



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de Lorena – EEL

“PPE6408 – Tópicos Especiais de Física”

Prof. Dr. Durval Rodrigues Junior

Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR)

Escola de Engenharia de Lorena (EEL)

Universidade de São Paulo (USP)

Polo Urbo-Industrial, Gleba AI-6 - Lorena, SP 12600-970

durval@demar.eel.usp.br

www.demar.eel.usp.br/docentes ou www.eel.usp.br (Página dos professores)

Área I
Rodovia Itajubá-Lorena, Km 74,5
CEP 12600-970 - Lorena - SP
Tel. (12) 3159-5007/3153-3209

USP Lorena
www.eel.usp.br

Área II
Polo Urbo-Industrial Gleba AI-6
CEP 12600-970 - Lorena - SP
Tel. (12) 3159-9900

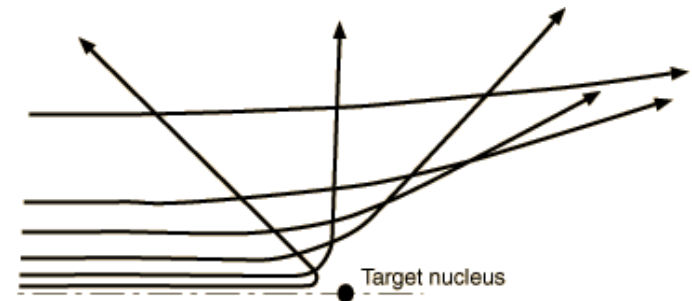
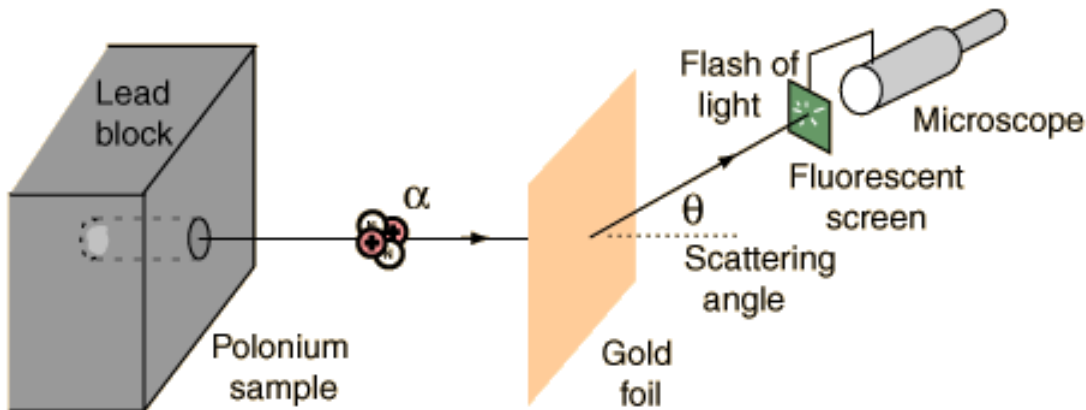
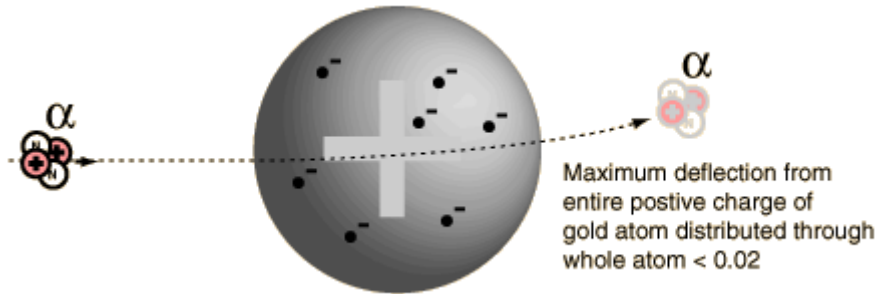
UNIDADE 11 -

Física Nuclear

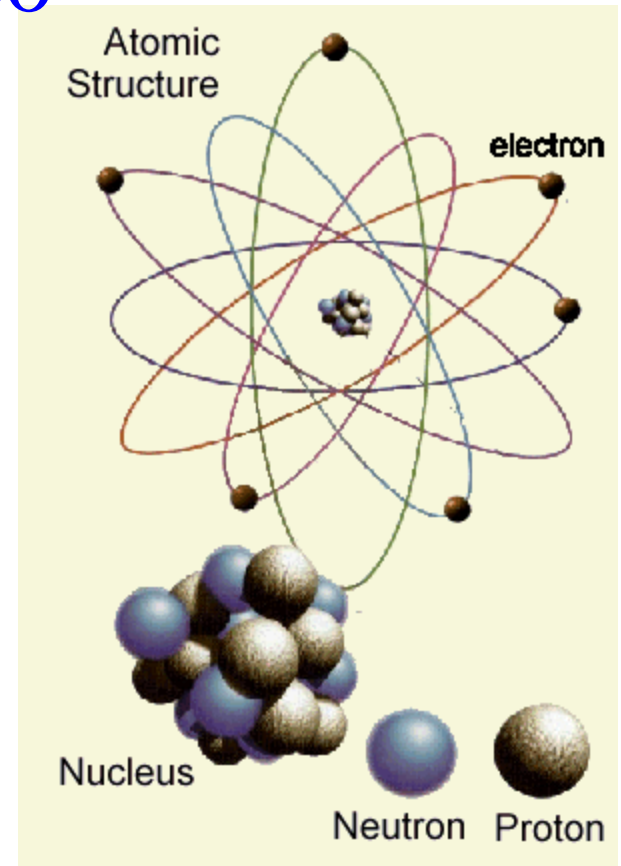
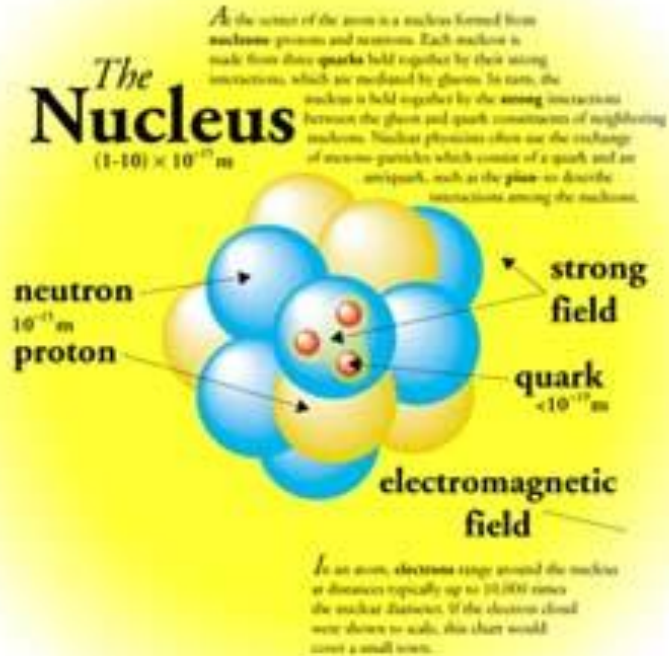
A descoberta do núcleo atômico

Modelo de Thomson (1910)

Modelo de Thomson: previa deflexão pequena das partículas α



A descoberta do núcleo atômico



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**.

Algumas propriedades dos núcleos:

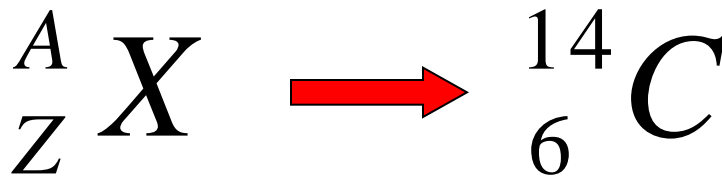
Número Atômico (Z) – número de prótons do núcleo.

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

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

$$A = Z + N$$

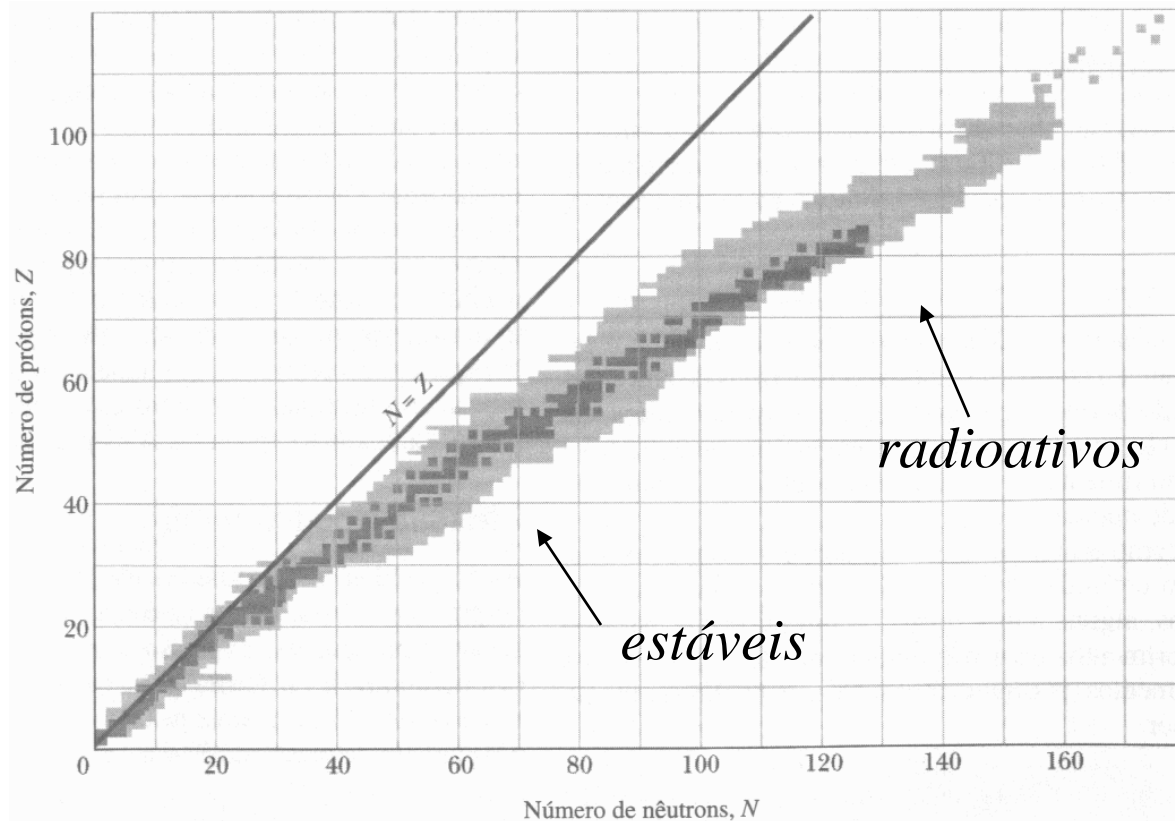
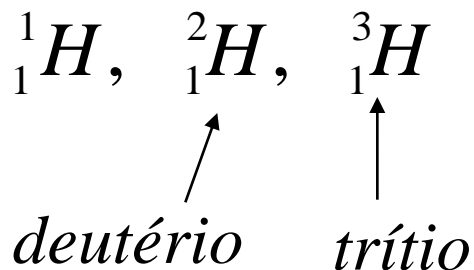
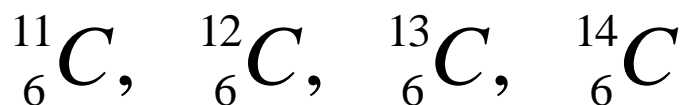
Símbolo:



Nomenclatura:

