



# 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](mailto:durval@demar.eel.usp.br)*

*[www.demar.eel.usp.br/docentes](http://www.demar.eel.usp.br/docentes) ou [www.eel.usp.br](http://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](http://www.eel.usp.br)

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

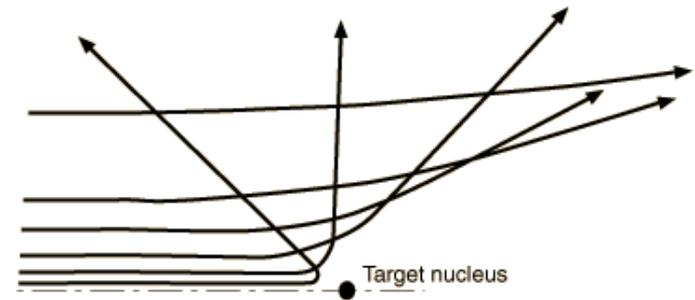
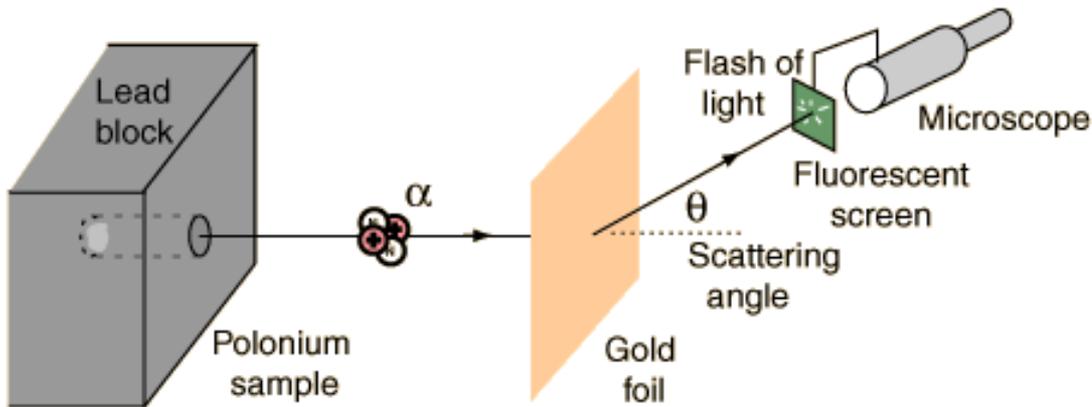
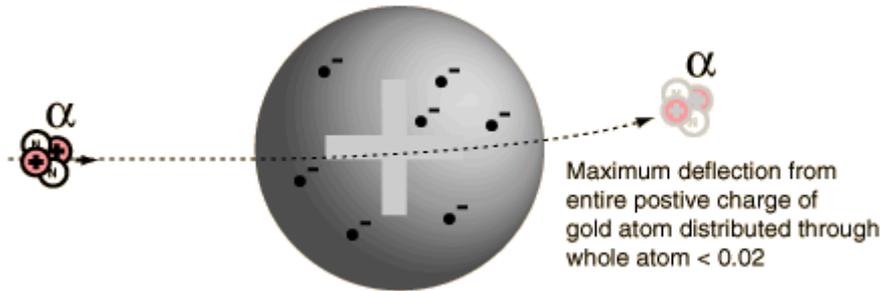
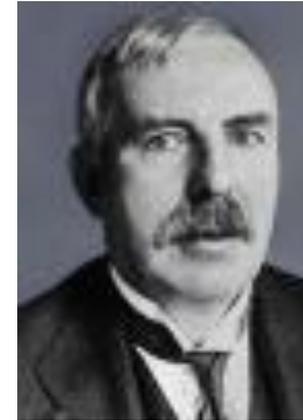
**UNIDADE 11 -**

