Mg 22	Mg 23	Mg 24	Mg 25	Mg 26					
7										4e-12s	0.0908s	0.122s	3.875s	11.32s	78.99	10	11.01					
6										Na 18	Na 19	Na 20	Na 21	Na 22	Na 23	Na 24	Na 25					
5										0.0347s	0.435s	0.4479s	22.49s	2.603y	100	15h	59.1s					
4										Ne 16	Ne 17	Ne 18	Ne 19	Ne 20	Ne 21	Ne 22	Ne 23	Ne 24				
3										0.1092s	1.666s	17.22s	90.48	0.27	9.25	37.24s	3.38m					
2										F 15	F 16	F 17	F 18	F 19	F 20	F 21	F 22	F 23				
1										0.14s	1e-19s	1.075m	1.83h	100	11.16s	4.158s	4.23s	2.23s				
0										O 12	O 13	O 14	O 15	O 16	O 17	O 18	O 19	O 20	O 21	O 22		
											0.00858s	1.177m	2.037m	99.757	0.038	0.205	26.88s	13.51s	3.42s	2.25s		
										N 11	N 12	N 13	N 14	N 15	N 16	N 17	N 18	N 19	N 20	N 21		
										0.09s	0.011s	9.965m	99.632	0.368	7.13s	4.173s	0.619s	0.271s	0.13s	0.095s		
										C 8	C 9	C 10	C 11	C 12	C 13	C 14	C 15	C 16	C 17	C 18	C 19	C 20
											0.1265s	19.31s	20.39m	98.93	1.07	5700y	2.449s	0.747s	0.193s	0.092s	0.049s	0.014s
											B 8	B 9	B 10	B 11	B 12	B 13	B 14	B 15		B 17		B 19
											0.77s	8.5e-19s	19.9	80.1	0.0202s	0.01736s	0.0125s	0.0105s		0.00508s		0.00292s
											Be 7	Be 8	Be 9	Be 10	Be 11	Be 12		Be 14				
											53.22d	6.7e-17s	100	1.51e+06y	13.81s	0.0213s		0.00484s				
											Li 6	Li 7	Li 8	Li 9		Li 11						
											7.59	92.41	0.8399s	0.1783s		0.0087s						
											He 3	He 4										
											0.000137	99.9999										
											H 1	H 2	H 3									
											99.9885	0.0115	12.32y									
											n 1											
											10.23m											

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

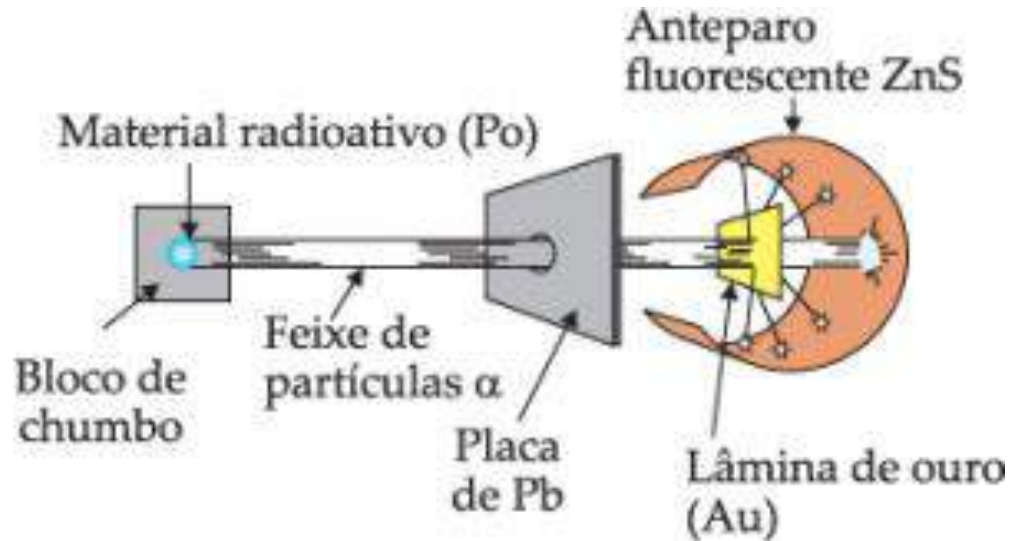
- J.J. Thomson (1897) descobriu o elétron e mediu seu e/m :



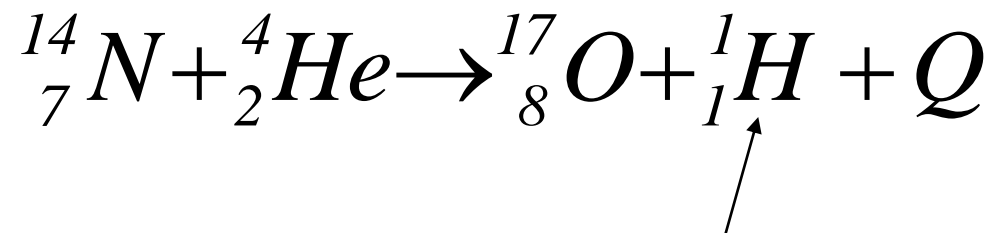
O pai da Física Nuclear: Ernest Rutherford



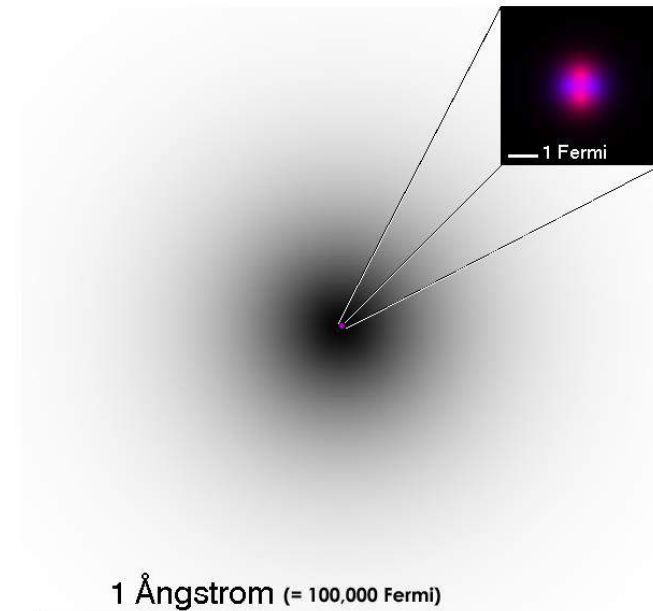
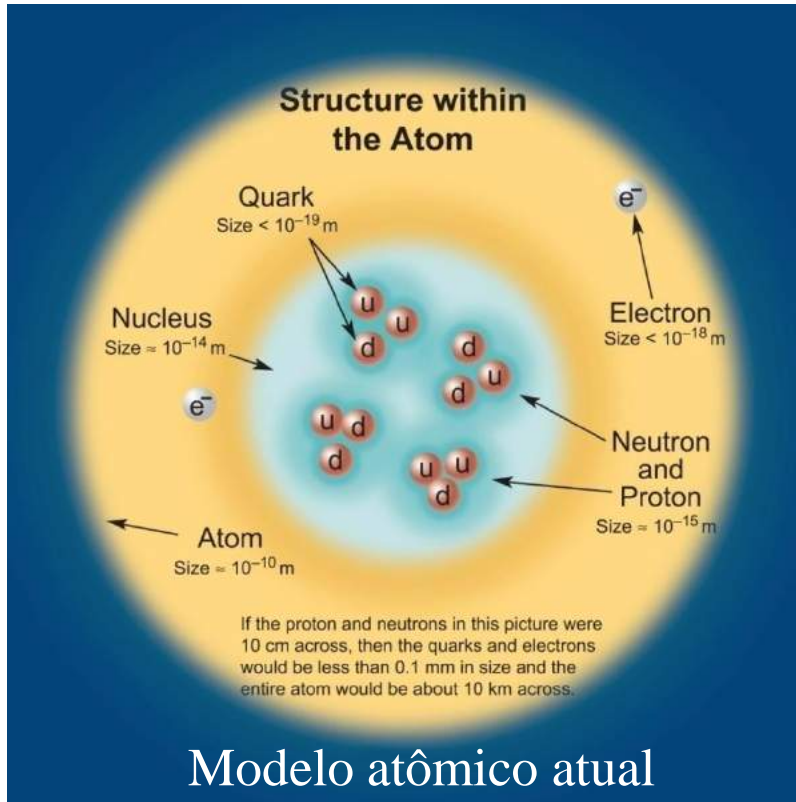
1911 – descoberta do núcleo atômico



1919 – 1ª transmutação nuclear:



A descoberta do núcleo atômico



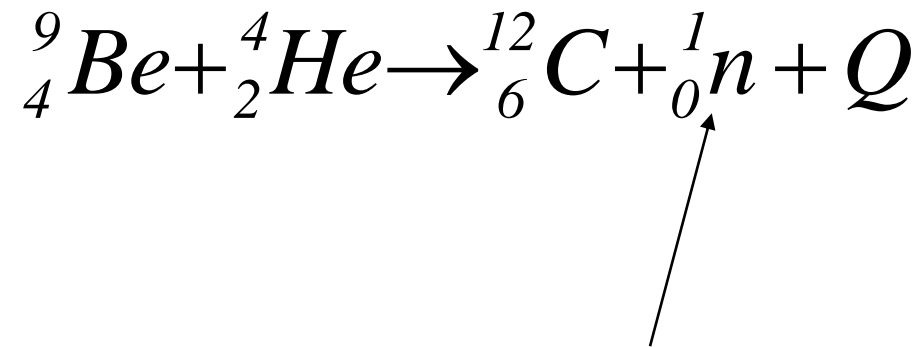
1 Ångstrom (= 100,000 Fermi)

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

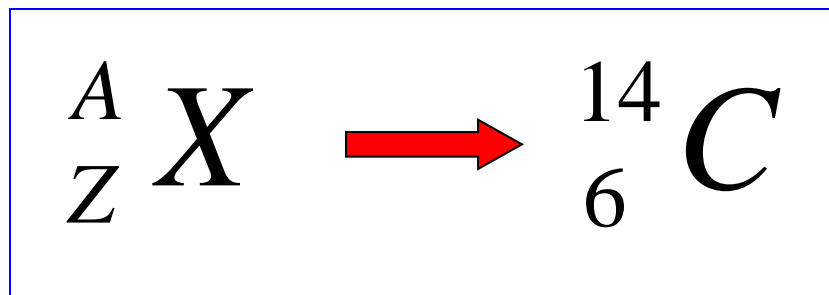
Número Atômico (Z) – número de prótons do núcleo

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

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

nêutrons: $A = Z + N$

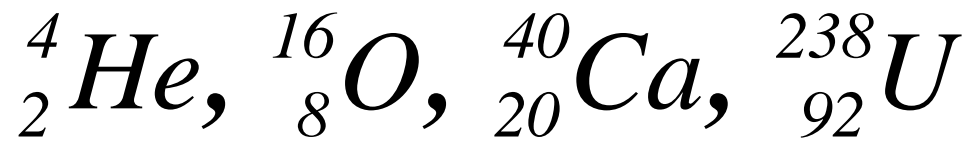
Símbolo:



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

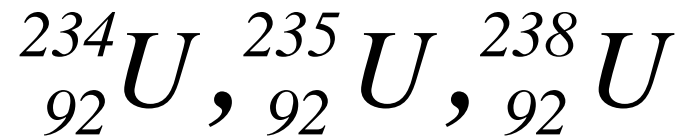
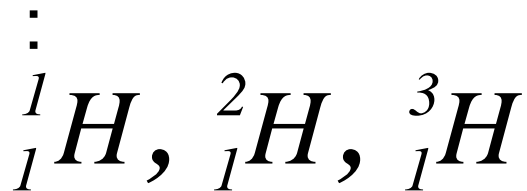
Nuclídeo

- 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:





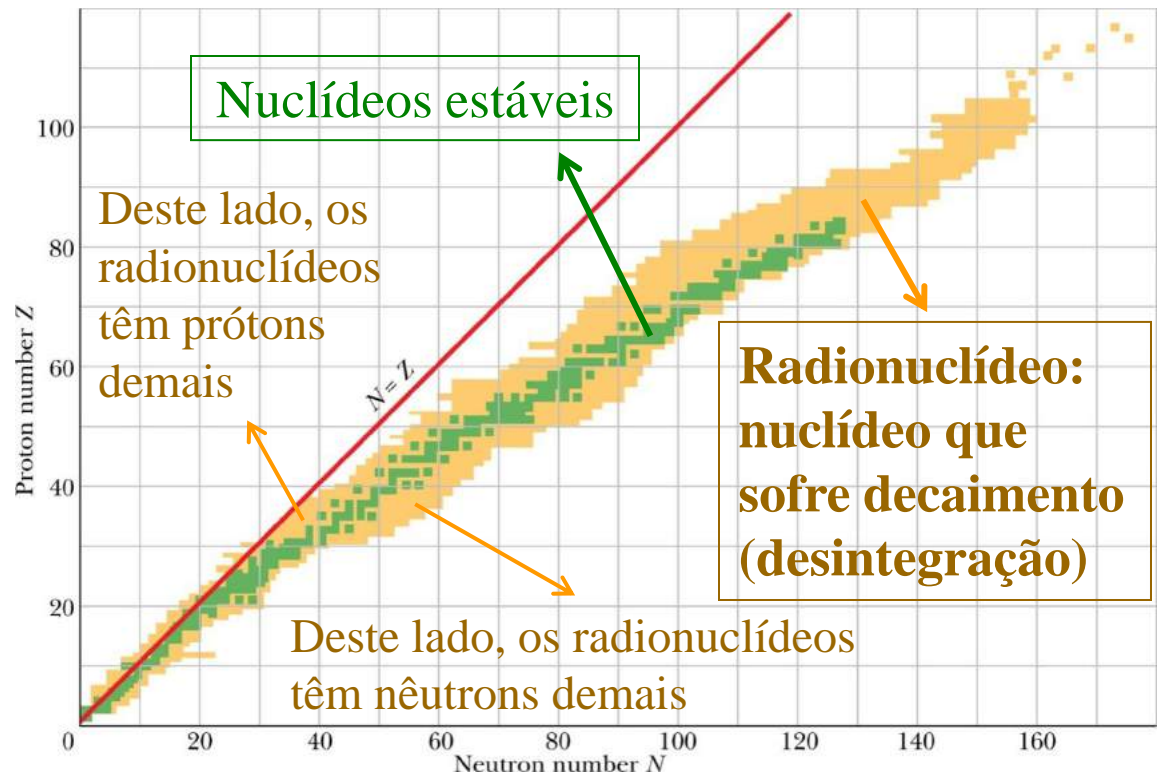
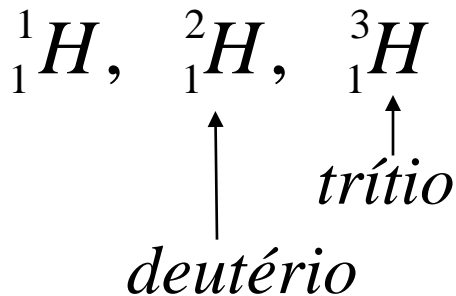
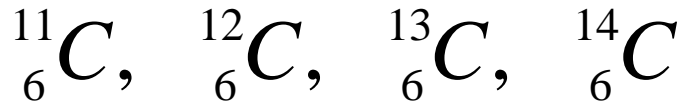
- Z é o número atômico \Rightarrow número de prótons do núcleo = número de elétrons do átomo (\Rightarrow propriedades químicas do átomo);
- A é o número de massa $\Rightarrow Z+N$;
- **Isótopos** \Rightarrow têm o mesmo Z , mas A diferentes



Nomenclatura

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

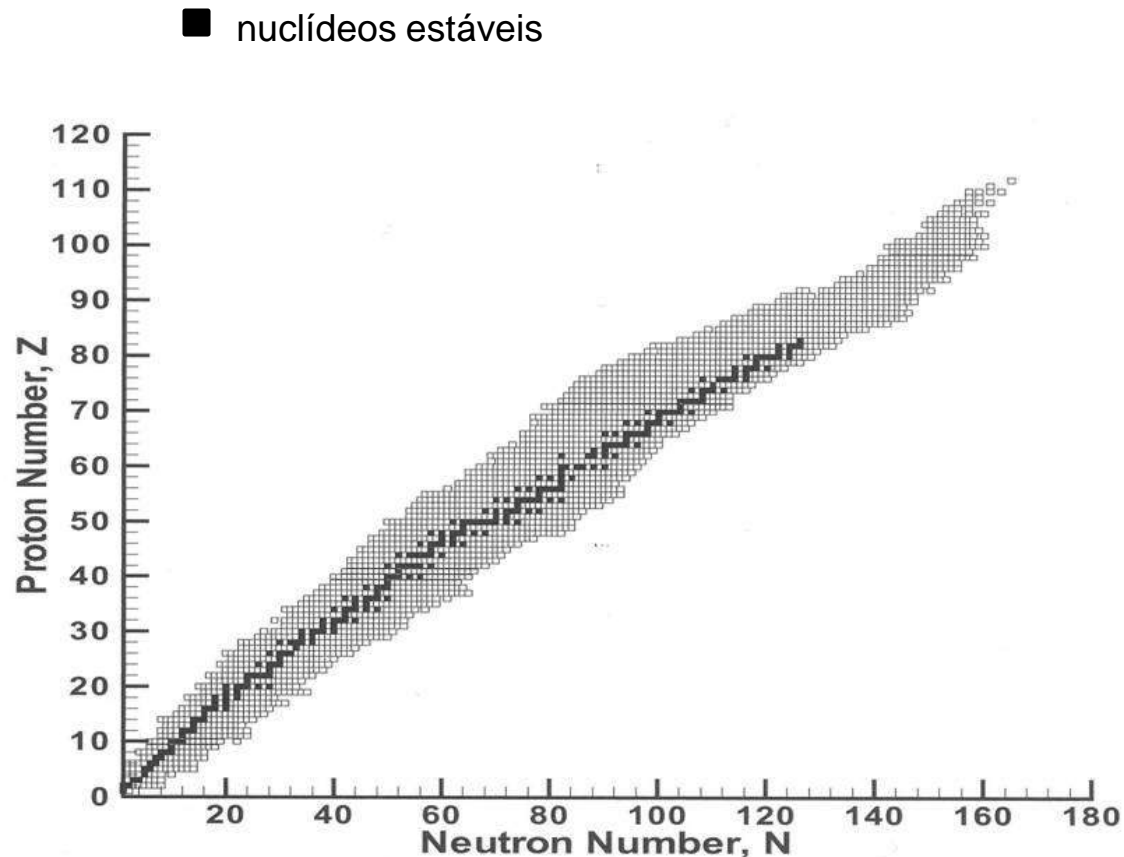
Exemplos:



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**.



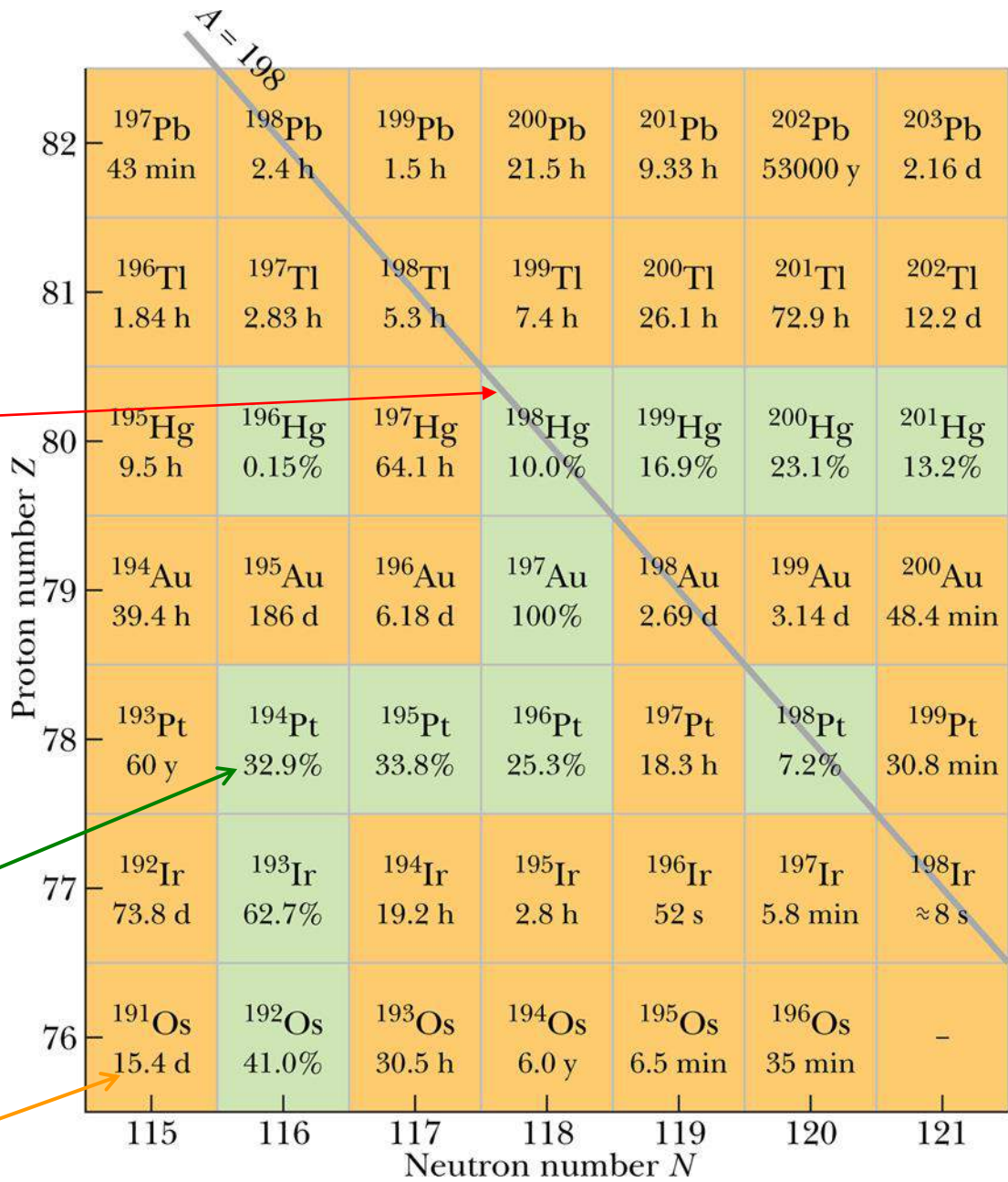
Vista ampliada da carta de núclídeos

Reta isobárica

Isóbaros:
 $A = N + Z = const.$

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

Meia-vida do radionuclídeo



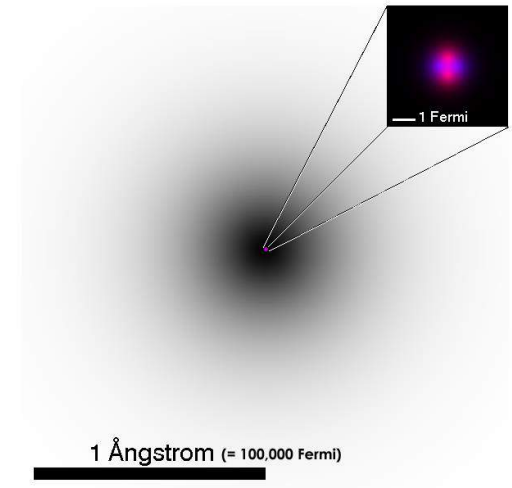
Ordens de grandeza

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

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

(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?