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

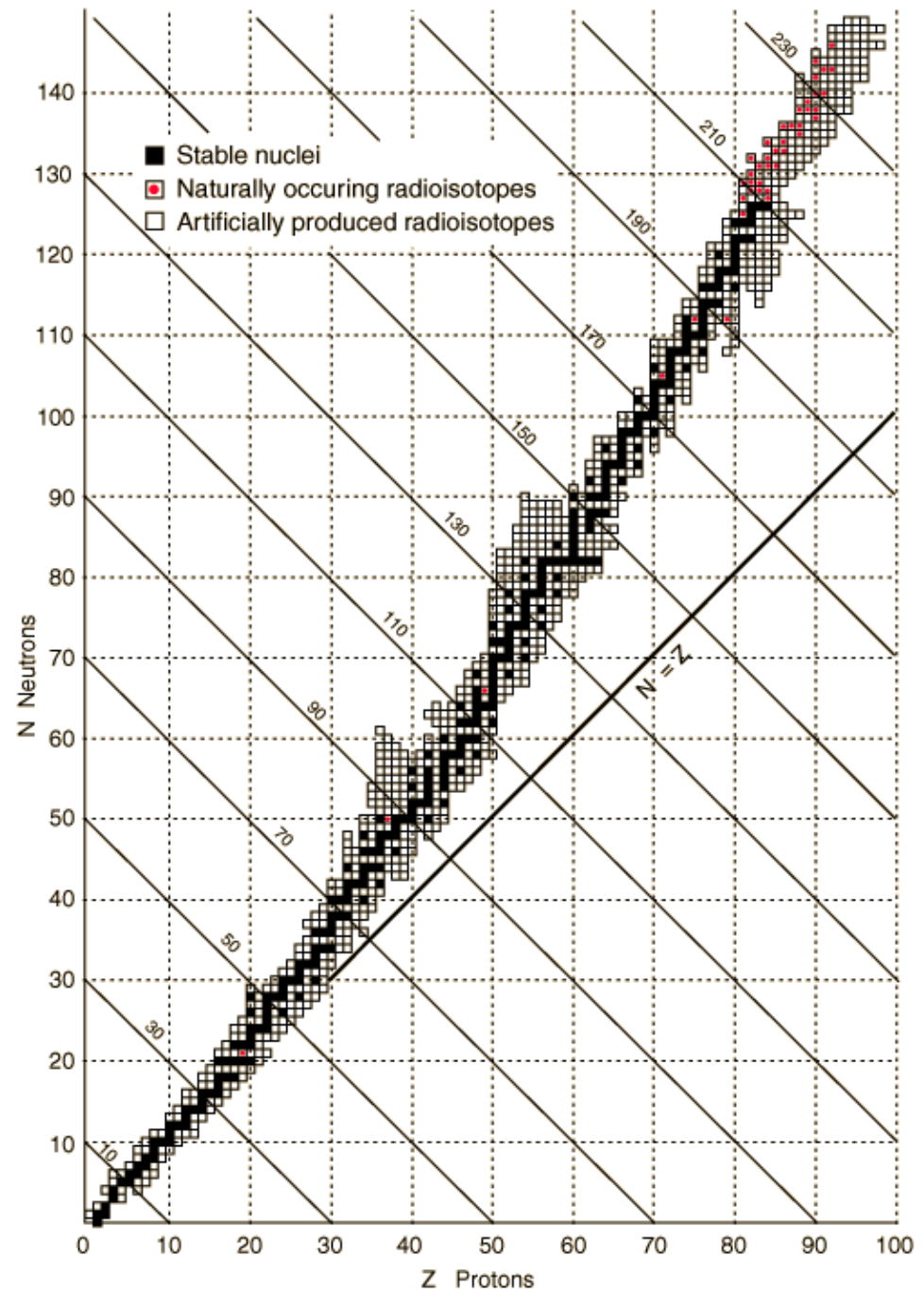
Exemplos:



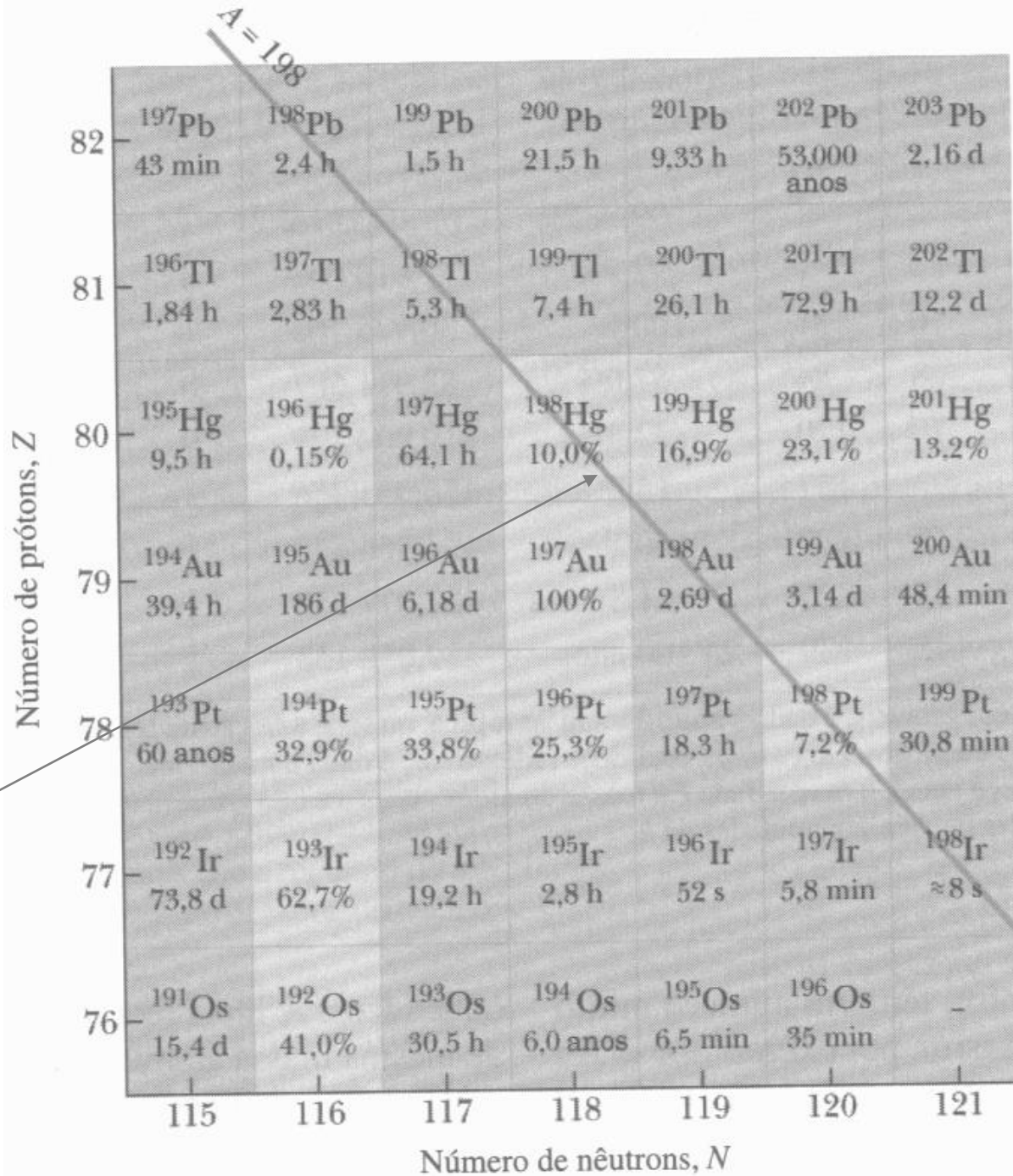
Carta de Nuclídeos

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 definirmos os *nuclídeos*.



Vista ampliada da
carta de **nuclídeos**:



Raio do núcleo

A unidade apropriada é o *fermi* :

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

O raio do núcleo pode ser estimado por:

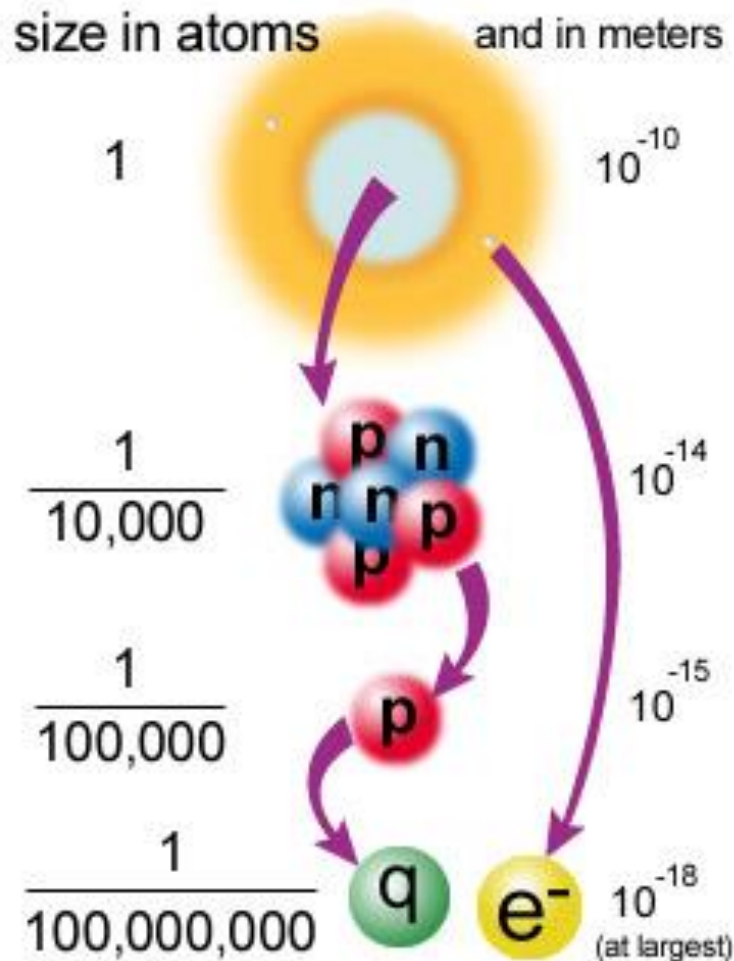
$$r = r_0 A^{1/3}$$

Onde A é o número de massa e $r_0 \approx 1,2 \text{ fm} \approx 1,2 \times 10^{-15} \text{ m}$

Compare:

$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ou $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$
usado em matéria condensada

As escalas dos átomos e núcleos



Carga e massa dos núcleos

- A unidade de massa atômica, u , é definida de modo que a massa atômica do isótopo ^{12}C seja exatamente $12u$. Assim, temos:

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

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

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	938,28
Nêutron	$1,6750 \times 10^{-27}$	1,008 665	939,57
Elétron	$9,109 \times 10^{-31}$	$5,486 \times 10^{-4}$	0,511

Estabilidade nuclear

- Os núcleos são estáveis devido à existência da *força nuclear*. Trata-se de uma *força atrativa intensa* (muito superior à força Coulombiana) *de curto alcance* (da ordem de **2 fm**), que age sobre todas as partículas nucleares.
- 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**.

Matéria Nuclear

Nuclídeos são formados por prótons e nêutrons.

Qual a densidade da matéria nuclear?

$$\rho = \frac{Am}{(4/3)\pi r^3} \quad \text{Substituindo } r \text{ por } r = r_0 A^{1/3} \text{ tem-se ...}$$

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

O resultado vale para qualquer núcleo.

Isto é $2,3 \times 10^{14}$ maior que a densidade da água!!!

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

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

Quantidade de energia que deve ser fornecida ao sistema (núcleo) para separá-lo em todas as suas partículas constituintes, que apresentem massas de repouso isoladas de valor m_i .

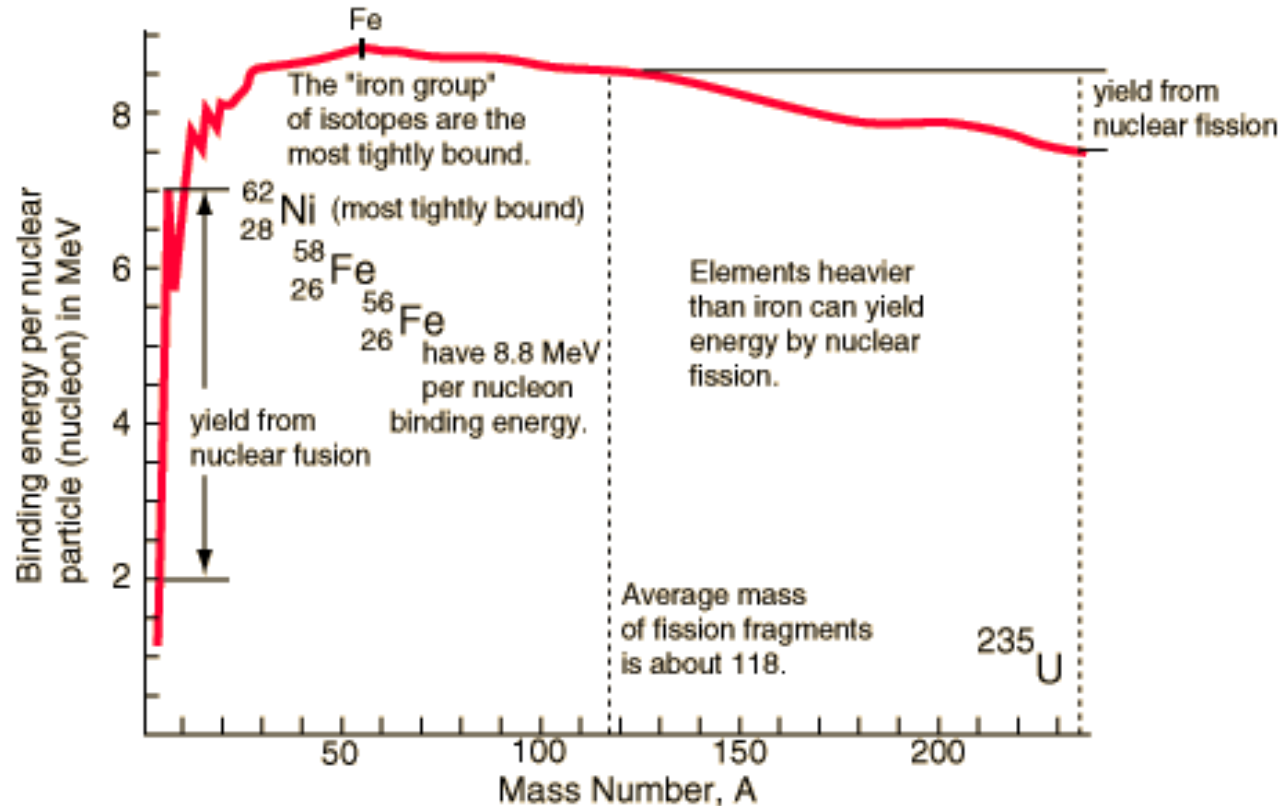
- Assim, a *Energia de Ligação* é uma medida da *estabilidade do núcleo*.