**Física Nuclear**

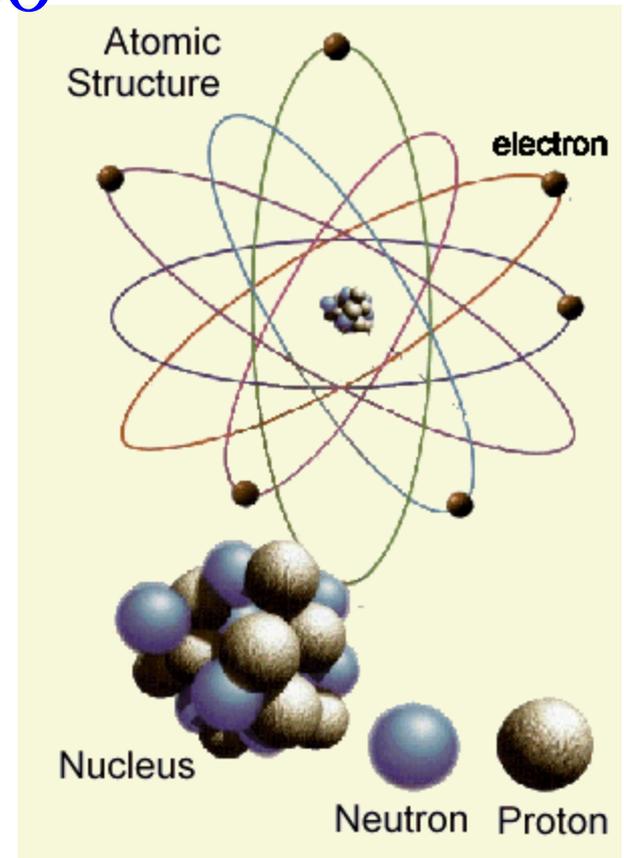
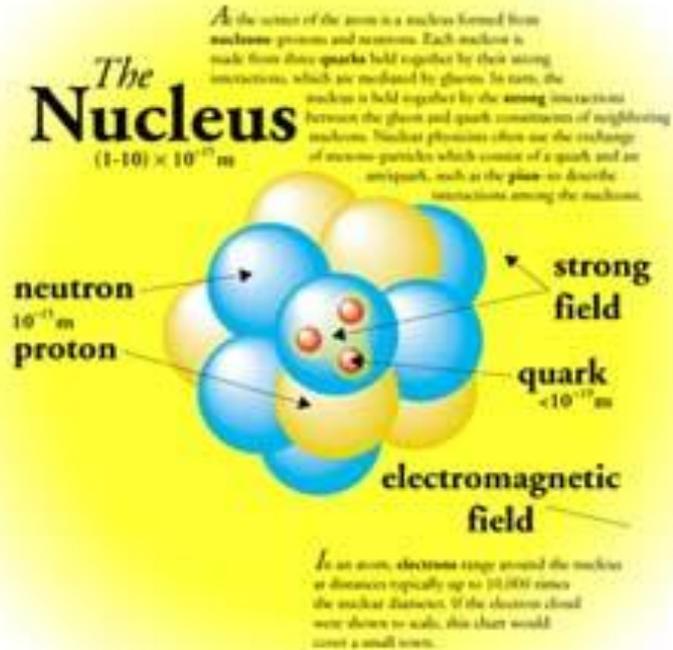
# A descoberta do núcleo atômico

## Modelo de Thomson (1910)

Modelo de Thomson: previa deflexão pequena das partículas  $\alpha$



# 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:

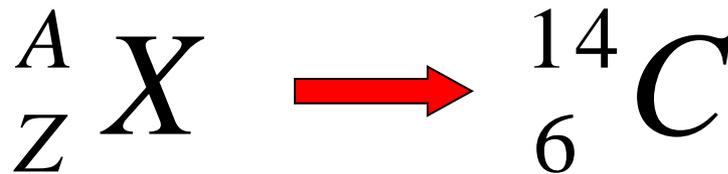
**Número Atômico (Z)** – número de prótons do núcleo.