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

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

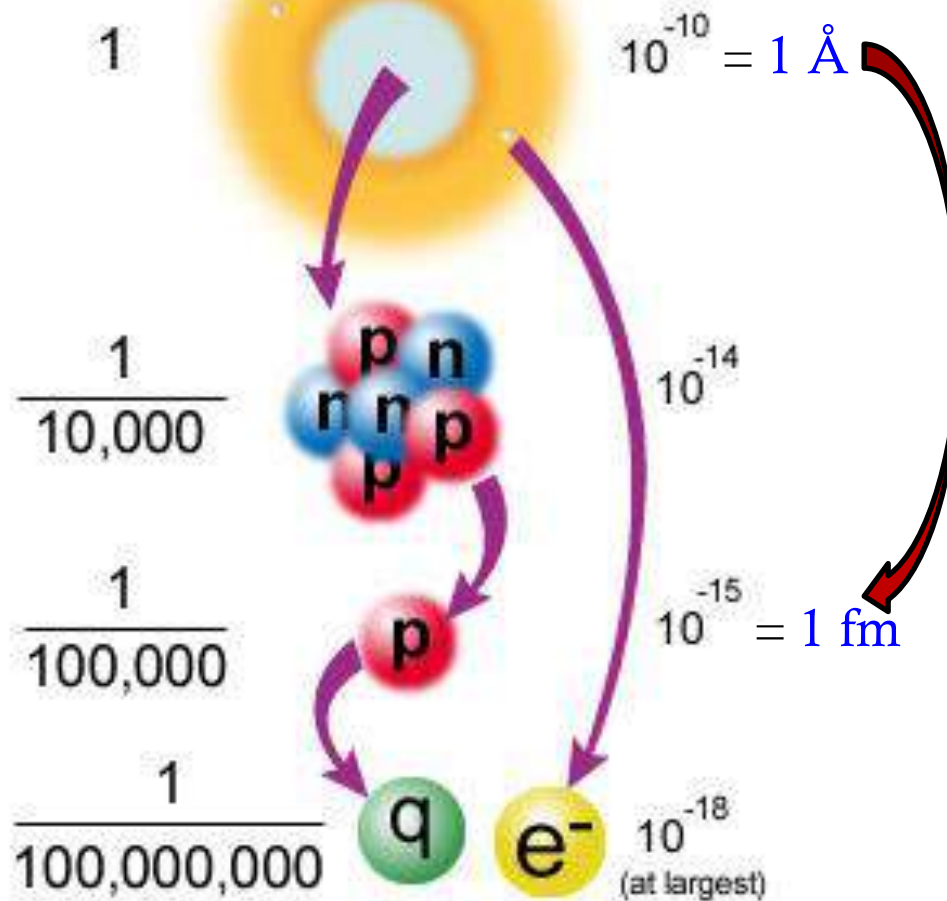
$$\rho = \frac{3 \times 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}}{4\pi (1,2 \times 10^{-15} \text{ m})^3} \cong 2,3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

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

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:

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

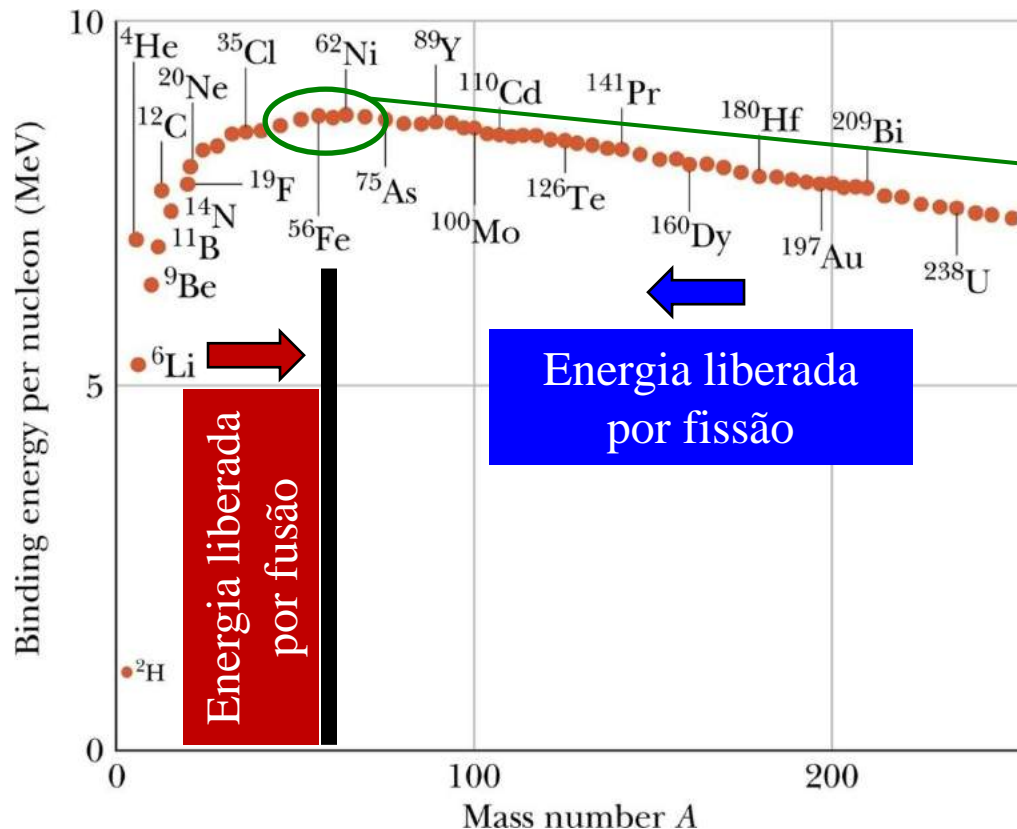
massa do próton massa do nêutron

- 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.

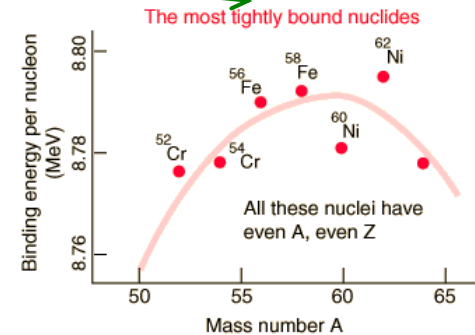
Energia de ligação por núcleon

- 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:

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



Núcleos mais estáveis



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

Vida média:

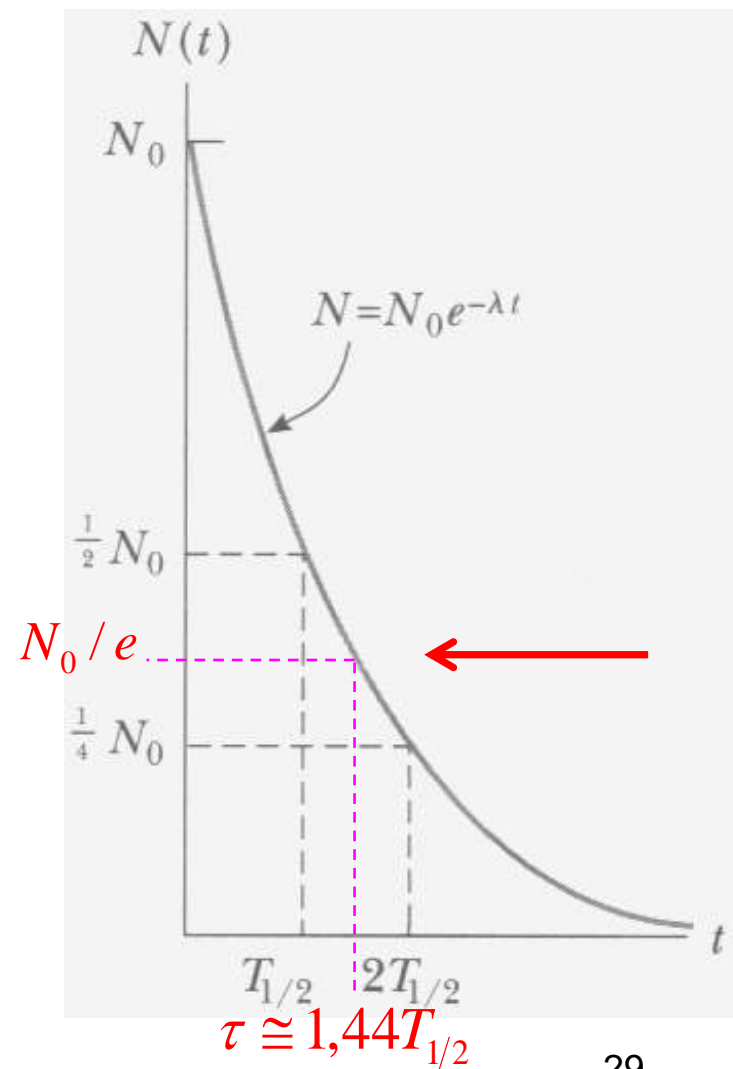
Tempo necessário para que N e R caiam a $1/e \cong 36,8\%$ do valor inicial:

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

Portanto:

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

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



Observamos que...

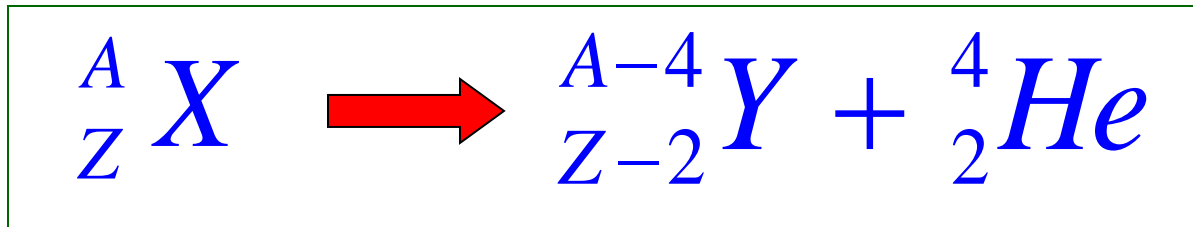
- Se núcleo estiver em um estado excitado, ele pode desexcitar emitindo um fóton (usualmente na faixa de raios gama);
- Se houver excesso de nêutrons/prótons, o núcleo pode sofrer decaimento beta;
- Outros processos são possíveis, tais como captura eletrônica, emissão de prótons ou nêutrons, decaimento 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.

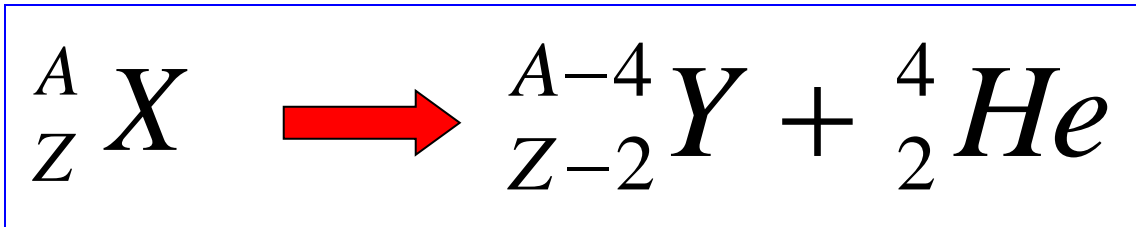
a) Decaimento alfa

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

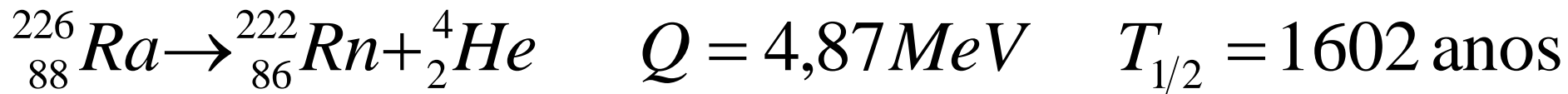
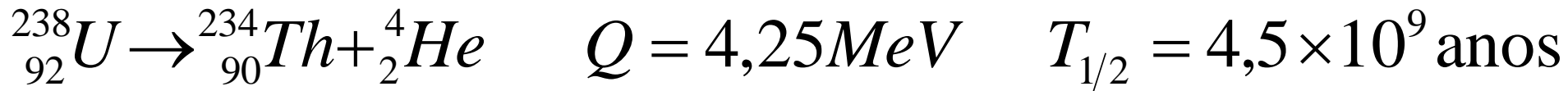


(conservação de carga e do número de núcleons)