Energia de ligação dos núcleos

- Uma medida ainda melhor é a energia de ligação por núcleon (próton ou nêutron):

$$\Delta E_{eln} = \frac{\Delta E_{el}}{A}$$

Esta é a energia média necessária para arrancar um núcleon do núcleo.



Ex.: Energia de ligação do ^{120}Sn

O ^{120}Sn tem $Z = 50$ e $N = 70$

ou $\left\{ \begin{array}{l} \text{(núcleo de } ^{120}\text{Sn)} \leftrightarrow 50 \text{ prótons} + 70 \text{ nêutrons} \\ \text{(átomo de } ^{120}\text{Sn)} \leftrightarrow 50 \text{ átomos de H} + 70 \text{ nêutrons} \end{array} \right.$

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

$$\Delta E_{el} = (50 m_H c^2 + 70 m_n c^2) - M_{\text{Sn}} c^2$$

$$\Delta E_{el} = [50 \times (1,0078252) + 70 \times (1,008644) - 119,902] c^2$$

$$\Delta E_{el} = 1,095553 c^2 = 1020,5 \text{ MeV}$$

$$\Delta E_{eln} \cong 8,50 \text{ MeV/núcleon}$$

Q de uma reação nuclear

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

$$\Delta E_{el} = -Q$$

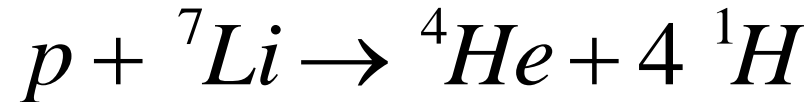
ou

$$Q = -\Delta m c^2 = (m_i - m_f) c^2$$

que pode ser **endotérmica** ($Q < 0$) ou **exotérmica** ($Q > 0$).

Prob.1:

Determine a energia Q da reação:



e verifique se a reação é endotérmica ou exotérmica.

A massa atômica do ${}^7\text{Li}$ é 7,016004 u, a do ${}^4\text{He}$ é 4,002603u, a do ${}^1\text{H}$ é 1,007825u e a do próton é 1,007276 u .

$$Q = m_i c^2 - m_f c^2$$

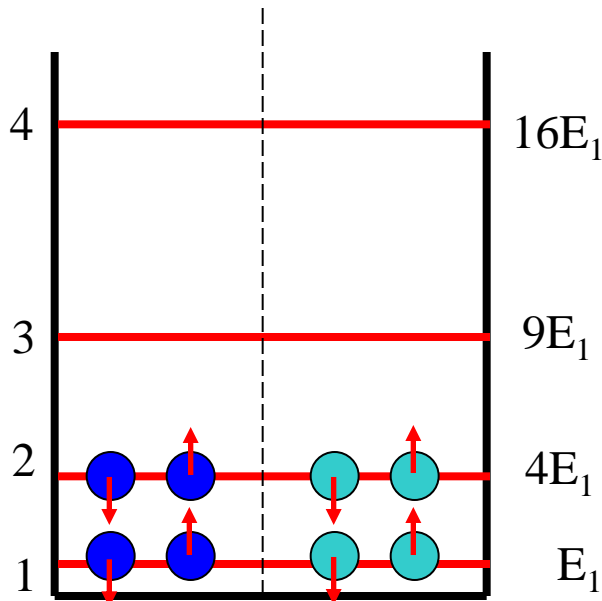
$$c^2 \approx 931,494 \text{ MeV/u}$$

$$Q = [(7,016004 + 1,007276) - (4,002603 + 4 \times 1,007825)] c^2$$

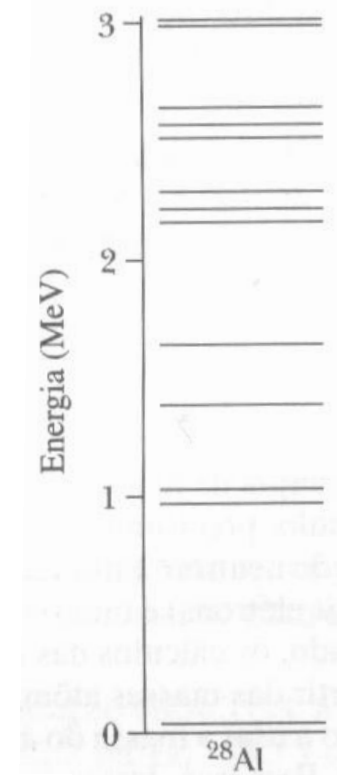
$$Q \approx -9,90 \text{ MeV} \quad (\text{endotérmica})$$

Níveis de energia dos núcleos

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



Quatro nêutrons e quatro prótons numa caixa unidimensional



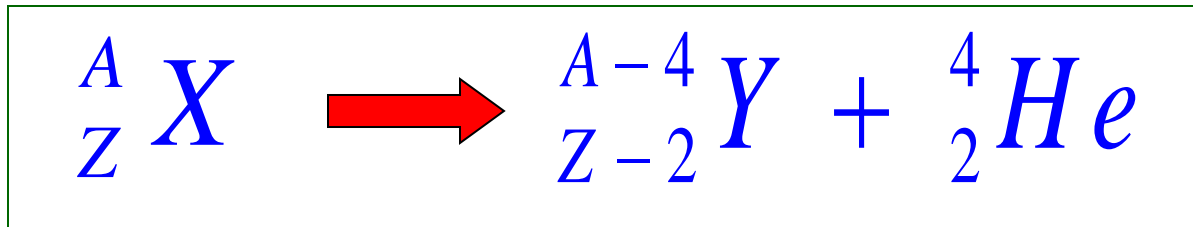
Níveis de energia do nuclídeo ^{28}Al

Processos de decaimento radioativo

- Os núcleos radioativos desintegram-se espontaneamente pelos decaimentos *alfa* e *beta*.

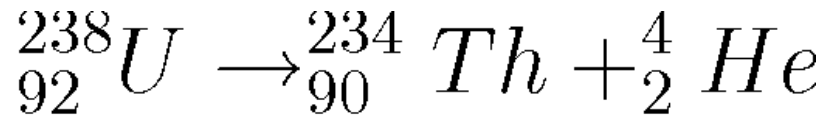
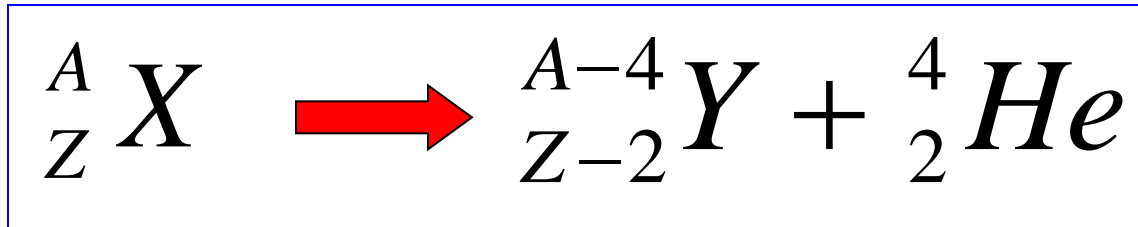
a) O decaimento alfa :

No decaimento alfa o núcleo X , emite uma partícula alfa (núcleo de ${}^4\text{He}$, dois prótons e dois nêutrons) transformando-se no núcleo Y :



Processos de decaimento radioativo

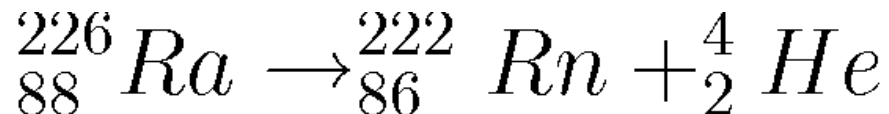
Exemplos:



$Q = 4,25 \text{ MeV}$ (exotérmica)

$T_{1/2} = 4,47 \times 10^9$ anos

(idade da Terra)



$Q = 4,87 \text{ MeV}$ (exotérmica)

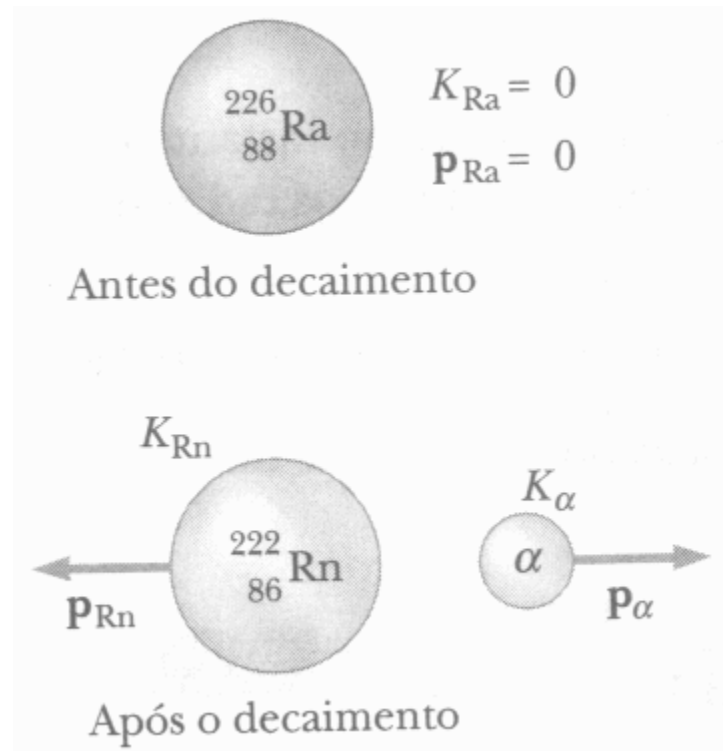
A quantidade Q é a energia de desintegração do processo, isto é, a quantidade de energia liberada durante o decaimento.

Processos de decaimento radioativo

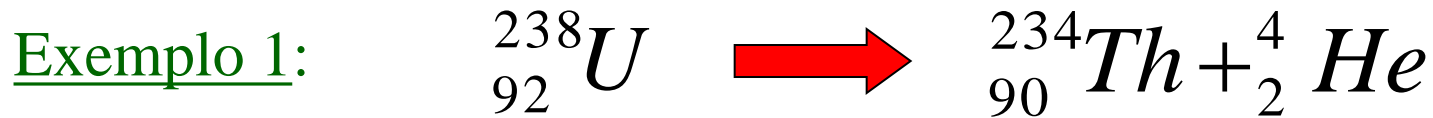
- O **decaimento alfa** pode ocorrer espontaneamente porque o “núcleo pai”, **X**, apresenta uma energia de repouso (massa) maior que a soma das energias de repouso (massas) do “núcleo filho”, **Y**, e da partícula **α** . A energia de desintegração **Q** é dada por:

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

Esta energia corresponde à **diminuição da energia de ligação** do sistema e aparece como **energia cinética** do “núcleo filho” e da partícula **α** . A **partícula α** , por ser mais leve, carregará quase toda a energia cinética.



Processos de decaimento radioativo



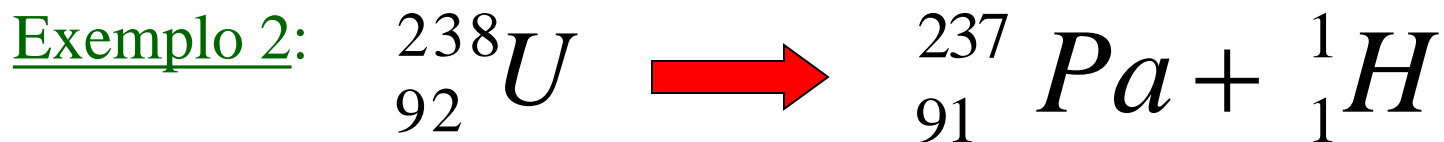
A carga e o número de núcleons se conserva.