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

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

$$A = Z + N$$

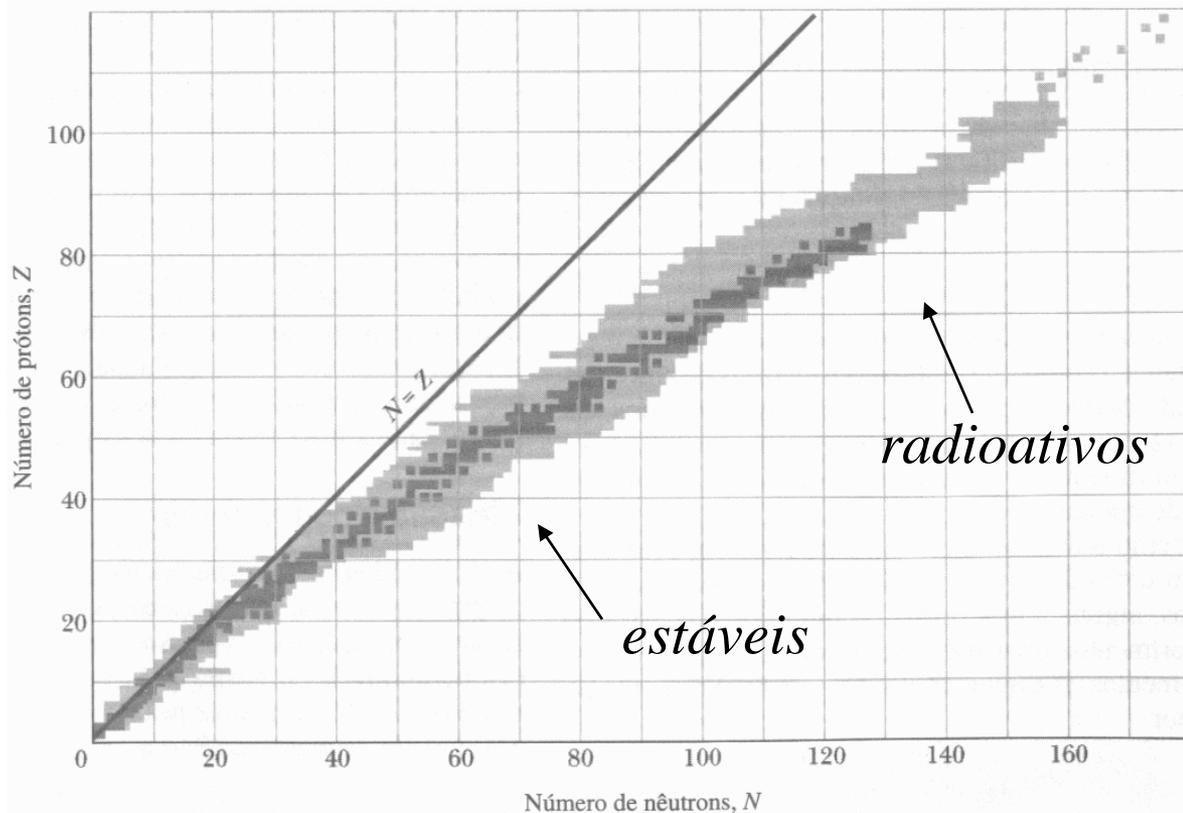
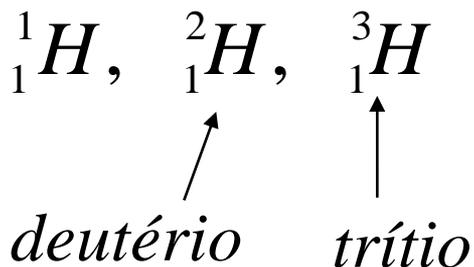
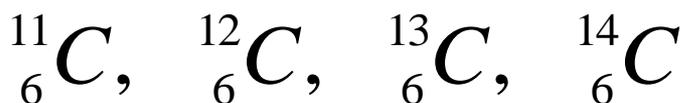
**Símbolo:**