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

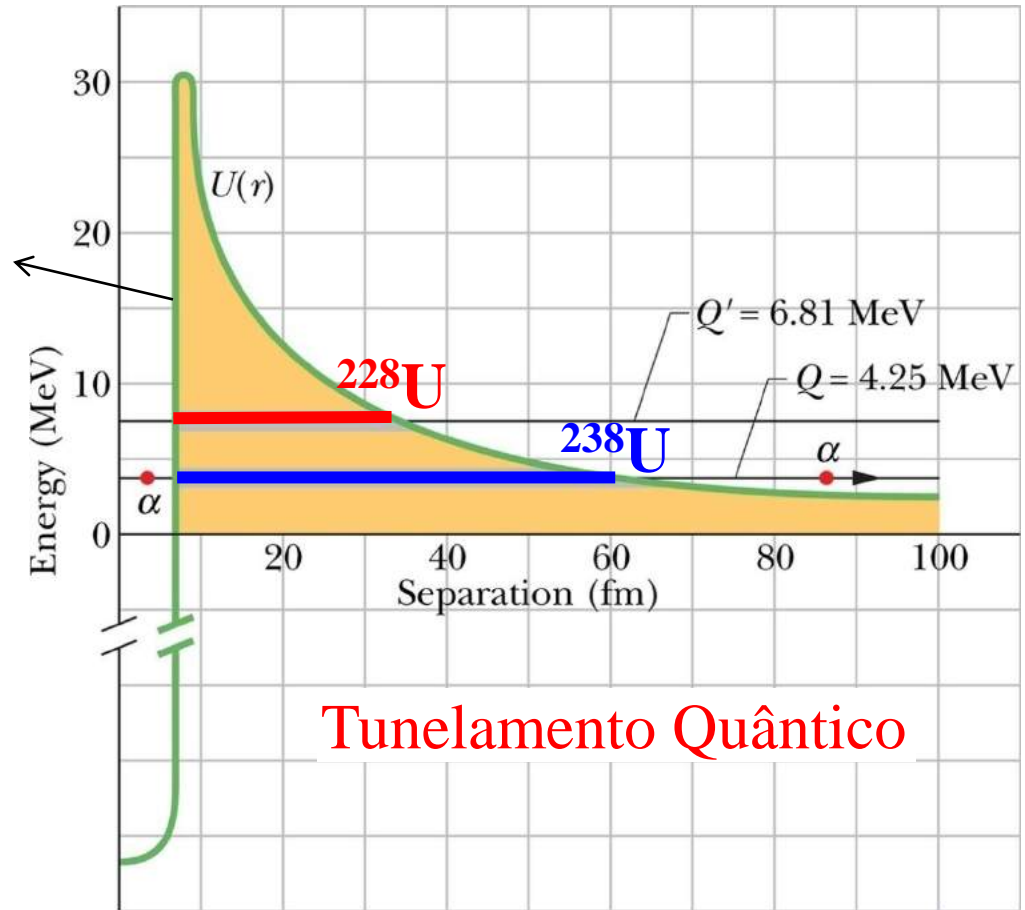
Decaimento alfa

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**.

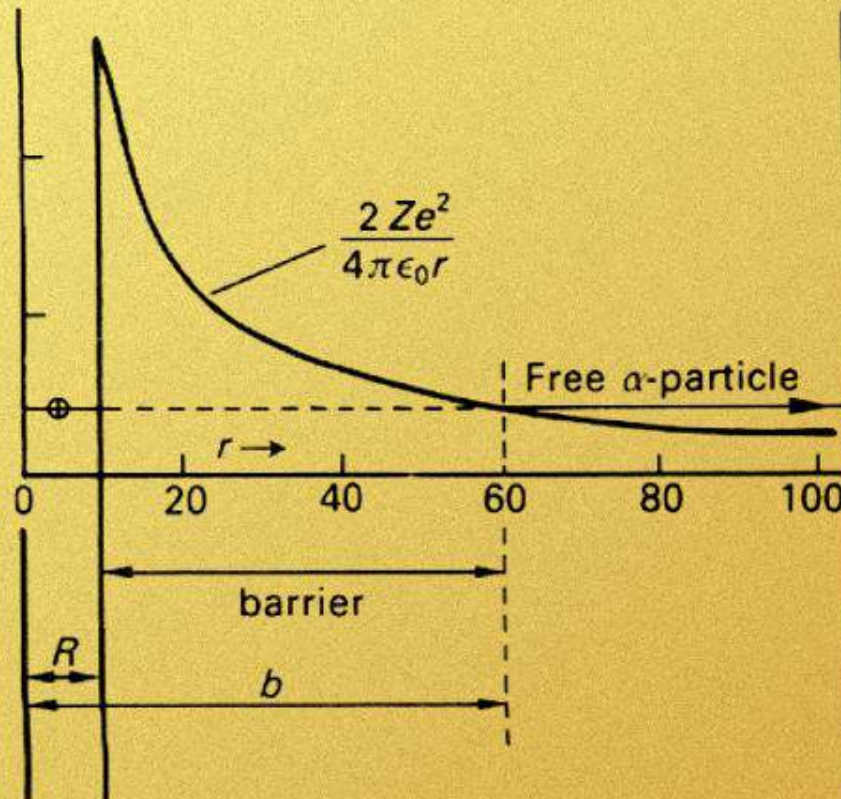
O mecanismo de decaimento alfa

Barreira de potencial



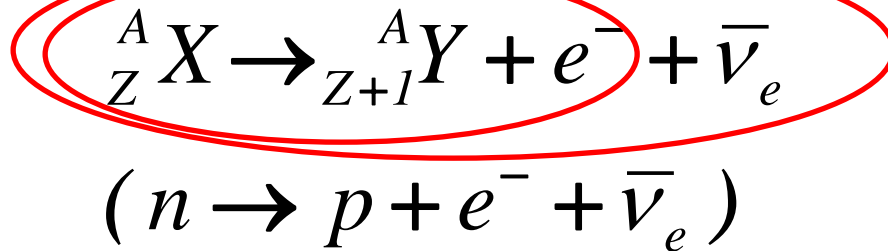
- O isótopo ^{228}U , com $Q' = 6,81 \text{ MeV}$, tem uma meia-vida de apenas $T_{1/2} = 9,1 \text{ min}$.
- Isso ocorre porque o coeficiente de transmissão de uma barreira é muito sensível a variações da energia total da partícula.

O tunelamento da alfa pela barreira

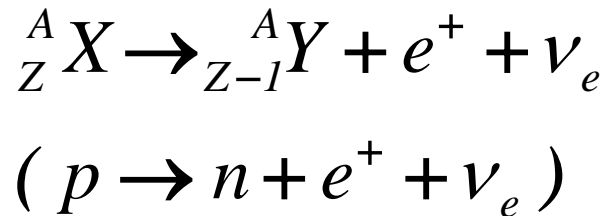


Decaimento Beta (β^- e β^+)

- Alguns núcleos espontaneamente sofrem β^- :



- Outros sofrem β^+ :



O neutrino

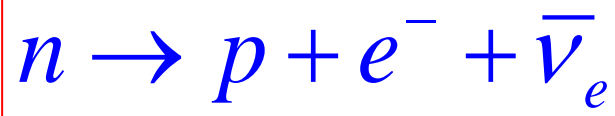
- Em 1930, Pauli postulou a existência do neutrino, para preservar a conservação da energia/momento/momento angular no decaimento beta:
- Em 1956, Reines e Cowan confirmaram experimentalmente sua existência (portanto 26 anos após a previsão de Pauli).

Processos de decaimento radioativo

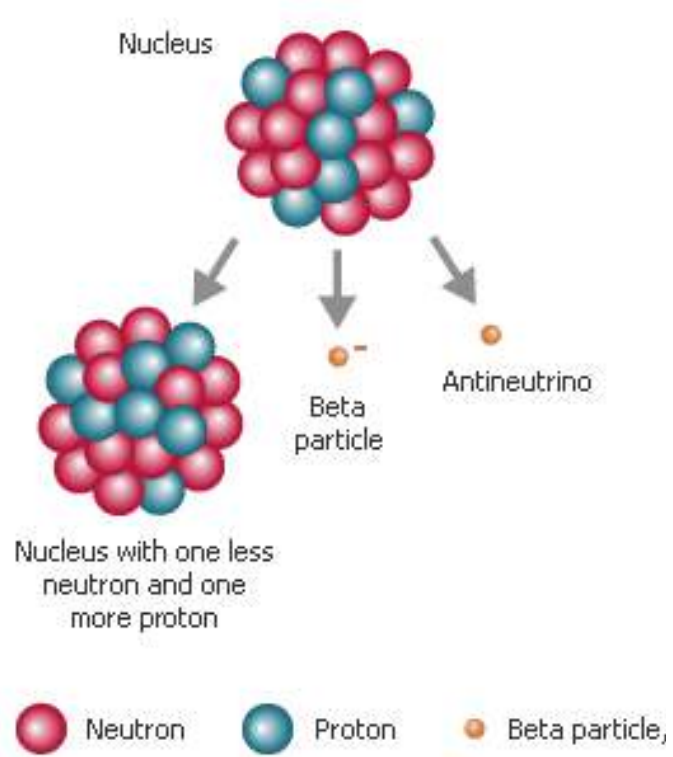
b) Decaimento beta

- 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**:

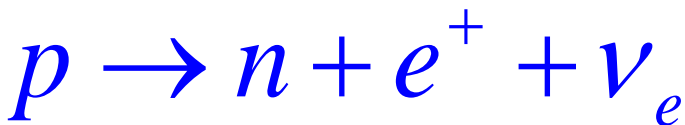


(conservação de carga e do número de núcleons)



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

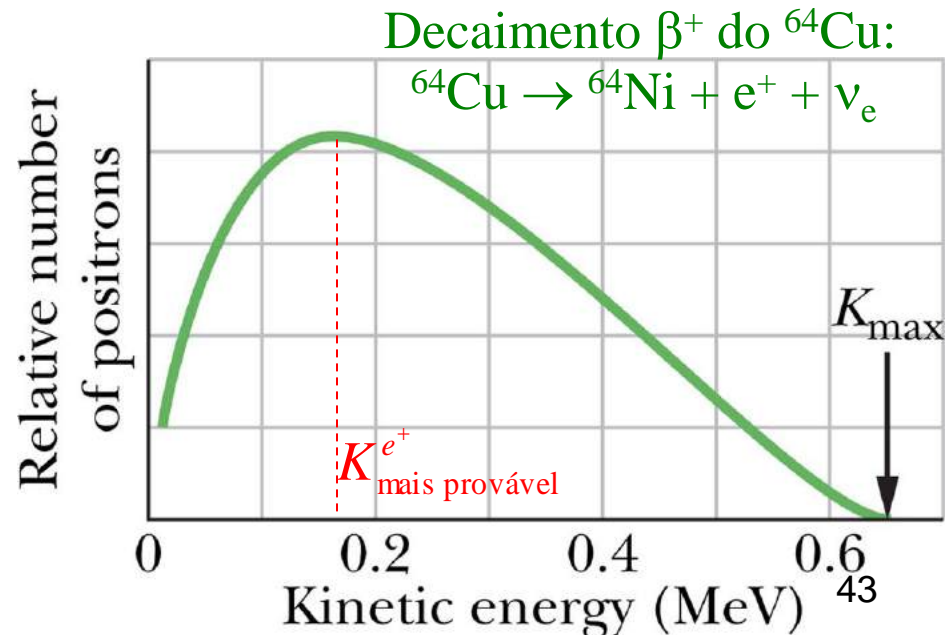
- Enquanto no decaimento α praticamente toda a energia liberada Q vai para a partícula α , no decaimento β esta energia pode se distribuir de diferentes formas entre a energia do elétron (ou pósitron) e do anti-neutrino (ou neutrino).
- Por exemplo, no decaimento β^+ do ^{64}Cu , os pósitrons apresentam 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 $K^\nu = 0$)