A energia liberada na desintegração é

$$Q = M_i c^2 - M_f c^2$$

$$c^2 \approx 931,494 \text{ MeV/u}$$

$$Q = [238,05079 - (234,04363 + 4,00260)] c^2 \longrightarrow Q \approx 4,25 \text{ MeV} \text{ (exotérmica)}$$

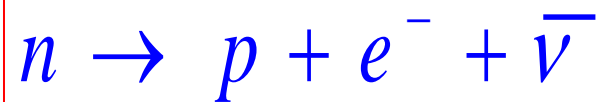


$$Q = [238,050 - (237,0512 + 1,007)] c^2 \longrightarrow Q \approx -7,64 \text{ MeV} \text{ (proibida ou endotérmica)}$$

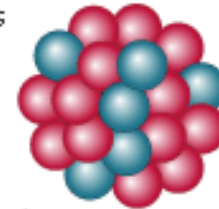
Processos de decaimento radioativo

b) O decaimento beta

- O decaimento beta ocorre em núcleos que têm excesso, ou falta, de nêutrons para adquirir estabilidade.
- No decaimento *beta menos* um dos **nêutrons** no interior do núcleo emite um **elétron e um anti-neutrino ($\bar{\nu}$)**, transformando-se em um **próton**:



Nucleus



Neutron



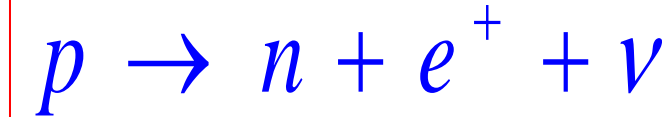
Proton



Beta particle,

Processos de decaimento radioativo

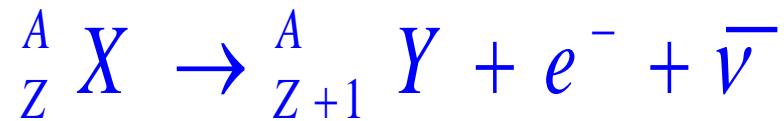
No decaimento *beta mais* um dos **prótons** no interior do núcleo emite um **pósitron** (anti-elétron, e^+) e um **neutrino** (ν), transformando-se em um **nêutron**:



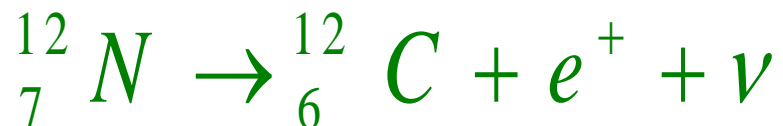
- O neutrino (**pequeno nêutron**) foi postulado para dar conta da conservação do **momento angular** e **linear** nas reações acima.
 - O neutrino, ν , apresenta carga nula e massa, possivelmente, também nula (menor que $7 \text{ eV}/c^2$).
- Além disso apresentam uma interação muito fraca com a matéria (um **livre caminho médio** que pode atingir **milhares de anos luz**). Foram detectados pela primeira vez em 1953, por Reines e Cowan.

Processos de decaimento radioativo

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



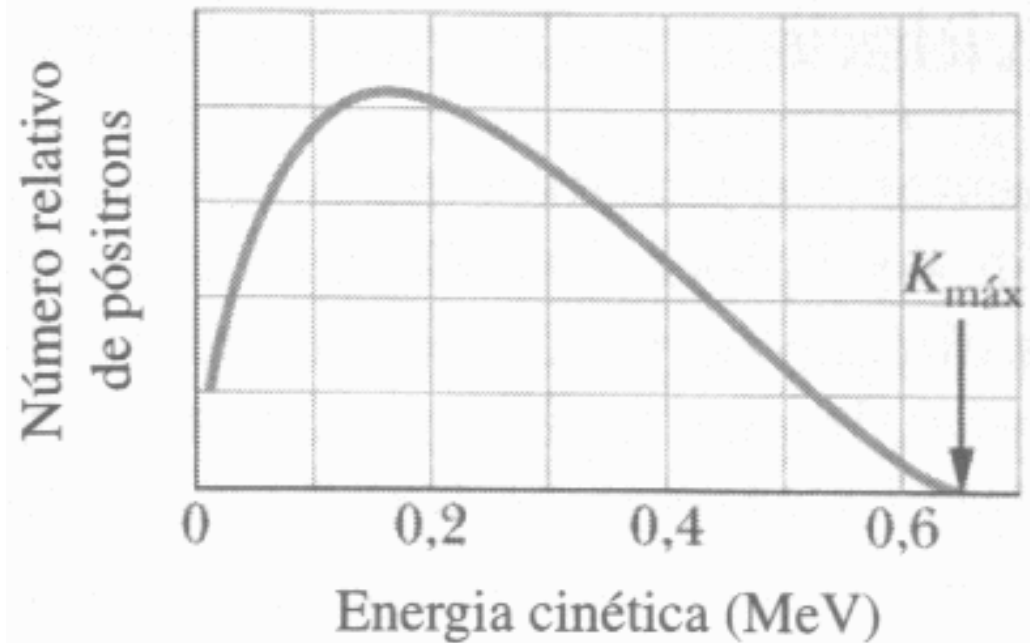
Como exemplos de decaimentos beta temos a decaimento do carbono 14 e do nitrogênio 12:



Processos de decaimento radioativo

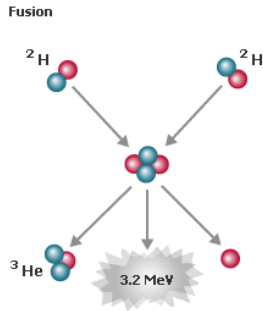
- Enquanto no decaimento α praticamente toda a energia liberada, Q , vai para a partícula α , no decaimento β esta energia pode se distribuir de diferentes formas entre a energia do elétron (pósitron) e do anti-neutrino (neutrino).
- Porém, os pósitrons apresentam uma energia cinética máxima igual a Q , no caso em que os neutrinos saem com energia nula (ver Figura):

$$K_{\max}^{el} = Q$$



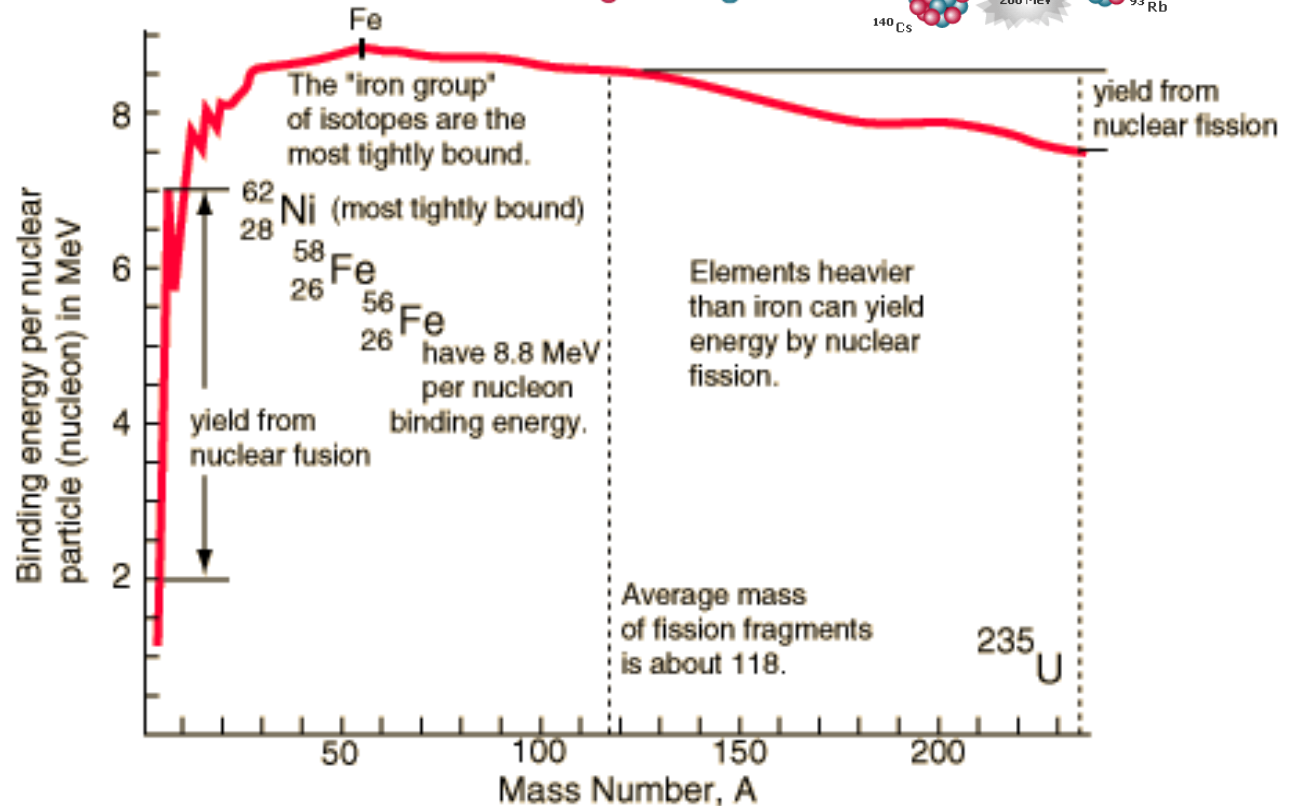
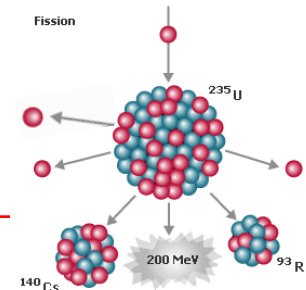
Energia nuclear

- 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

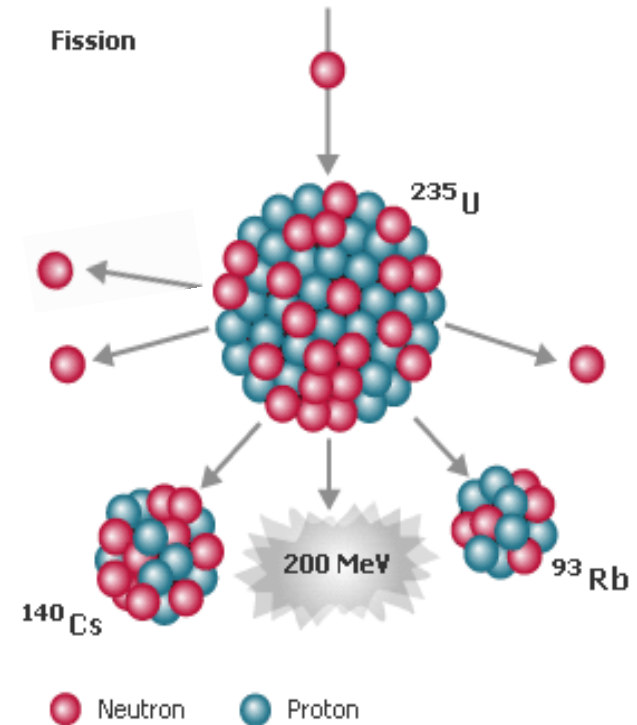
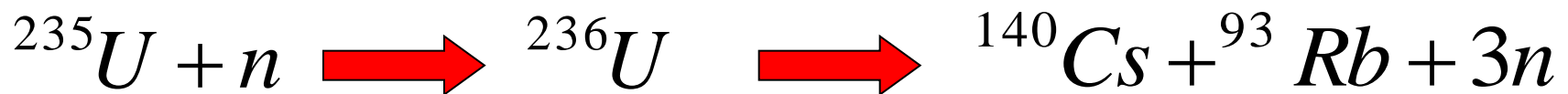


Energia nuclear

Fissão nuclear

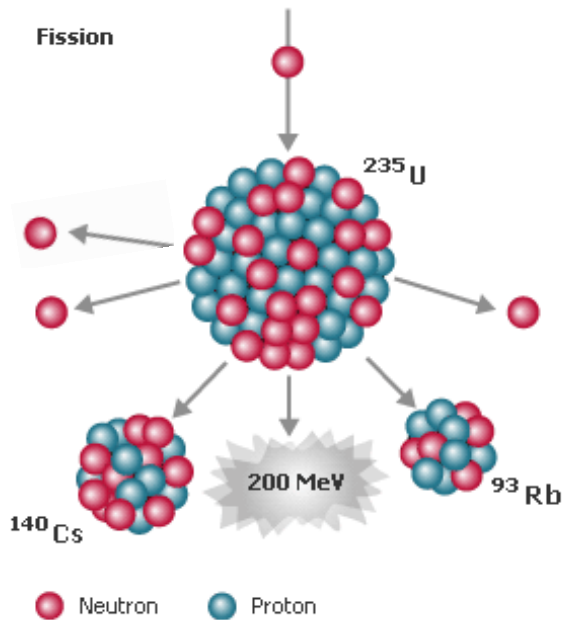
Os primeiros experimentos de fissão nuclear foram feitos por Enrico Fermi em 1935 e por Otto Hahn e Fritz Strassman, em 1939.