# Nomenclatura:

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

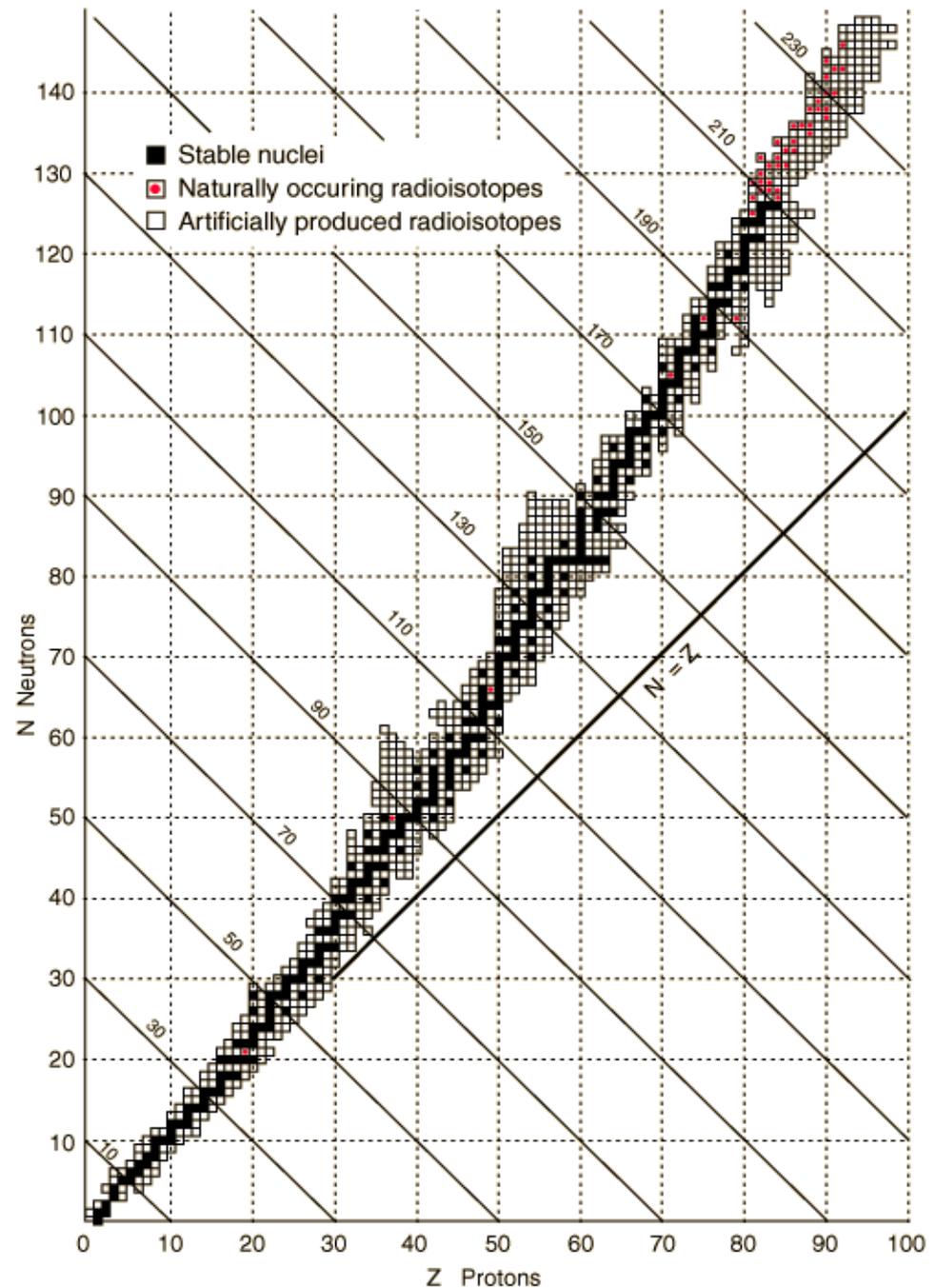
Exemplos:



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*.