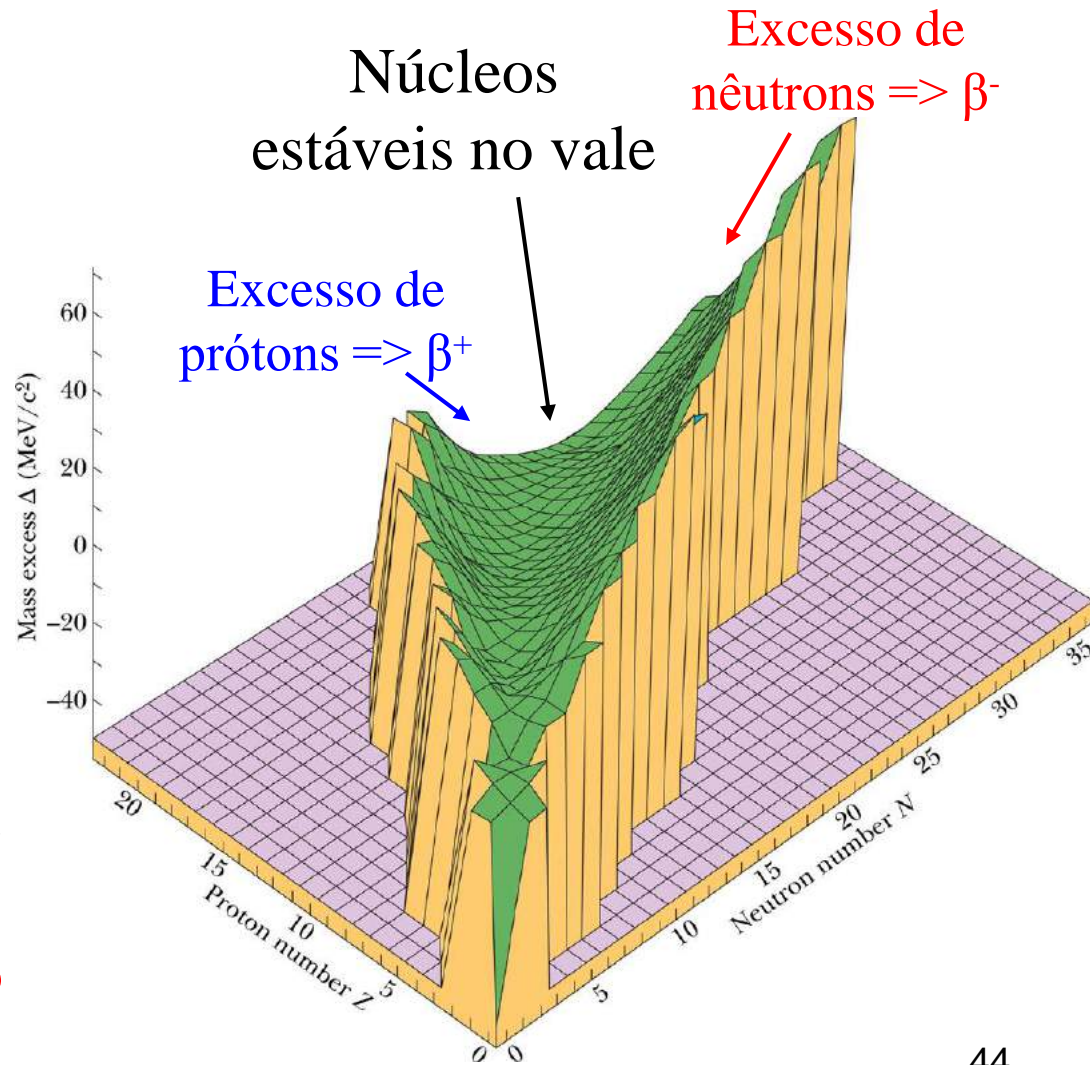
Excesso de massa

- O excesso de massa Δ é definido por:

$$\Delta \equiv M - A$$

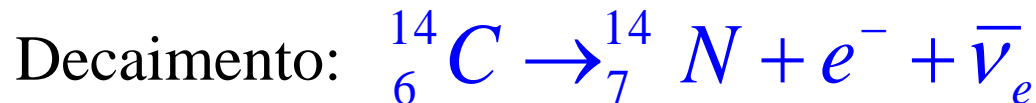
M : massa do átomo em unidades de massa atômica
 A : número de massa do núcleo

- 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)

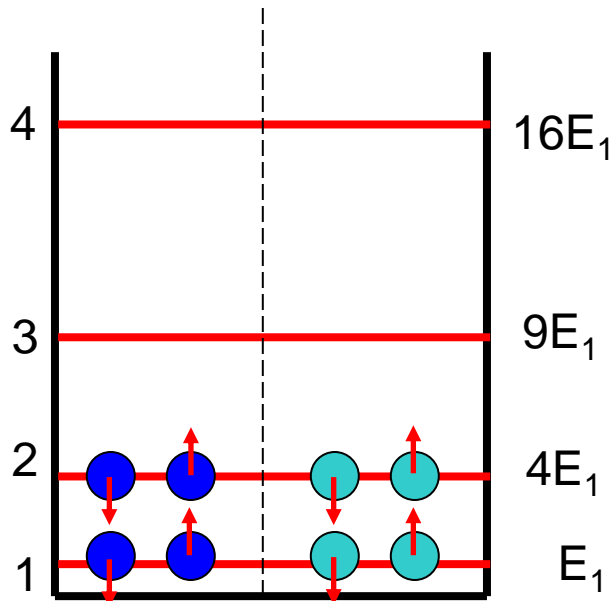
Raios X, gama e elétrons: RBE = 1; nêutrons lentos: RBE = 5;
partículas alfa: RBE = 20

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

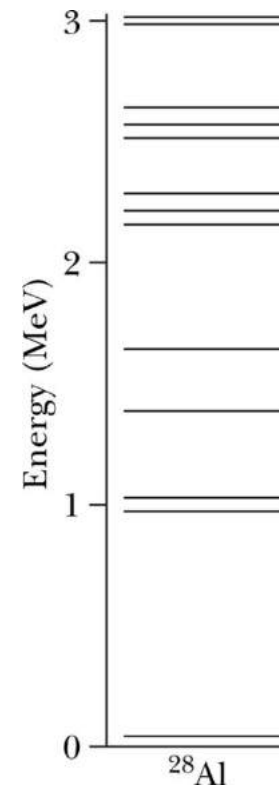
Ex.: Recomenda-se que nenhum indivíduo exposto (não profissionalmente) a radiação receba uma dose equivalente maior que 5 mSv em um ano.

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:

$$I = \sqrt{i(i+1)}\hbar$$

$$I_z = m_S^{nuclear} \hbar$$

$$m_S^{nuclear} = -i, -i+1, \dots, i-1, i$$

Associado a este spin, temos um momento magnético nuclear:

$$\mu_{s,z}^{nuclear} = g_S m_S^{nuclear} \mu_N$$

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$$

(*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!**

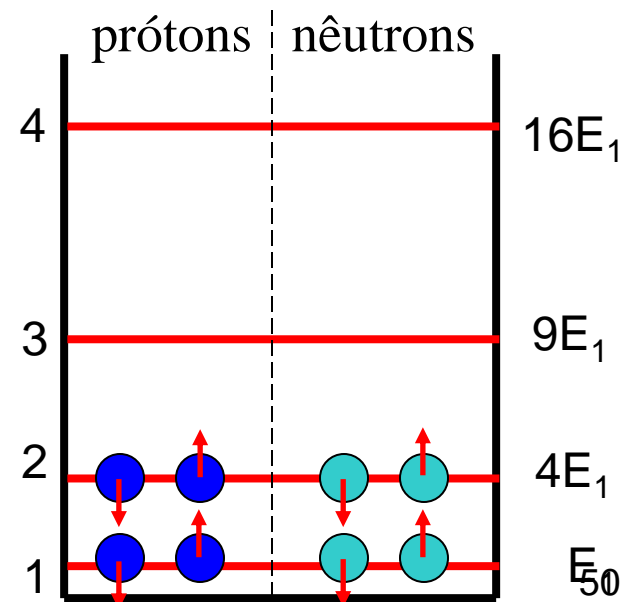
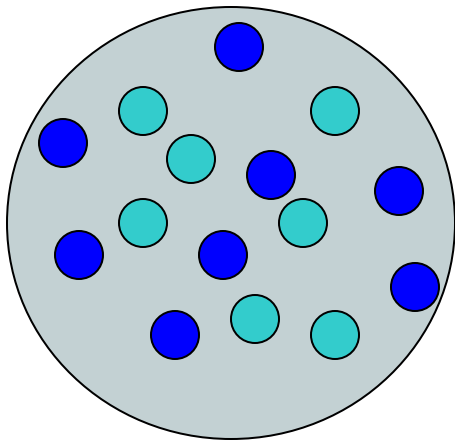
Restrição: precisam obedecer o princípio da exclusão de Pauli (nucleons têm spin $\frac{1}{2}$!)

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.

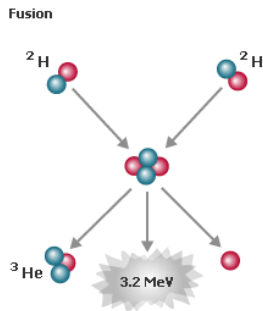
O potencial efetivo não é esfericamente simétrico e estático. É considerado um potencial capaz de se deformar.

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

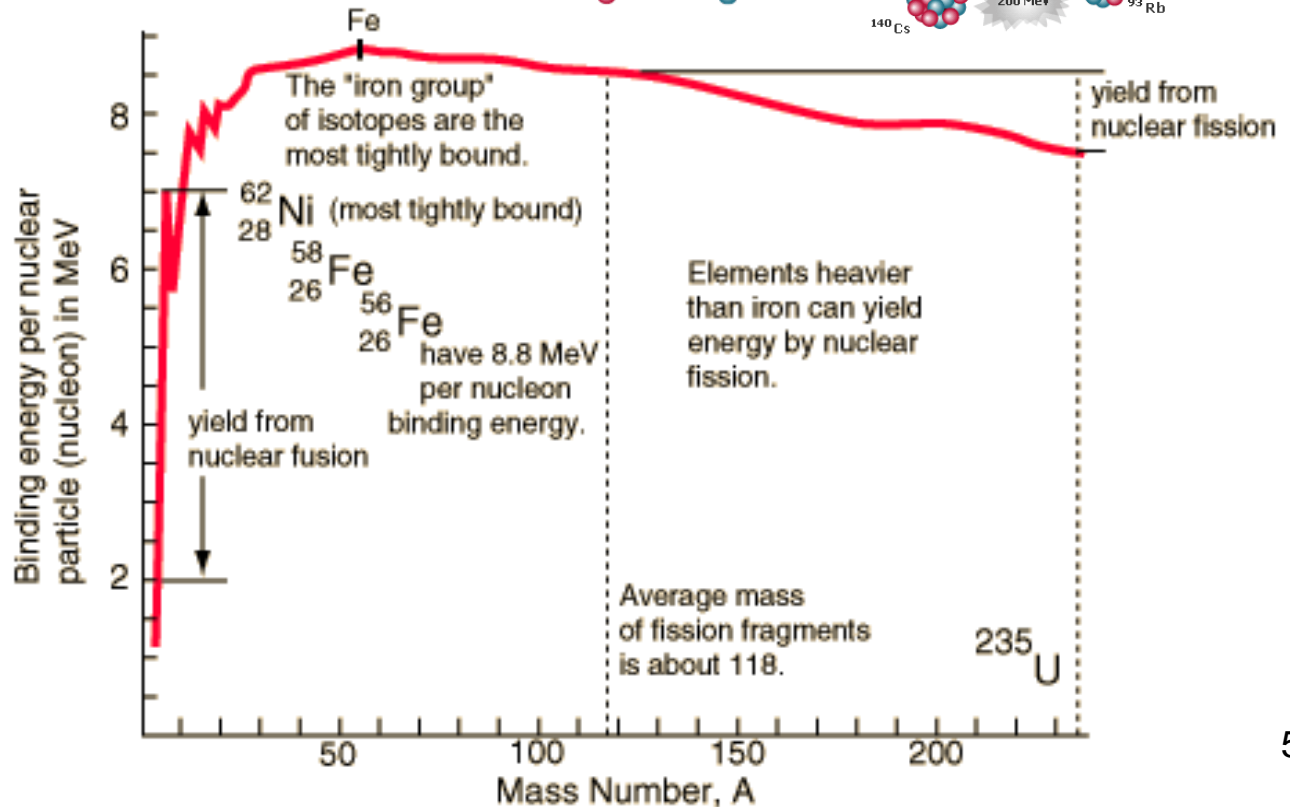
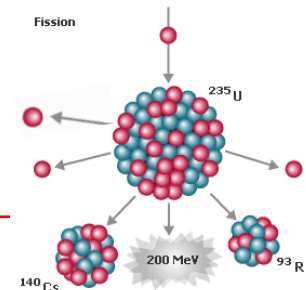
Energia nuclear