As reações típicas são:

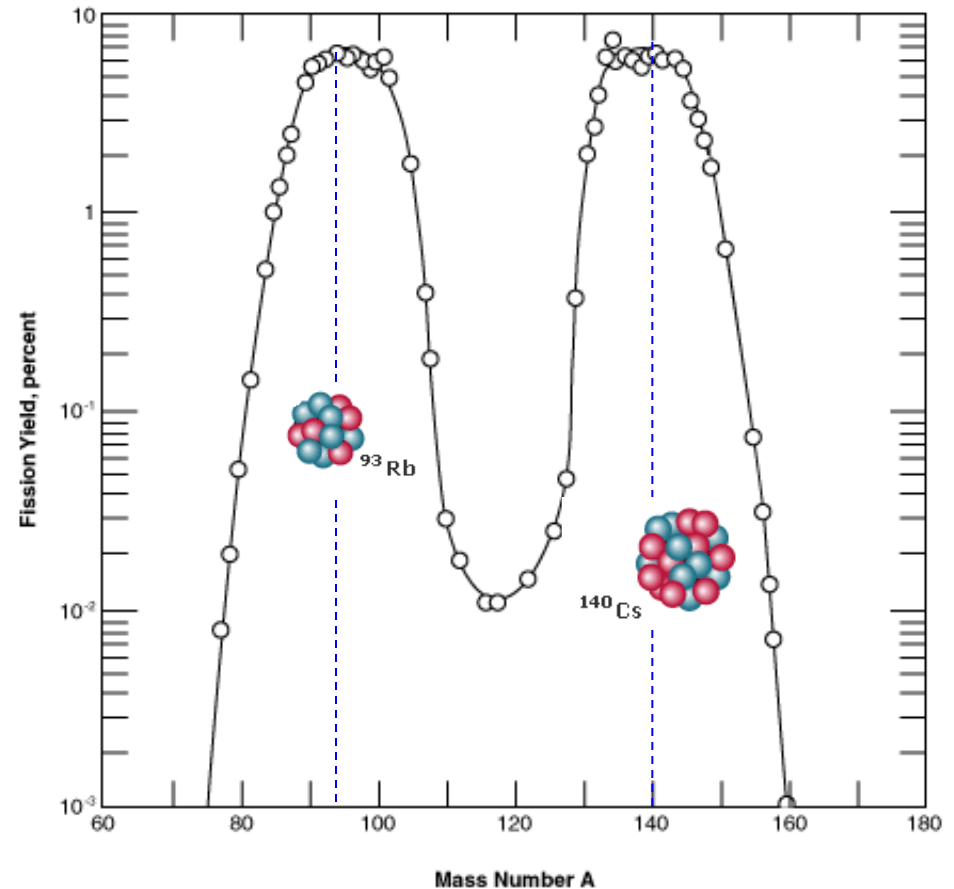


Energia nuclear

Distribuição dos fragmentos de fissão do ^{235}U



Thermal Neutron Fission of U-235



Energia nuclear

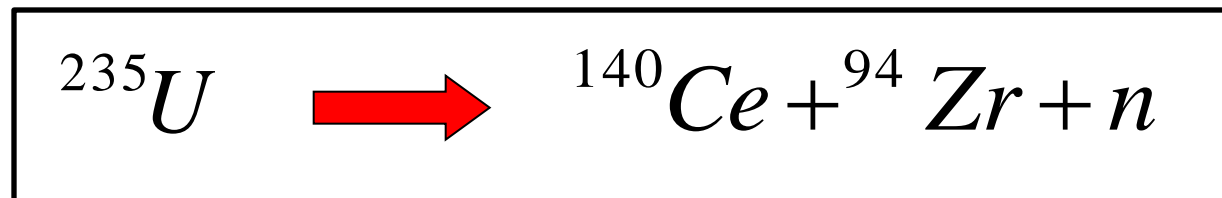
Fissão nuclear



	${}^{140}\text{Xe}$	\rightarrow	${}^{140}\text{Cs}$	\rightarrow	${}^{140}\text{Ba}$	\rightarrow	${}^{140}\text{La}$	\rightarrow	${}^{140}\text{Ce}$
$T_{1/2}$	14 s		64 s		13 dias		40 h		Estável
Z	54		55		56		57		58

	${}^{94}\text{Sr}$	\rightarrow	${}^{94}\text{Y}$	\rightarrow	${}^{94}\text{Zr}$
$T_{1/2}$	75 s		19 min		Estável
Z	38		39		40

Finalmente:



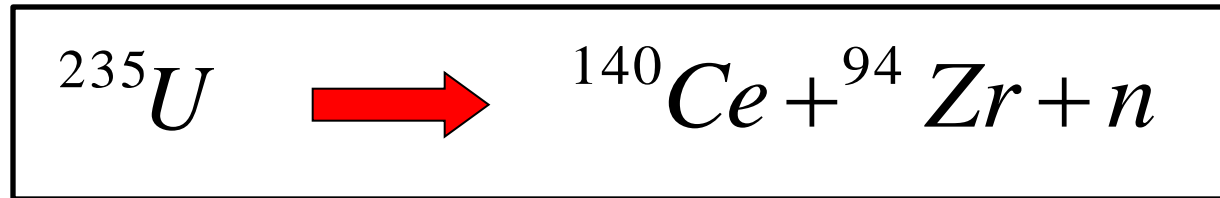
Energia nuclear

Fissão nuclear

Prob. 2:

Determine a energia de desintegração Q para o evento de fissão da equação abaixo, típica para a fissão do ^{235}U , levando em conta o decaimento dos fragmentos da fissão. As massas necessárias para realizar o cálculo são:

^{235}U	235,0439 u
^{140}Ce	139,9054 u
^{94}Zr	93,9063 u
n	1,00866 u

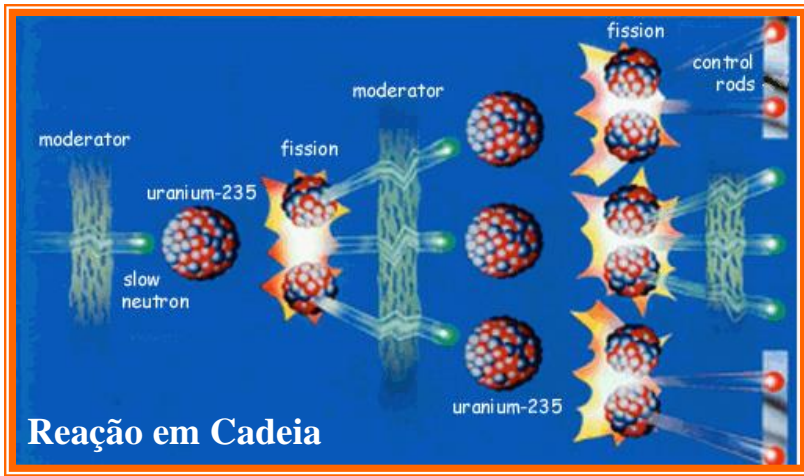


$$Q = - \Delta m \cdot c^2$$

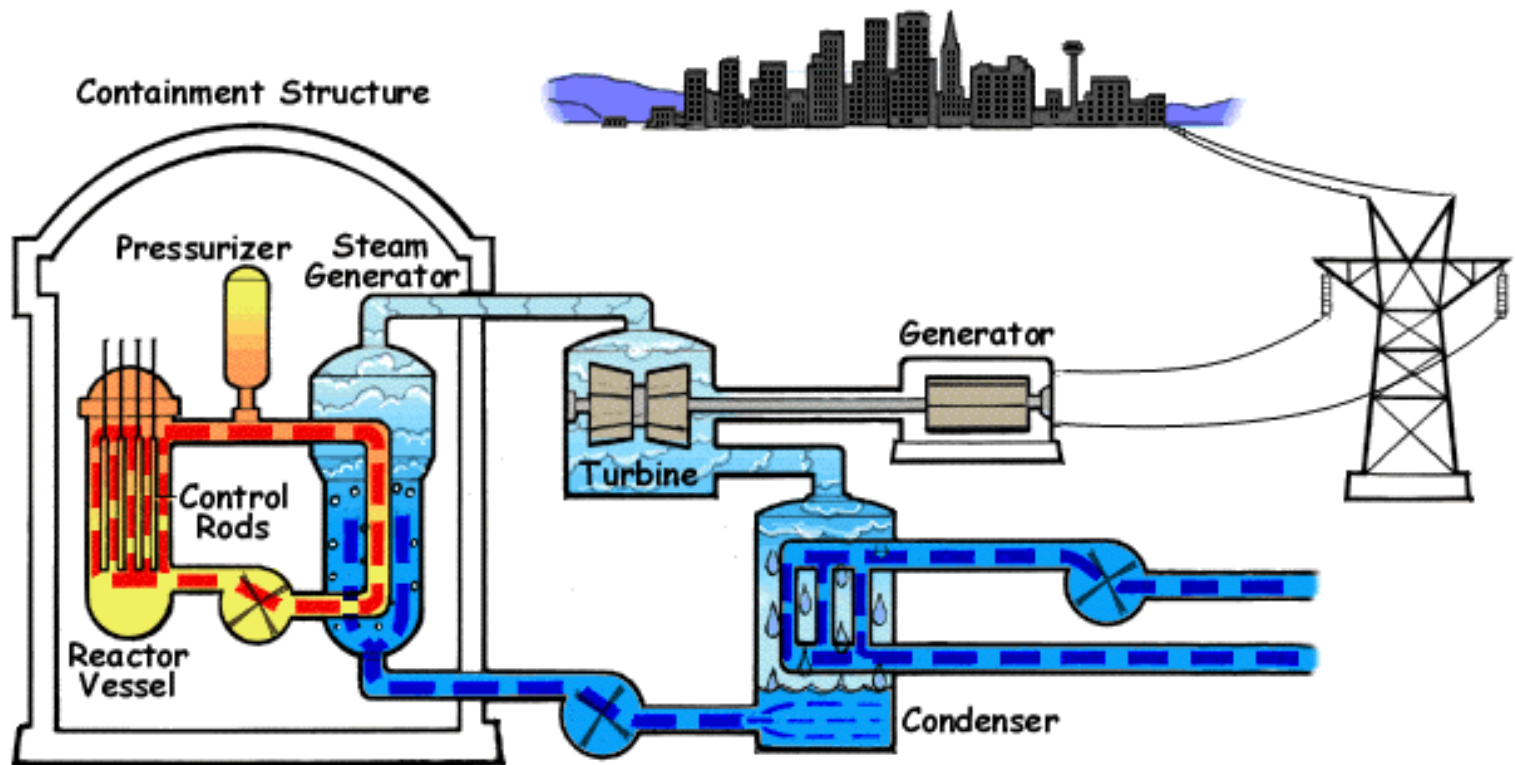
$$\Delta m = (139,9054 \text{ u} + 93,9063 \text{ u} + 1,00866 \text{ u}) - (235,0439 \text{ u}) = -0,22354 \text{ u}$$

$$Q = - \Delta m \cdot c^2 = - (- 0,22354 \text{ u}) \times (931,5 \text{ MeV/u}) = 208 \text{ MeV (por nuclídeo)}$$

Exotérmica!