# 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:

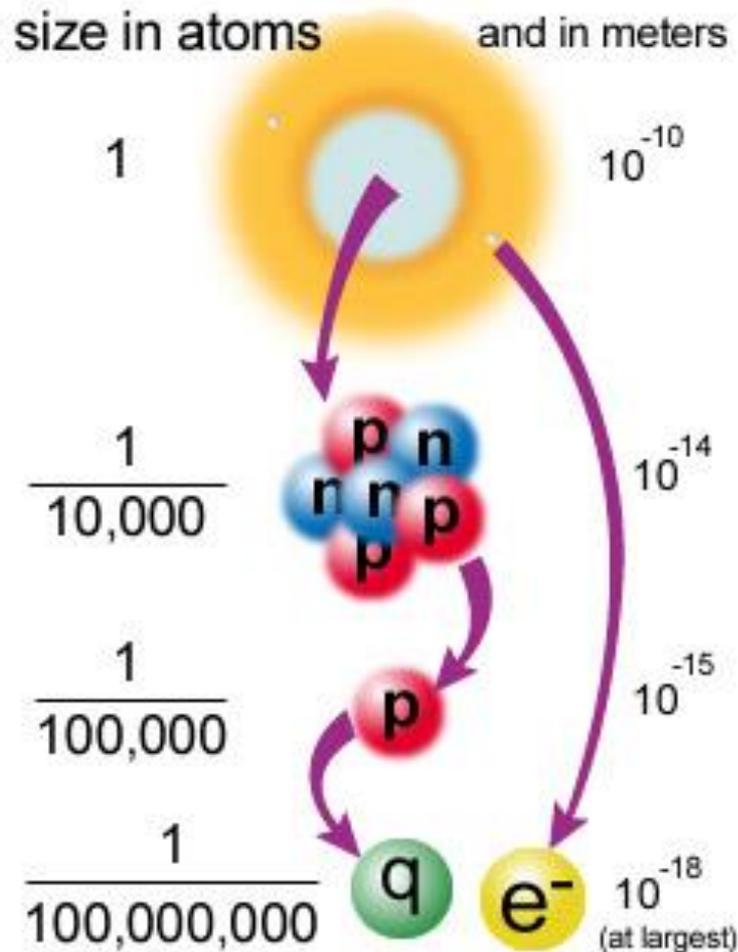
$$r = r_0 A^{1/3}$$

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  $^{12}\text{C}$  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                       | $u$                    | $\text{MeV}/c^2$ |
| 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  $m_i$ .

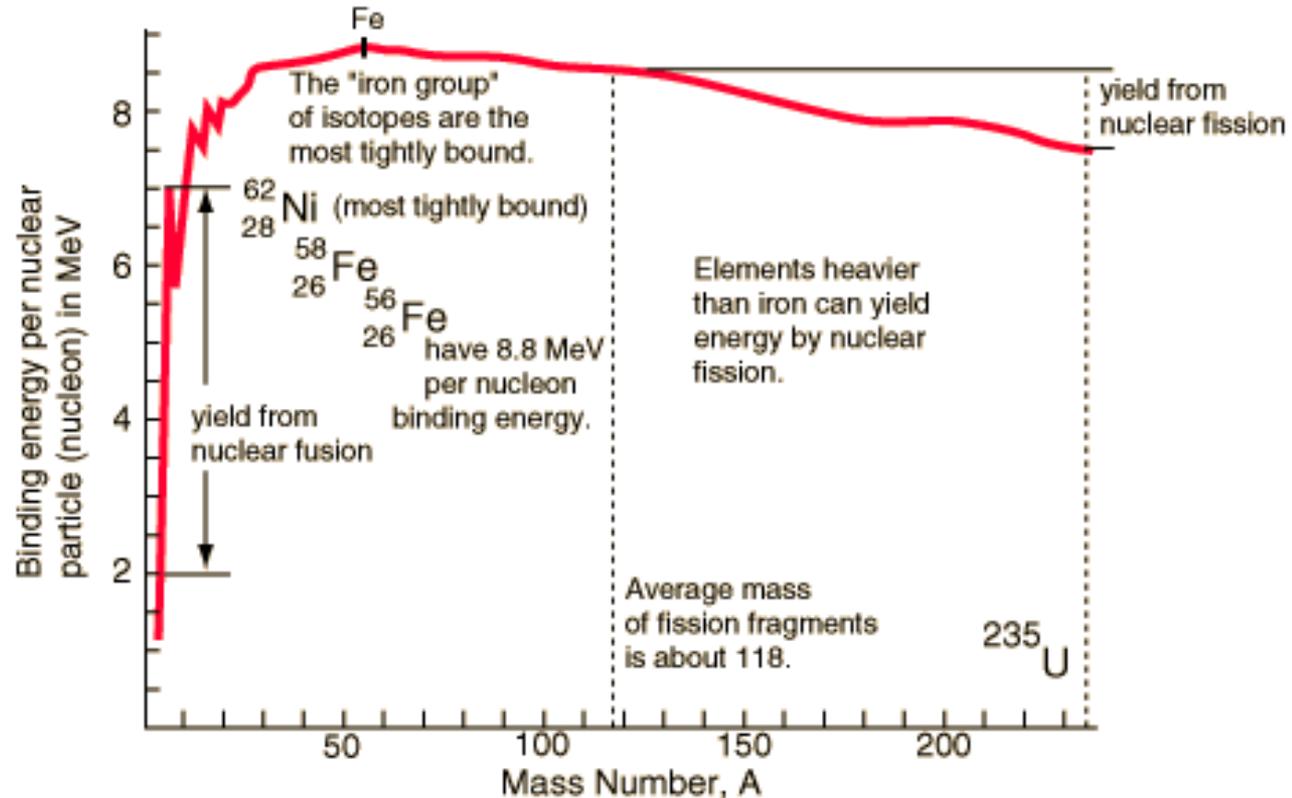
- Assim, a *Energia de Ligação* é uma medida da *estabilidade do núcleo*.