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



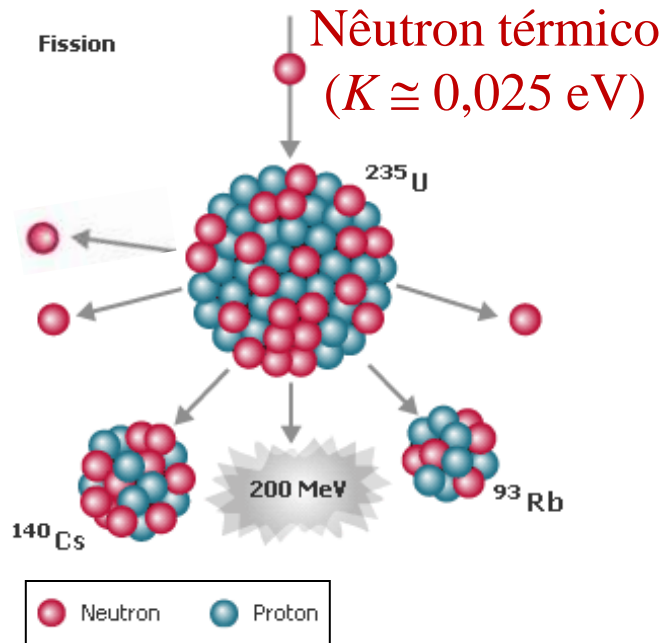
Fusão nuclear

Fissão nuclear

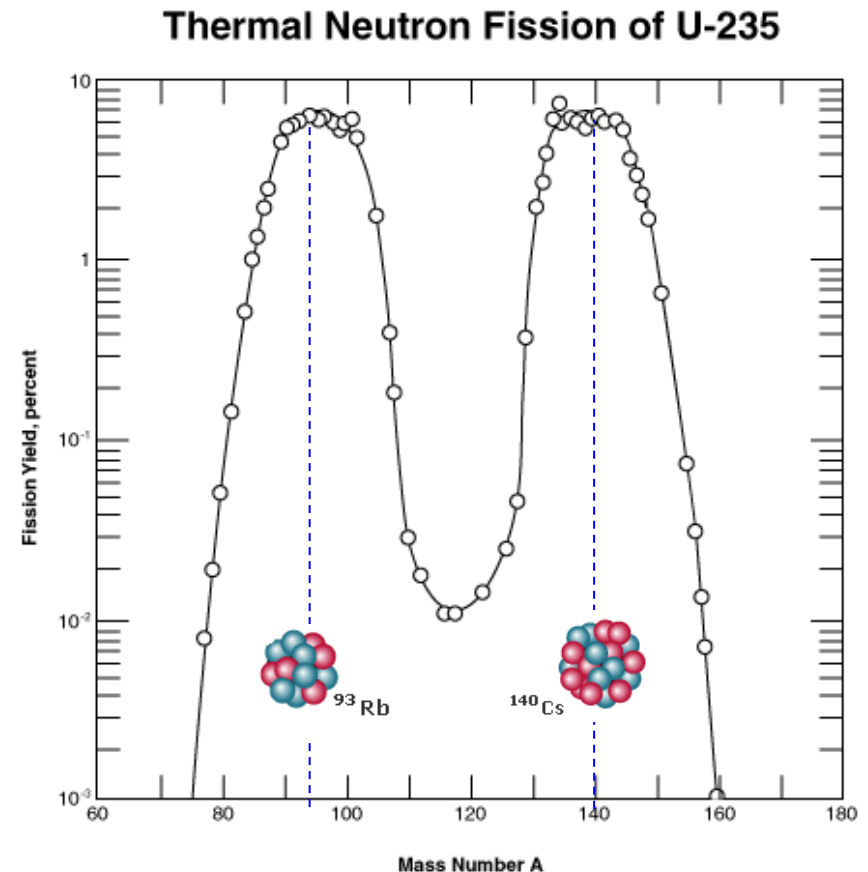


Fissão nuclear

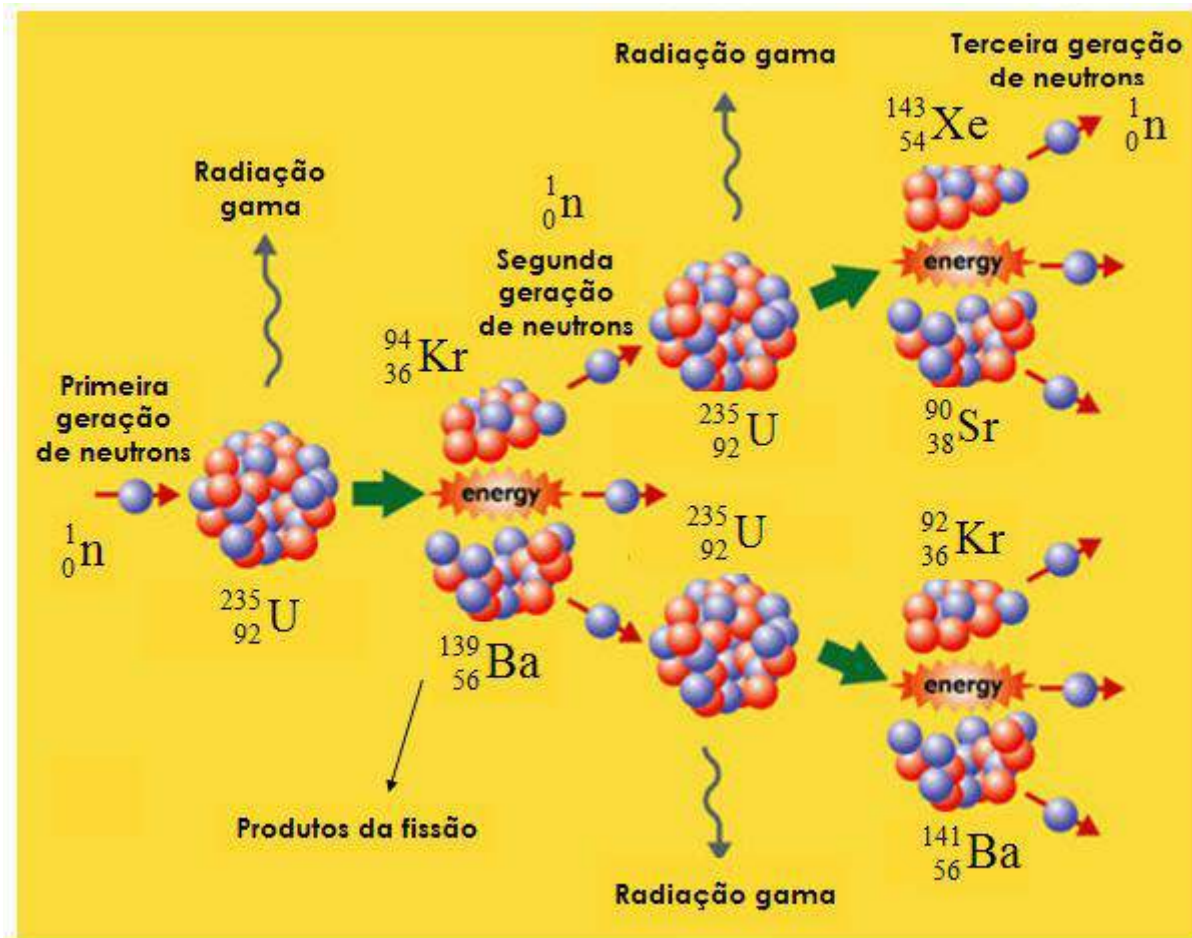
- Núcleo se desintegra em fragmentos menores (Nobel de Química de 1944 para O. Hahn)
- Número total de prótons e de nêutrons se conserva
- $^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{236}\text{U} \rightarrow$ várias formas de fissão. Um exemplo:



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



Reações em cadeia



Bomba atômica



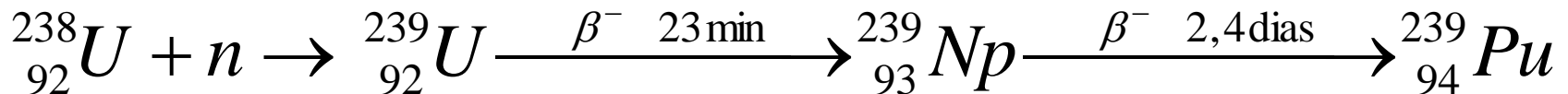
- Termo impróprio: energia vem do núcleo do átomo
- Bomba por fissão principalmente do urânio-235 e plutônio-239
 - $^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{236}\text{U} \rightarrow$ várias formas de fissão
 - $^{239}\text{Pu} + \text{n} \rightarrow ^{240}\text{Pu} \rightarrow$ várias formas de fissão

Bomba atômica: material

- **Enriquecimento do urânio:**

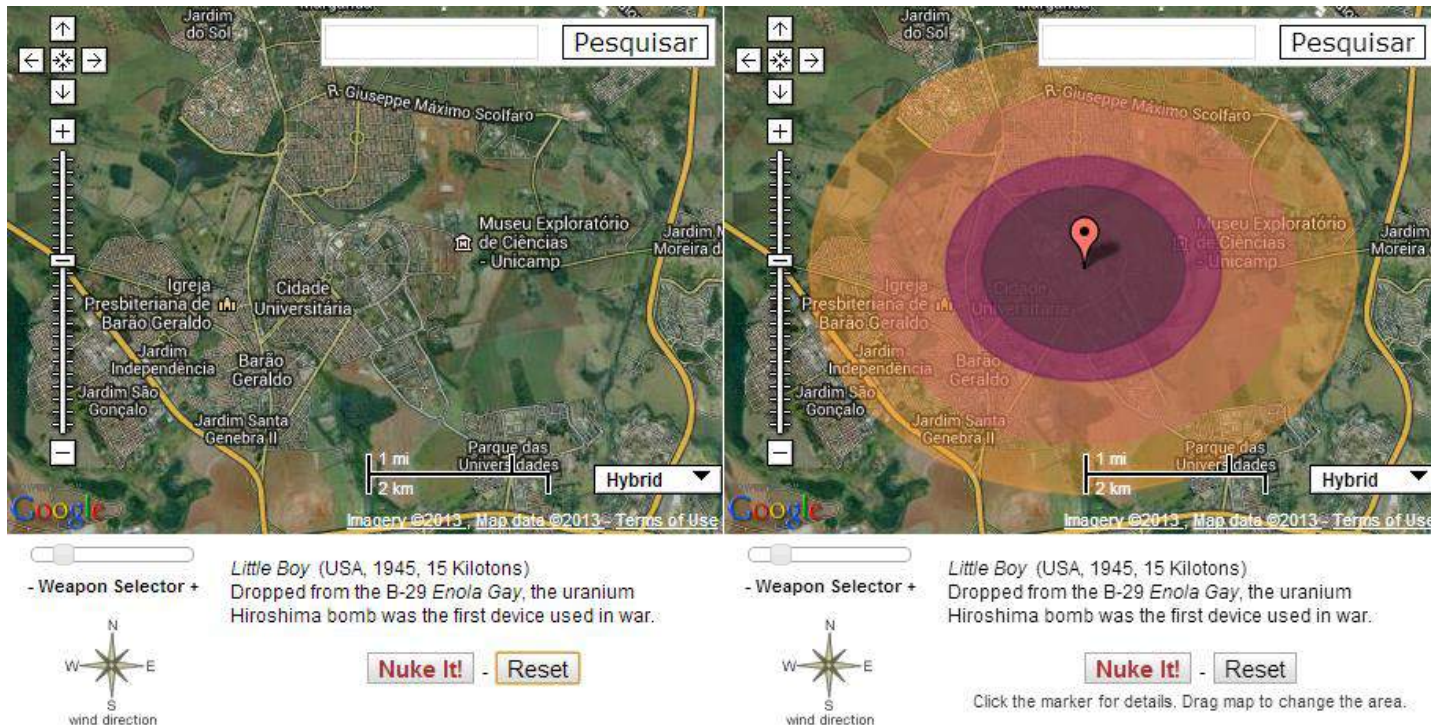
- Urânio natural: ~99,3% ^{238}U e ~0,7% ^{235}U
- Sequência de processos para aumentar a concentração de ^{235}U , pois ^{238}U não pode ser fissionado por nêutrons térmicos.
- Bomba: pelo menos ~85% ^{235}U
- Reator nuclear: ~3% de ^{235}U

- **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:

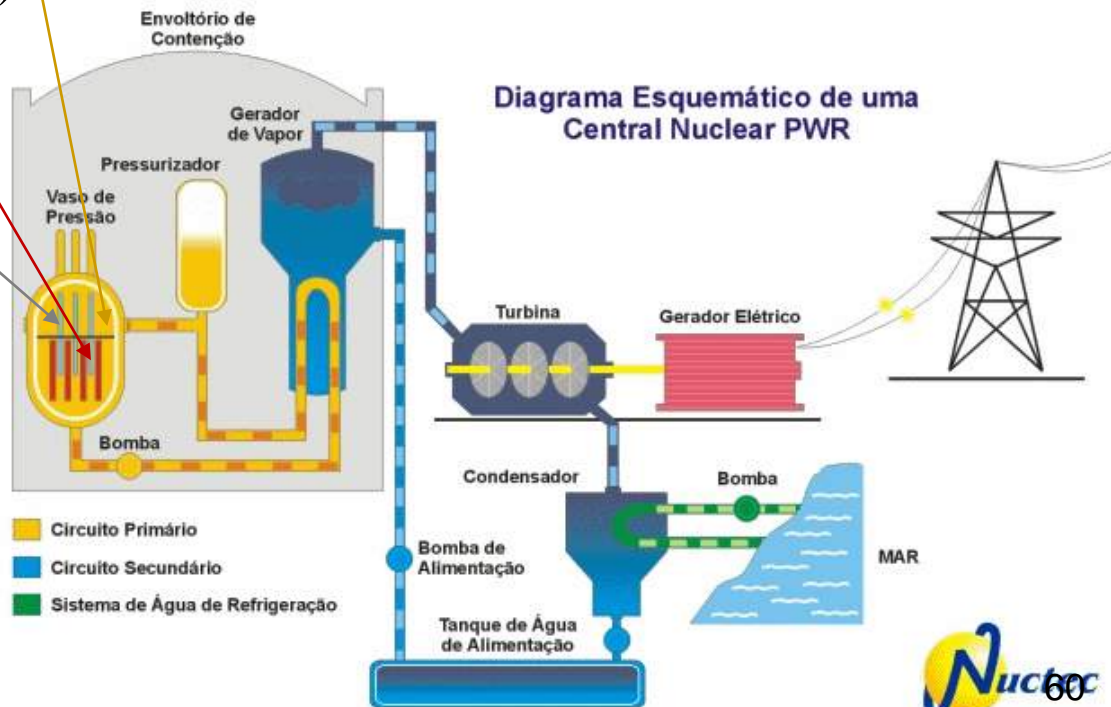


Reator de Fissão Nuclear

Reação em cadeia controlada

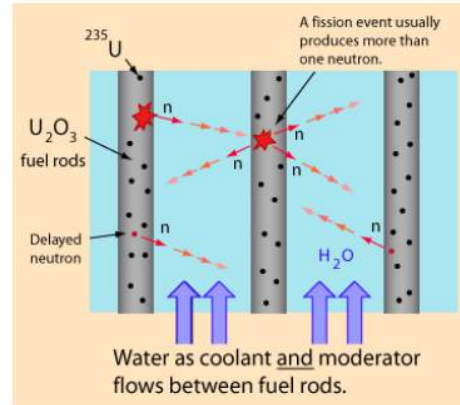
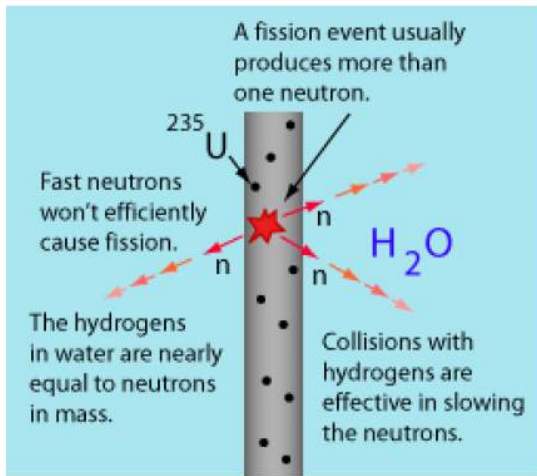


- **Moderador**: freia nêutrons produzidas na fissão sem absorvê-los, para que induza mais fissões. Normalmente: próton do hidrogênio da água.
- **Combustível em barras** (^{235}U): intercala urânio e moderador
- **Barra de controle**: absorve nêutrons para regular a potência do reator. Ex.: liga de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

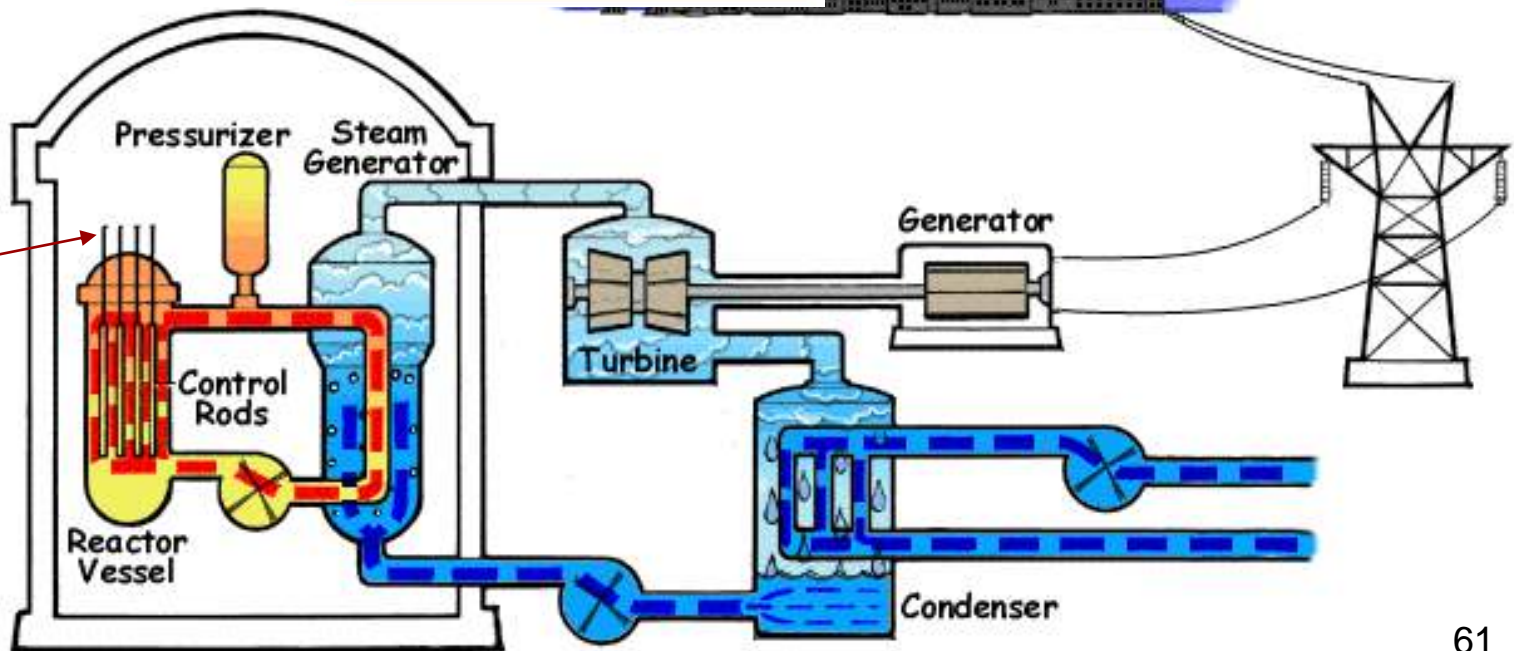


Reator de água pressurizada (PWR)

Reator de Fissão Nuclear



Moderador: H_2O
(ou grafite)



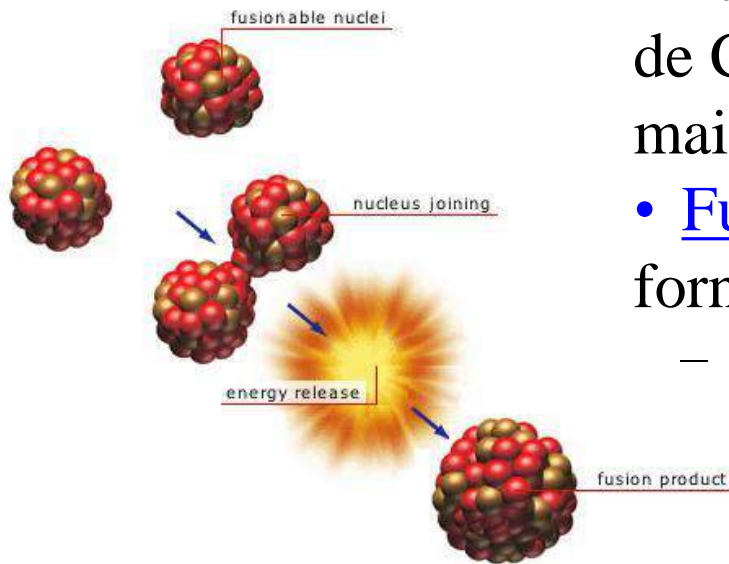
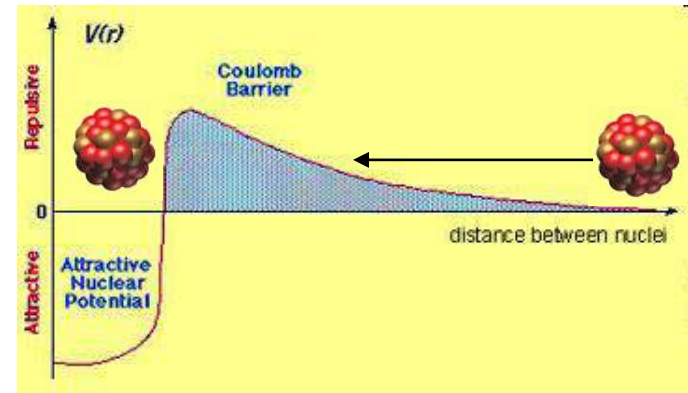
Barras de Combustível (^{235}U) e de Controle (Cd)

Reator de Fissão Nuclear

PROBLEMA: *Os rejeitos radioativos*



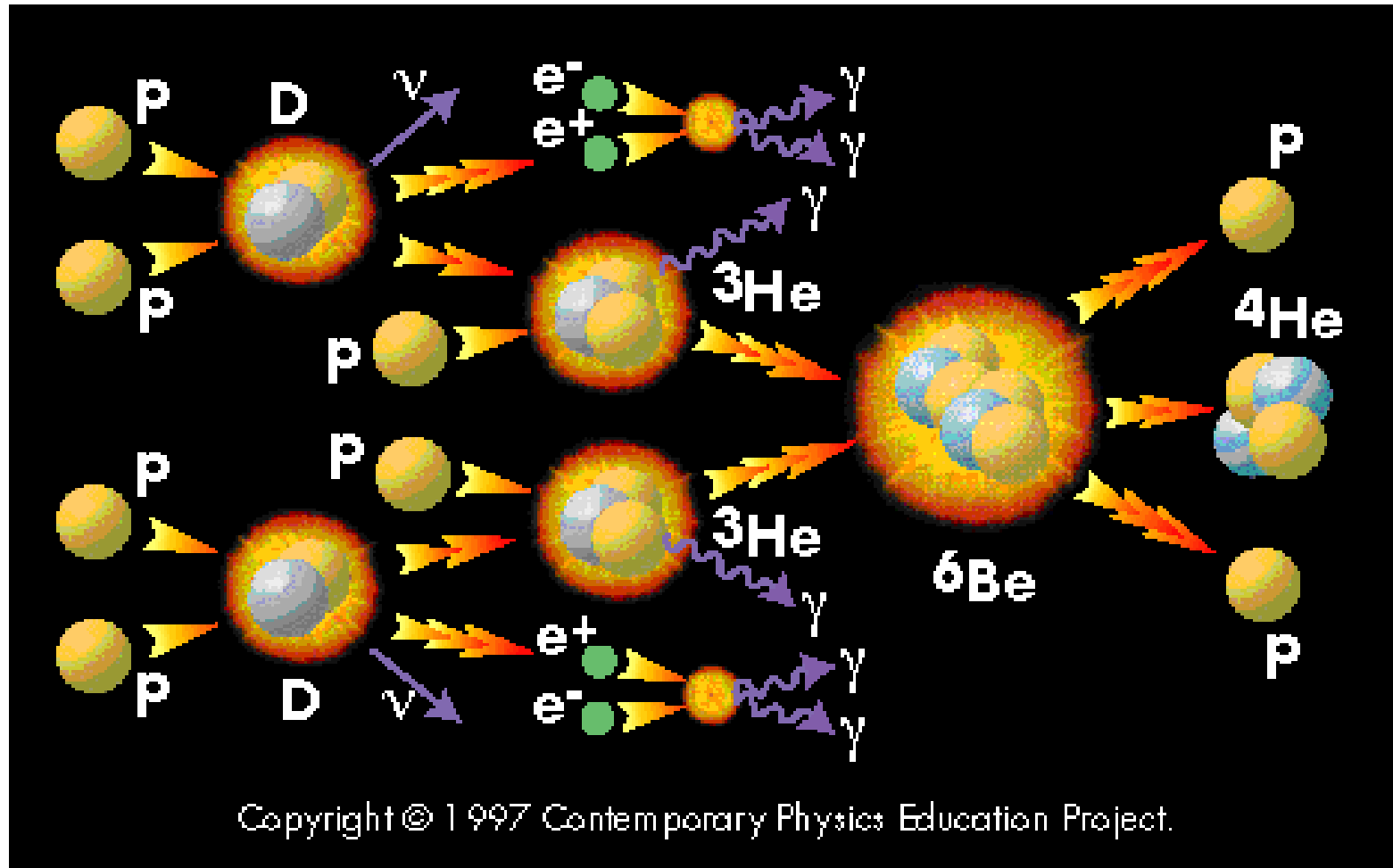
Energia nuclear: FUSÃO



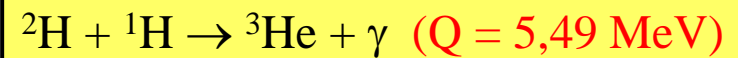
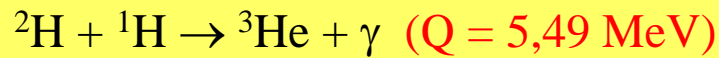
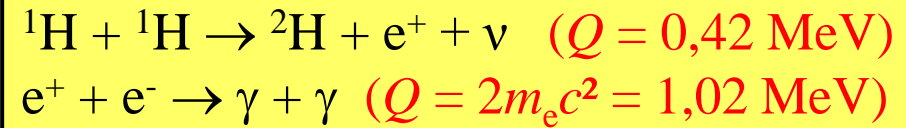
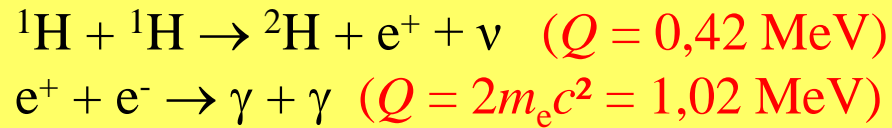
FUSION