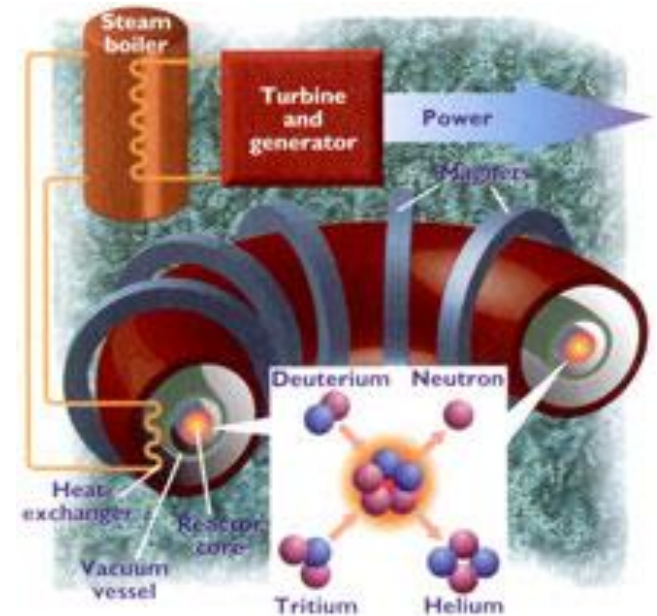
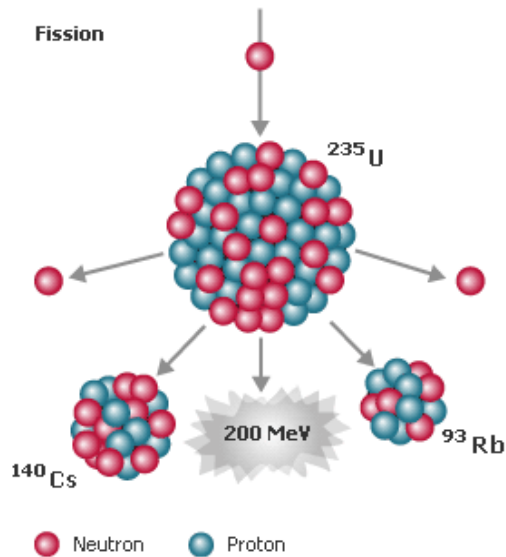


Reator Nuclear

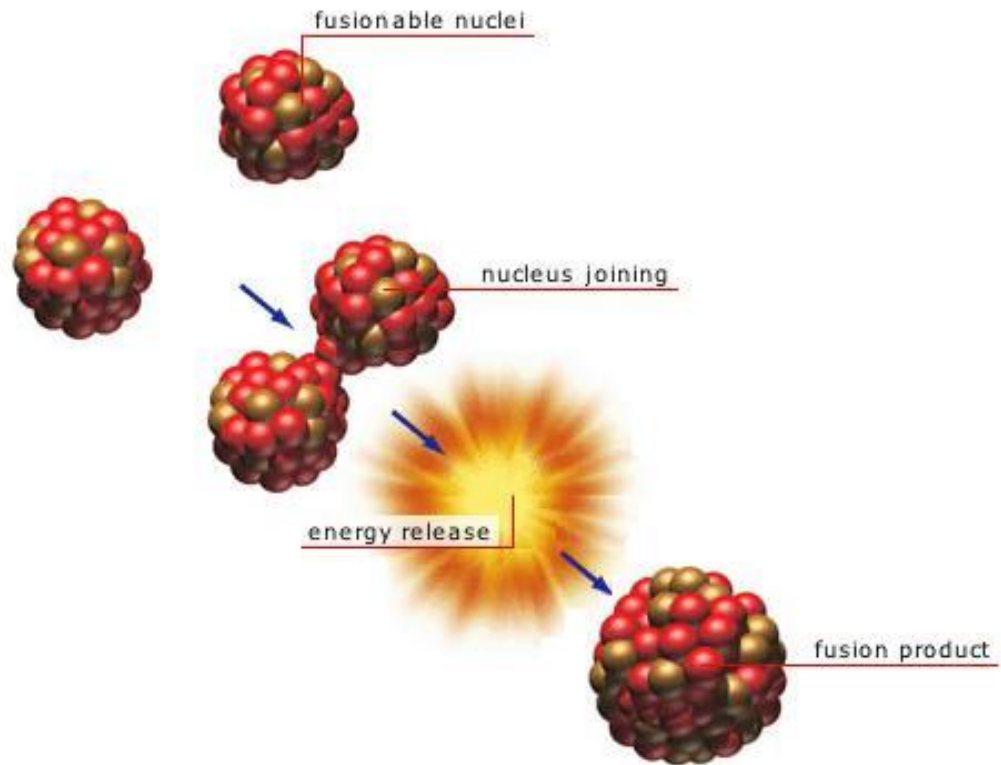


Energia nuclear

- A fissão nuclear já é controlada há muito tempo.
- Seria possível controlar a fusão nuclear?



Confinamento do
plasma



FUSION

Energia nuclear

Fusão termonuclear controlada

As reações utilizadas são deutério-deutério (d-d) e deutério-trítio (d-t):



Energia nuclear

Fusão termonuclear controlada

O deutério, cuja abundância isotópica é uma parte em 6700, está disponível na água do mar em quantidades ilimitadas.

São três **as exigências** para a operação bem-sucedida de um reator de fusão termonuclear:

- 1) Elevada densidade n de partículas
- 2) Elevada temperatura T do plasma
- 3) Um tempo de confinamento τ dilatado

Exemplos: Tokamak, fusão a laser, ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*).

SISTEMAS

SUPERCONDUTORES

PARA TESTES DE

FUSÃO NUCLEAR

FUSÃO NUCLEAR

Condições necessárias:

1) O Plasma de dêuterons e elétrons tem que estar a altas temperaturas para que a barreira coulombiana possa ser penetrada.

Em laboratório, 23×10^7 K (20 keV).
No Sol $1,5 \times 10^7$ K (1,3 keV).

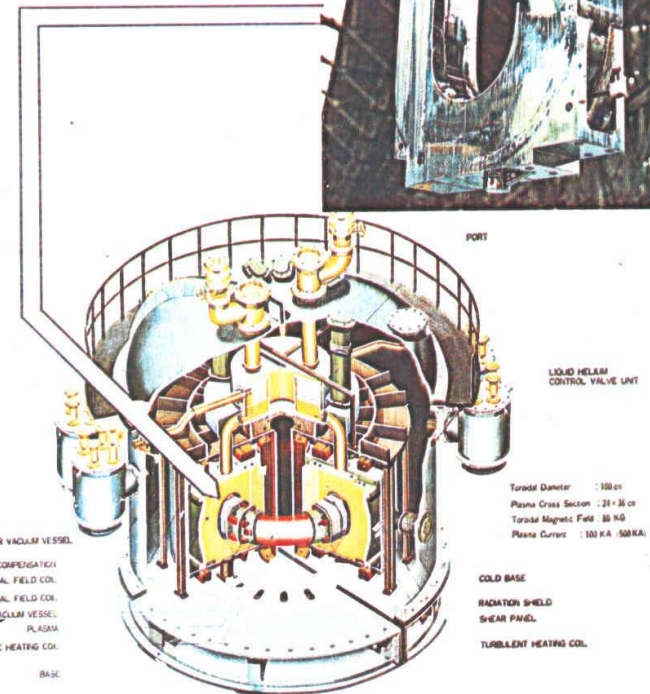
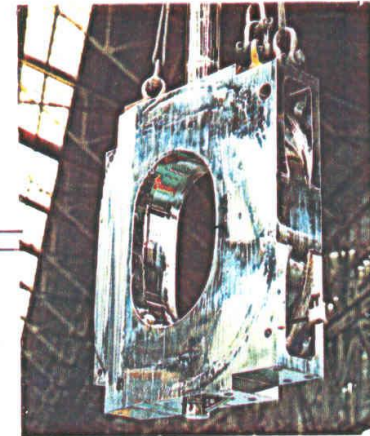
2) Densidade alta de partículas, para que a taxa de colisões d-d seja alta. Na temp. requerida, o deutério estará ionizado.

3) Tempo de confinamento longo. Critério de Lawson: $n\tau > 10^{20}$ s/m³



TRIAM-1M Superconducting Magnet

Tokamak for the Research Institute for Applied Mechanics, TRIAM-1M, is a high field Tokamak built for and under the direction of Kyushu University. The 16 superconducting coils are made of Nb₃Sn stabilized by pure aluminum and oxygen free copper for enhanced cryogenic stability.

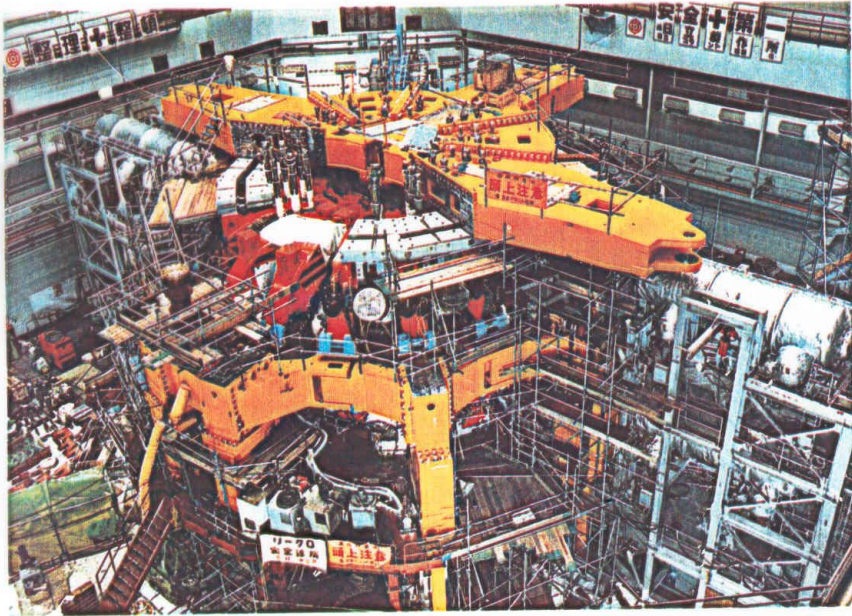


Cutaway View Of High Field Superconducting Tokamak (Triam-1M)

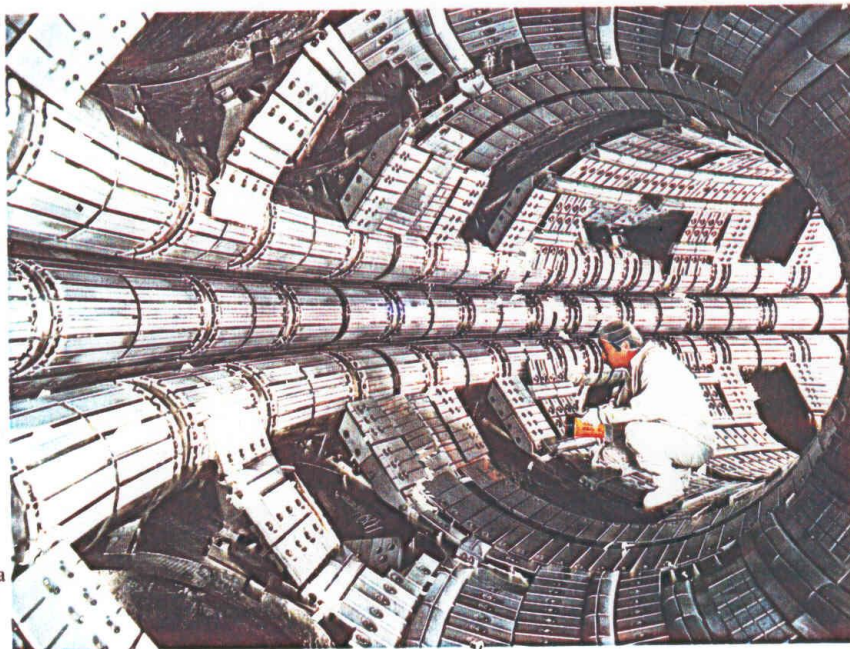
Year completed	1986	Max. field	11 T
Customer	Kyushu University	Ampere turns	33,000 KAT
Application	Nuclear fusion	Total stored energy	75 MJ
Coil configuration	Oval-shaped	Torus radius	800 mm
Superconductor	Nb ₃ Sn	Cooling method	Pool cooling

TOKAMAK JT-60 (HITACHI)

- Raio maior 3 m
- Raio menor 0,95 m
- Campo central 4,5 T
- Corrente plasma 27 mA
- Temperatura dos íons 5-10 keV
- Tempo de confinamento 0,2-1 s

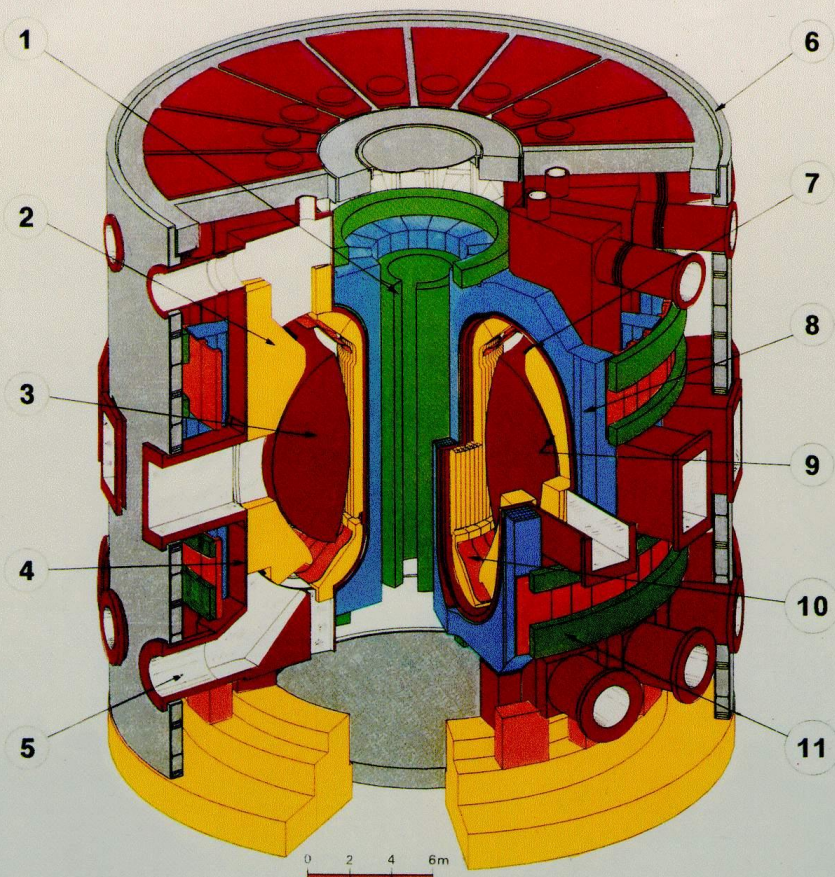


JT-60 Tokamak Machine under Installation



Interior of Vacuum Vessel, where the first wall to plasma made of TiC coated Mo, and the can type magnetic limiter coil are installed.

THE ITER DEVICE



- | | | |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1 - CENTRAL SOLENOID | 5 - PLASMA EXHAUST | 9 - FIRST WALL |
| 2 - SHIELD/BLANKET | 6 - CRYOSTAT | 10 - DIVERTOR PLATES |
| 3 - PLASMA | 7 - ACTIVE CONTROL COILS | 11 - POLOIDAL FIELD COILS |
| 4 - VACUUM VESSEL-SHIELD | 8 - TOROIDAL FIELD COILS | |

Características dos supercondutores de Nb₃Sn para o Projeto ITER.

Tipo	Jc não-Cu a 4,2 K e 12 T (A/mm ²)	Perda por Histerese para ciclo ±3 T (mJ/cm ³ não-Cu)	Quantidade (toneladas de fio)
High Performance 1 (HP1)	700	600	6,5
High Performance 2 (HP2)	550	200	16,5

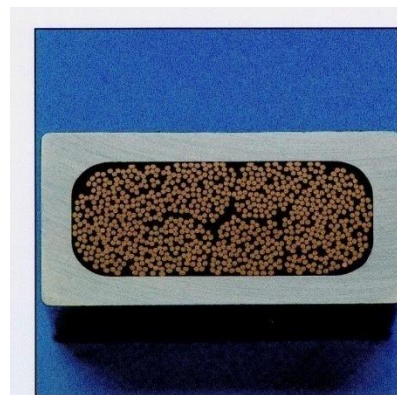


Fig. 1

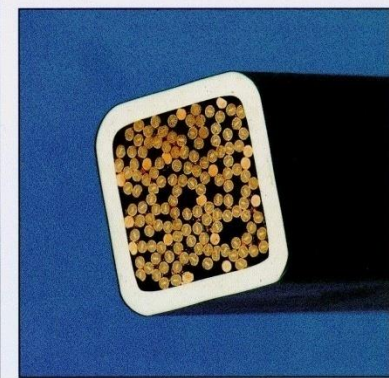


Fig. 2

Sendo construído em Cadarache, França.

Material adicional
(Opcional)

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 R de decaimento radioativo, ou atividade de um radionuclídeo, na qual ocorre um processo de decaimento em uma amostra radioativa, é proporcional ao número N de nuclídeos radioativos presentes na amostra:

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

onde λ é a constante de desintegração do radionuclídeo.

Decaimento radioativo

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

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

Logo,

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

onde N_0 é o número de radionuclídeos na amostra em $t=0$ e N é o número remanescente em qualquer instante t .

Decaimento radioativo

Podemos também determinar diretamente a evolução da taxa de decaimento $R = -dN/dt$.

Derivando a eq. anterior em relação ao tempo:

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

Logo, podemos definir:

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

onde $R_0 = \lambda N_0$ é a taxa de decaimento em $t=0$ e R é a taxa em qualquer instante subsequente t .

Decaimento radioativo

Freqüentemente chama-se de *atividade* a taxa de decaimento total de uma amostra.

A unidade para a atividade (no SI) é o *becquerel* :

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

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

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

Decaimento radioativo

Meia-Vida ($T_{1/2}$):

Tempo necessário para que N e R caiam a metade do valor inicial:

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

$$2 = e^{\lambda T_{1/2}}$$

Tomando o **logaritmo natural** temos:

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

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Decaimento radioativo

Vida média (τ):

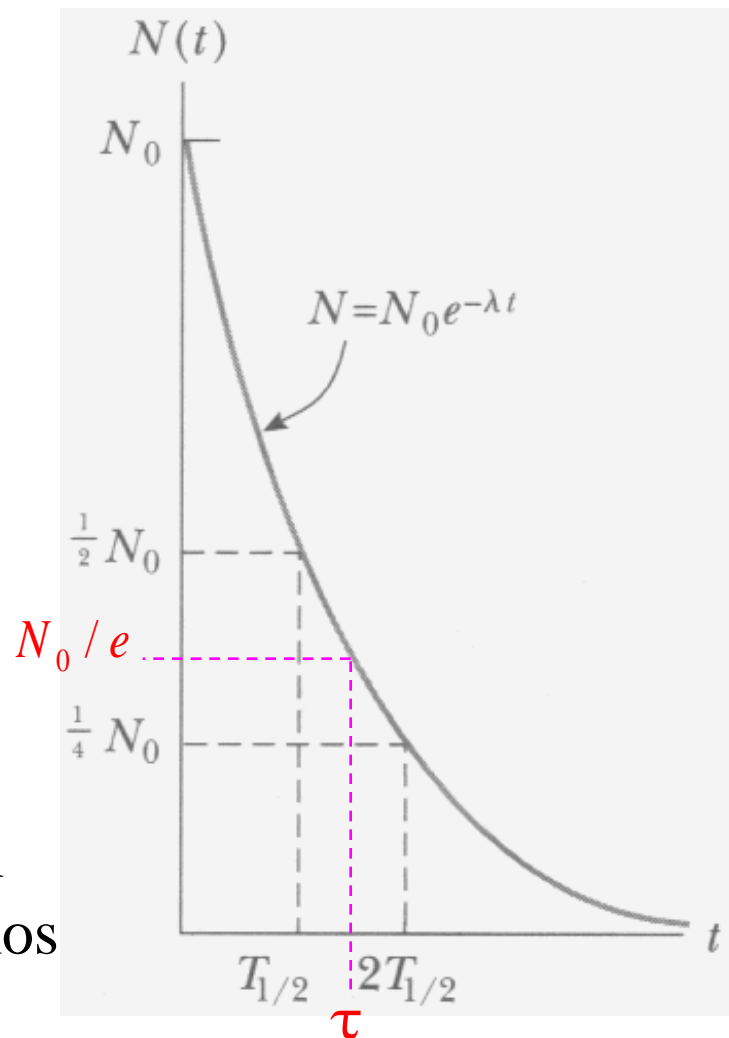
Tempo necessário para que N e R caiam a $1/e$ do valor inicial:

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

Observe ainda que temos a relação:

$$T_{1/2} = \tau \ln 2 \approx 0,693 \tau$$

- Não existe maneira de determinarmos qual nuclídeo decairá num dado instante. Podemos apenas determinar a probabilidade deste decaimento ocorrer e, portanto, as taxas de decaimento acima.

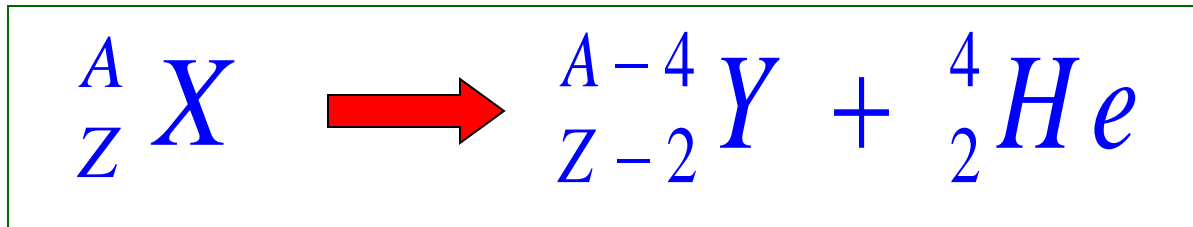


Processos de decaimento radioativo

- Os núcleos radioativos desintegram-se espontaneamente pelos decaimentos *alfa* e *beta*.

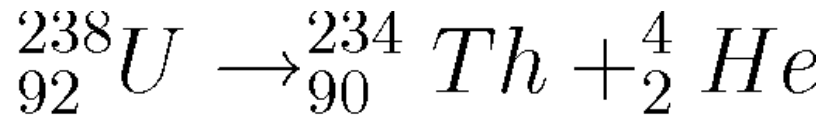
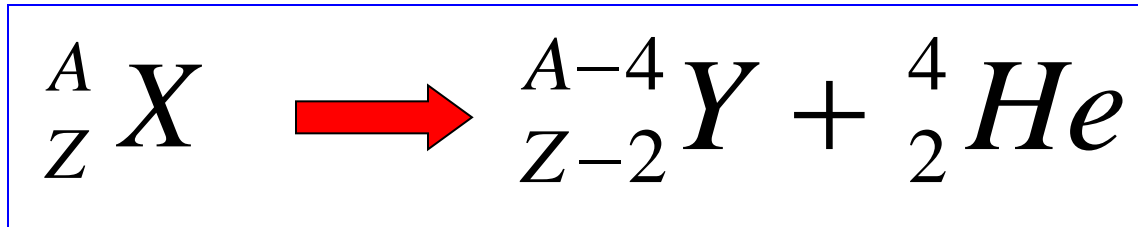
a) O decaimento alfa :

No decaimento alfa o núcleo X , emite uma partícula alfa (núcleo de ${}^4\text{He}$, dois prótons e dois nêutrons) transformando-se no núcleo Y :



Processos de decaimento radioativo

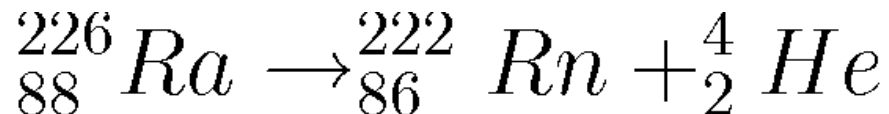
Exemplos:



$Q = 4,25 \text{ MeV}$ (exotérmica)

$T_{1/2} = 4,47 \times 10^9$ anos

(idade da Terra)



$Q = 4,87 \text{ MeV}$ (exotérmica)

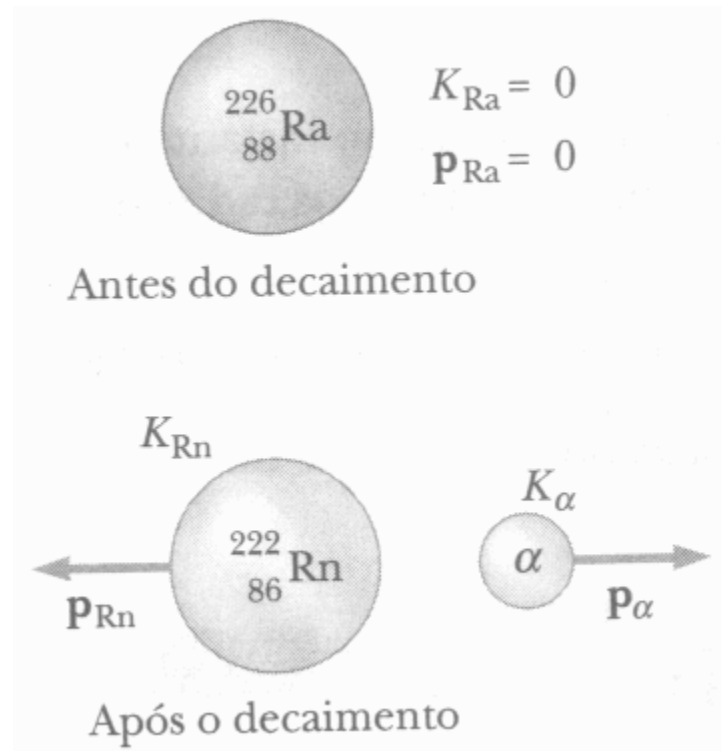
A quantidade Q é a energia de desintegração do processo, isto é, a quantidade de energia liberada durante o decaimento.

Processos de decaimento radioativo

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

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

Esta energia corresponde à **diminuição da energia de ligação** do sistema e aparece como **energia cinética** do “núcleo filho” e da partícula α . A **partícula α** , por ser mais leve, carregará quase toda a energia cinética.



Processos de decaimento radioativo

O mecanismo do decaimento alfa

- A meia vida do ^{238}U é de $4,5 \times 10^9$ anos (idade da Terra). Se o processo de decaimento é “energeticamente favorável” porque os núcleos não decaem todos rapidamente?