- 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

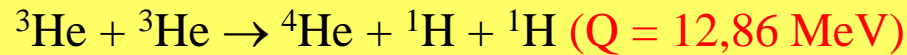
Fusão Termonuclear no Sol (ciclo próton-próton)



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



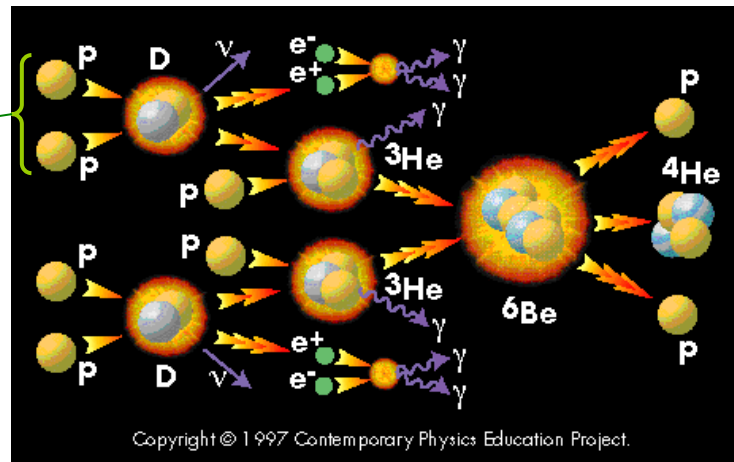
Tempo médio:
 $\sim 10^5$ anos!



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

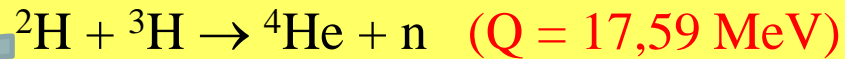
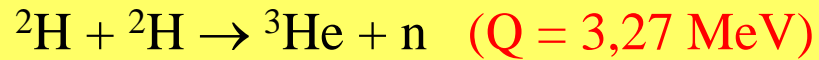


Processo lento:
 1 em 10^{26} colisões
 (restante é só espalhamento)

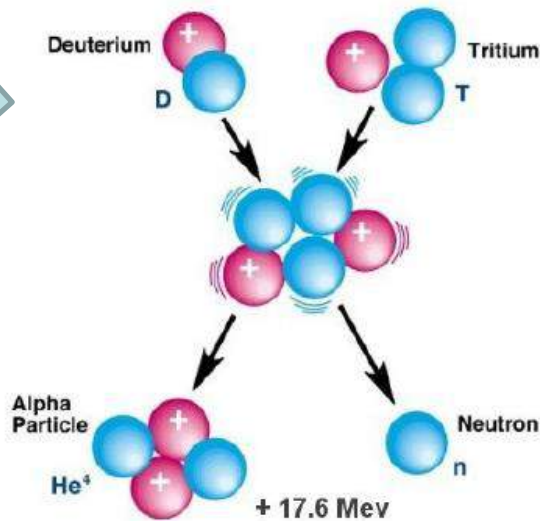


Fusão Nuclear Controlada

Possíveis reações de fusão para produzir energia elétrica na Terra:



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



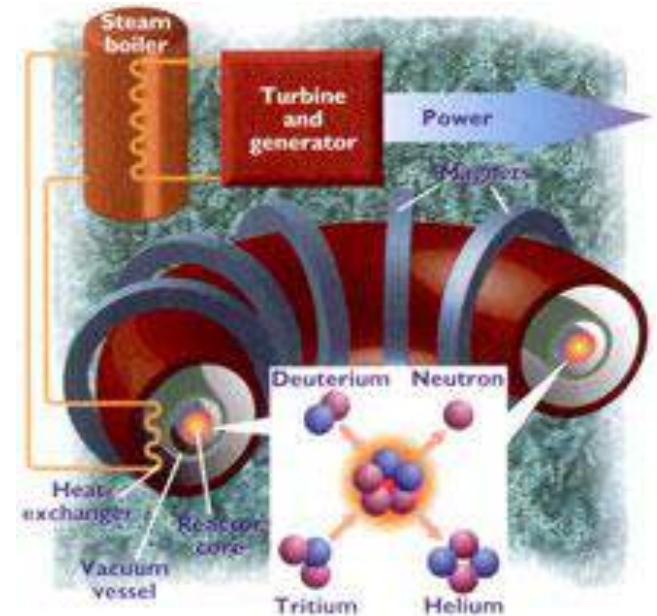
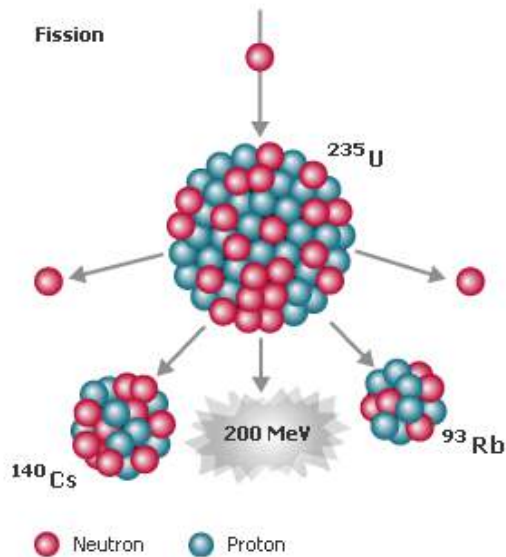
Reator termonuclear precisa de:

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

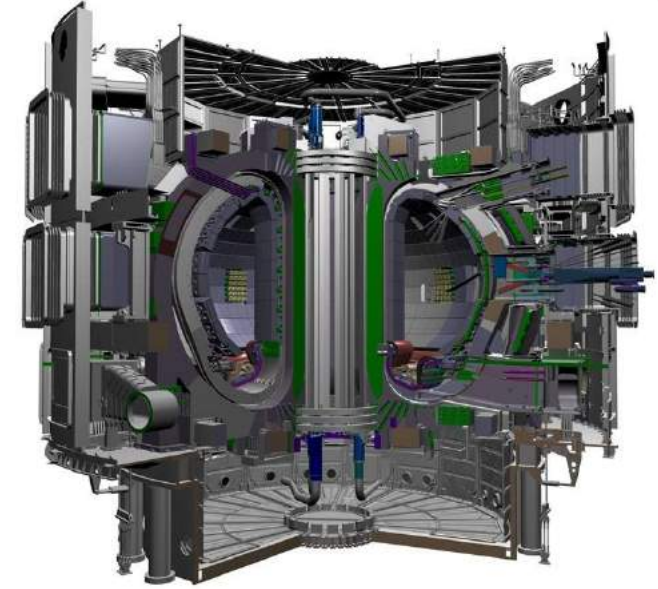
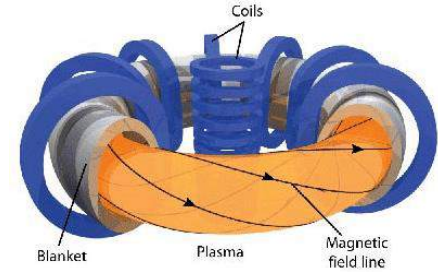
A fissão nuclear já é controlada há muito tempo.

Seria possível controlar a fusão nuclear?



Confinamento do
plasma

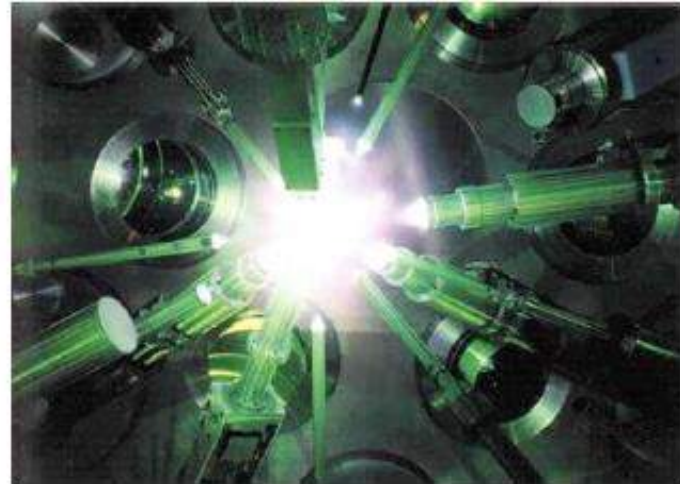
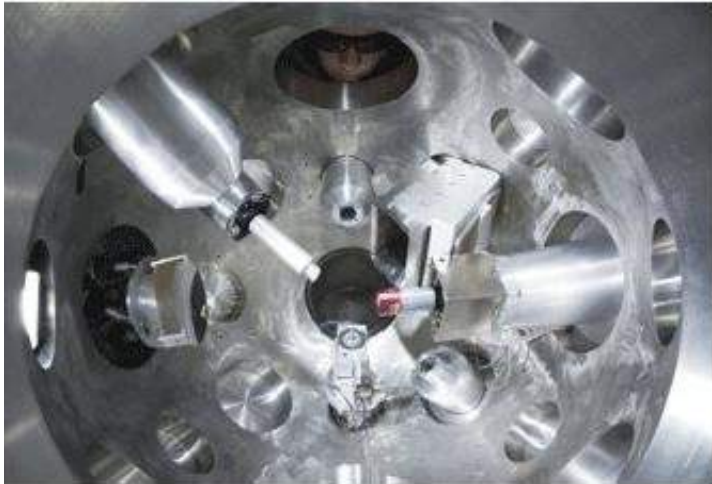
Confinamento magnético: tokamak



- 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.

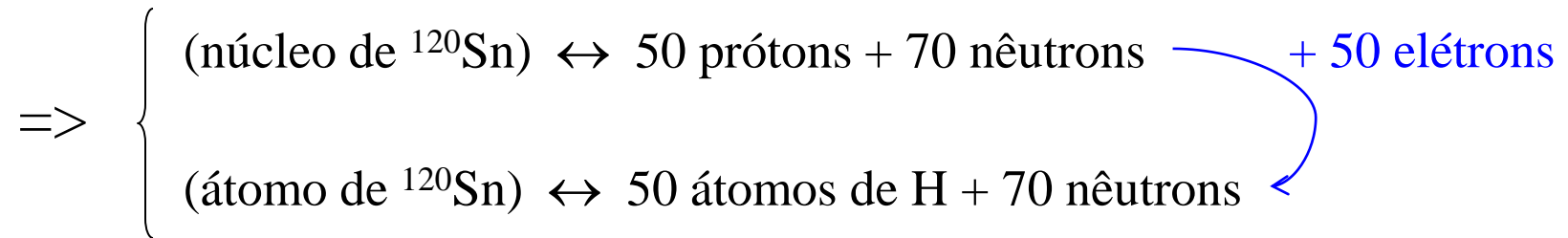
Ex. 1) Qual é a energia de ligação por núcleon do ^{120}Sn ?

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)

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