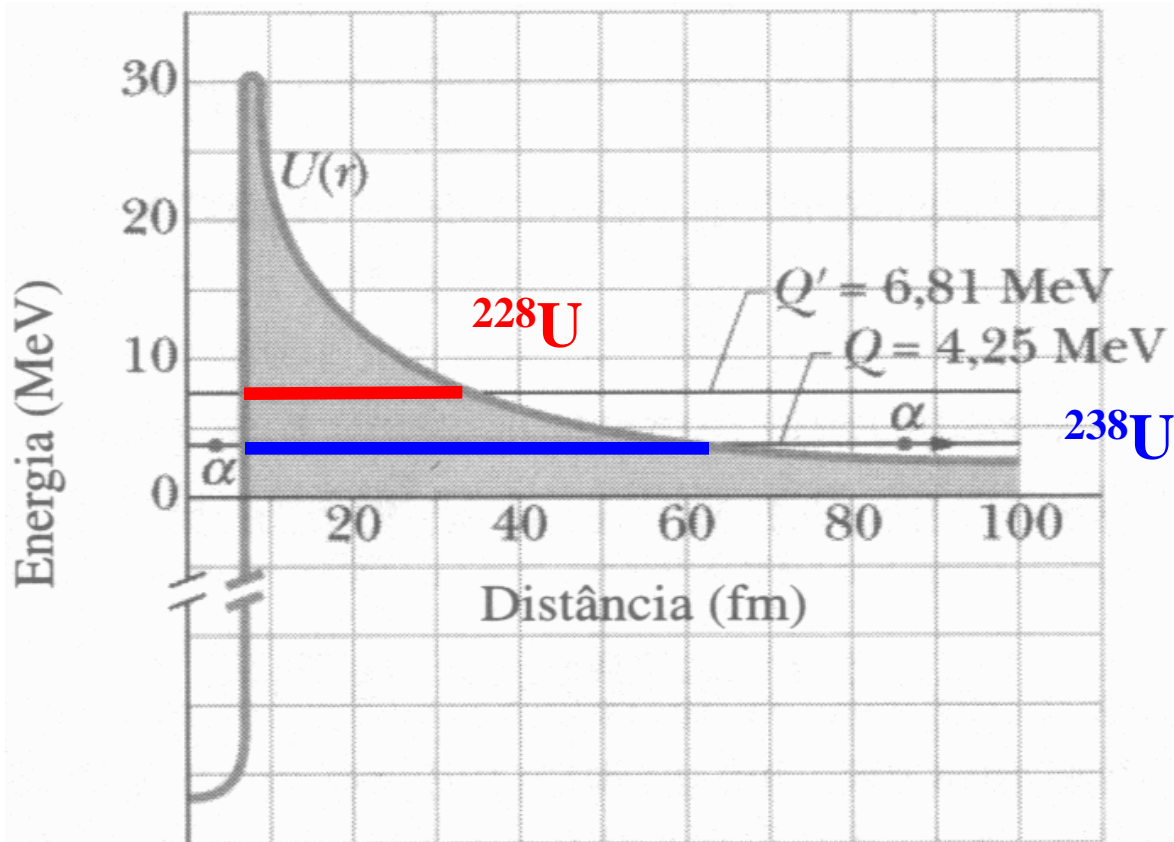
(O processo de decaimento α foi explicado em 1928 por Gamow, Gurney e Condon.)

No modelo, considera-se a partícula α previamente existindo no interior do núcleo.

A partícula α só é capaz de atravessar a barreira de potencial gerada pelo núcleo através de um **processo quântico de tunelamento**, que para diferenças apreciáveis de energia é bastante improvável.

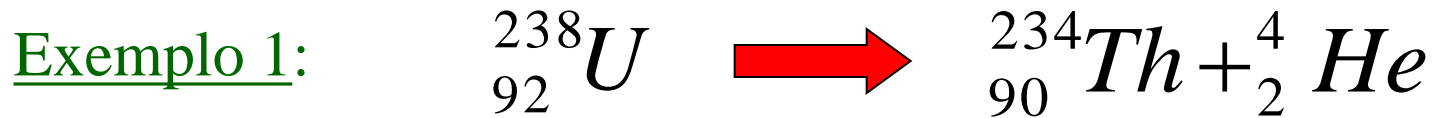
O mecanismo do decaimento alfa

O isótopo ^{228}U , que apresenta uma $Q = 6,81 \text{ MeV}$, tem uma meia vida de apenas $T_{1/2} = 9,1 \text{ minutos}$.



Barreiras de potencial semelhantes são encontradas também em reações químicas. Nestes casos elas são geradas pela repulsão eletrônica, ao invés da atração entre os núcleons. Mas da mesma forma representam a existência de “estados intermediários” energeticamente proibitivos. Normalmente elas são superadas pela elevação da temperatura no sistema, não sendo necessário “esperar” pelos processos de tunelamento.

Processos de decaimento radioativo



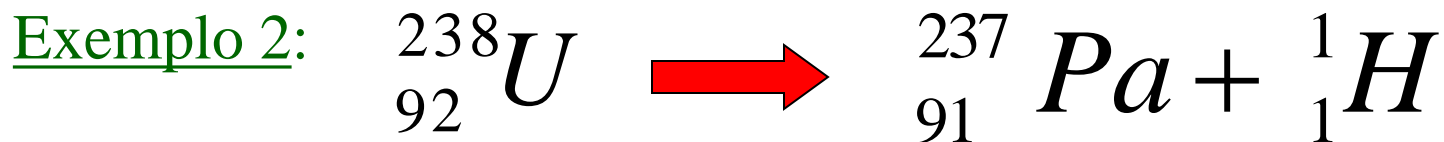
A carga e o número de núcleons se conserva.

A energia liberada na desintegração é

$$Q = M_i c^2 - M_f c^2$$

$$c^2 \approx 931,494 \text{ MeV/u}$$

$$Q = [238,05079 - (234,04363 + 4,00260)] c^2 \longrightarrow Q \approx 4,25 \text{ MeV} \text{ (exotérmica)}$$

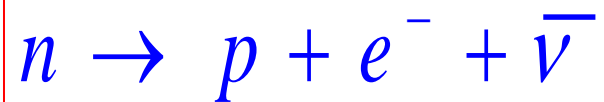


$$Q = [238,050 - (237,0512 + 1,007)] c^2 \longrightarrow Q \approx -7,64 \text{ MeV} \text{ (proibida ou endotérmica)}$$

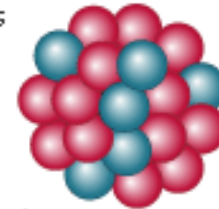
Processos de decaimento radioativo

b) O decaimento beta

- O decaimento beta ocorre em núcleos que têm excesso, ou falta, de nêutrons para adquirir estabilidade.
- No decaimento *beta menos* um dos **nêutrons** no interior do núcleo emite um **elétron e um anti-neutrino**, transformando-se em um **próton**:



Nucleus



Neutron



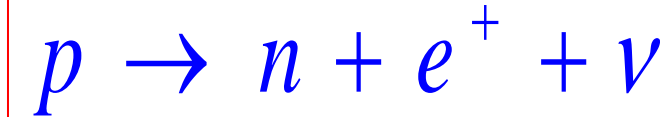
Proton



Beta particle,

Processos de decaimento radioativo

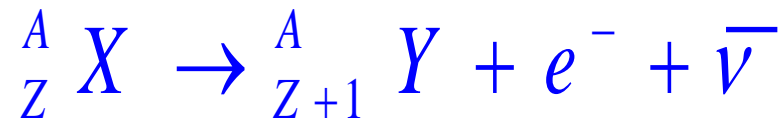
No decaimento *beta mais* um dos **prótons** no interior do núcleo emite um **pósitron** (anti-elétron) e um **neutrino**, transformando-se em um **nêutron**:



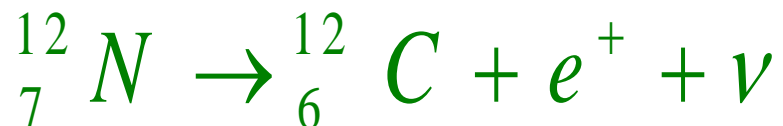
- O neutrino (**pequeno nêutron**) foi postulado para dar conta da conservação do **momento angular** e **linear** nas reações acima.
 - O neutrino, ν , apresenta carga nula e massa, possivelmente, também nula (menor que $7 \text{ eV}/c^2$).
- Além disso apresentam uma interação muito fraca com a matéria (um **livre caminho médio** que pode atingir **milhares de anos luz**). Foram detectados pela primeira vez em 1953, por Reines e Cowan.

Processos de decaimento radioativo

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



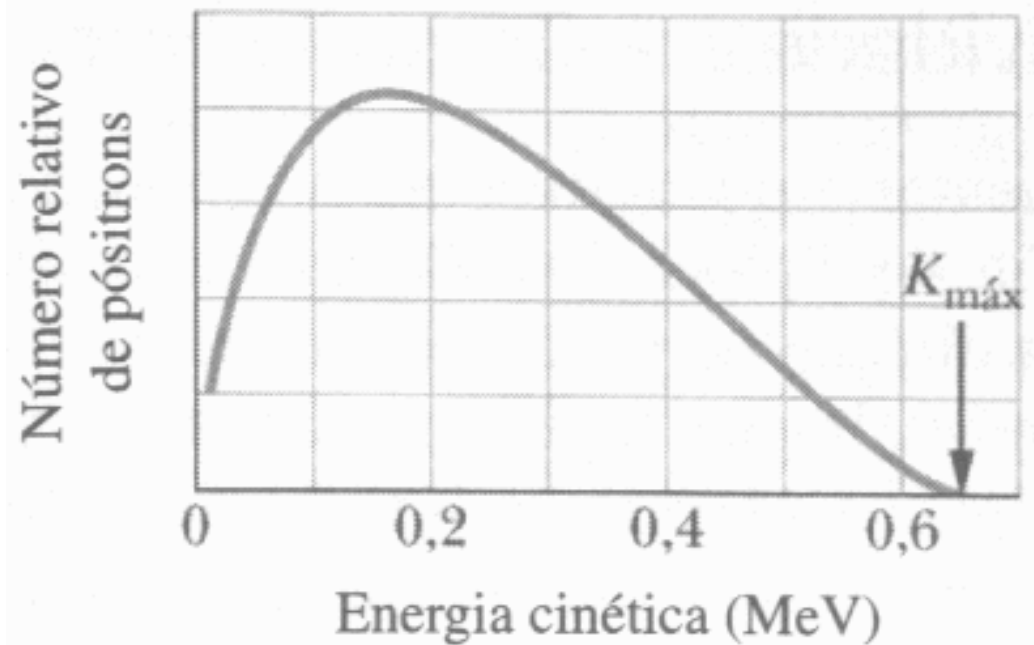
Como exemplos de decaimentos beta temos a decaimento do carbono 14 e do nitrogênio 12:



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 (pósitron) e do anti-neutrino (neutrino).
- Porém, os pósitrons apresentam uma energia cinética máxima igual a Q , no caso em que os neutrinos saem com energia nula (ver Figura):

$$K_{\max}^{el} = Q$$



Medida da dose de radiação

a) Dose absorvida:

Energia absorvida por unidade de massa:

$$1 \text{ Gy (gray)} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad (radiation absorbed dose)}$$

Uma dose de raios gama de 3 Gy = 300 rad aplicados ao corpo inteiro causa a morte de 50% das pessoas envolvidas.

b) Dose equivalente:

Dose Equivalente = Dose Absorvida x Efeito Biológico (RBE)

Raios gama e elétrons: RBE = 1, nêutrons: RBE = 5 e partículas alfa: RBE = 10.

Unidade (sievert): **1 Sv = 100 rem.**

Datação radioativa de rochas

- Feita pelo decaimento de nuclídeos de vida muito longa.
Por exemplo:
 - 1) Uso do decaimento de ^{40}K para o isótopo estável ^{40}Ar com $T_{1/2} = 1,25 \times 10^9$ anos.
 - 2) Decaimento de ^{235}U para ^{207}Pb .

Prob. 3:

A análise por espectrometria de massa dos átomos de potássio e argônio presentes em uma rocha lunar mostra que a razão entre o número de átomos de ^{40}Ar (estáveis) e o número de átomos de ^{40}K (radioativos) é 10,3. Suponha que todos os átomos de argônio tenham sido produzidos pelo decaimento de átomos de potássio, com uma meia-vida de $1,25 \times 10^9$ anos. Qual é a idade da rocha?

Datação radioativa de matéria orgânica

- 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 $1,3 \times 10^{-12}$. (O ^{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 beta, com uma meia-vida de 5730 anos.
- Assim, pode-se determinar a idade do material orgânico medindo a razão entre os isótopos de carbono.