# 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 $^{120}\text{Sn}$

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

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

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

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

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

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

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

# $Q$ 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** :

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

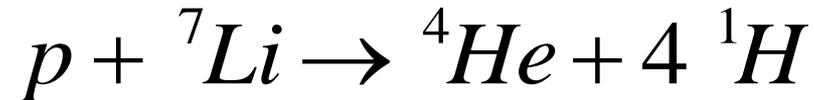
ou

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

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 .

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

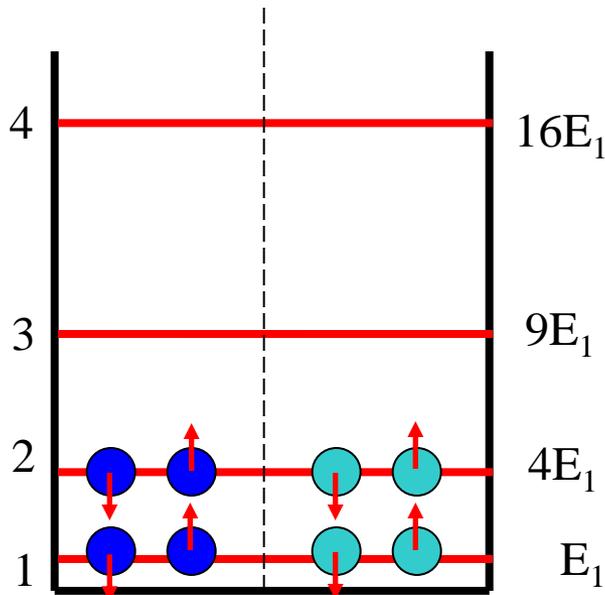
$$c^2 \approx 931,494 \text{ MeV/u}$$

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

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

# 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



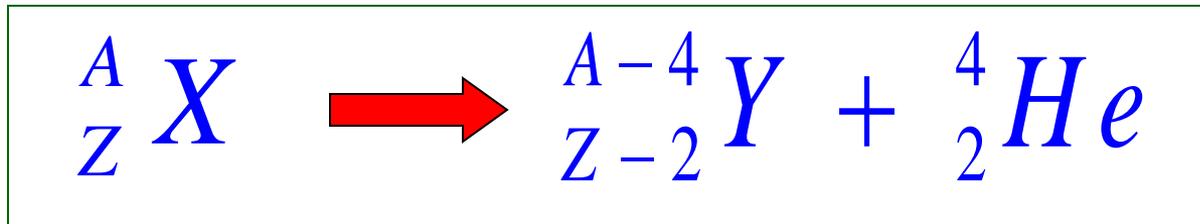
Níveis de energia do nuclídeo  $^{28}\text{Al}$

# Processos de decaimento radioativo

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

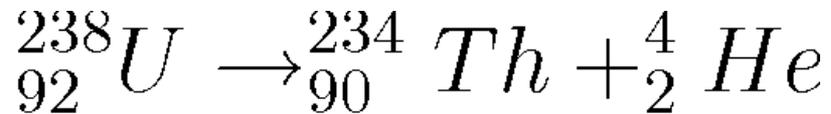
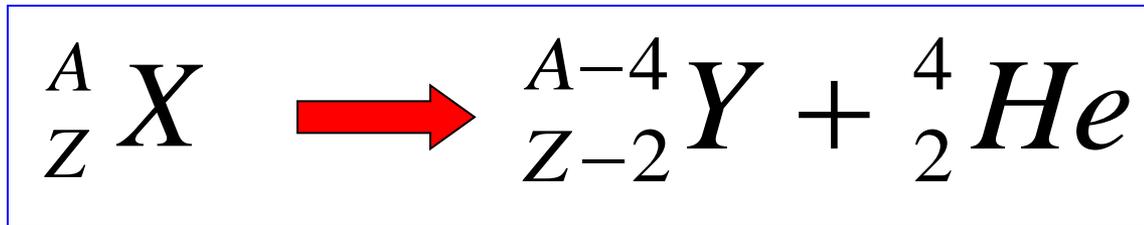
## a) O decaimento alfa :

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

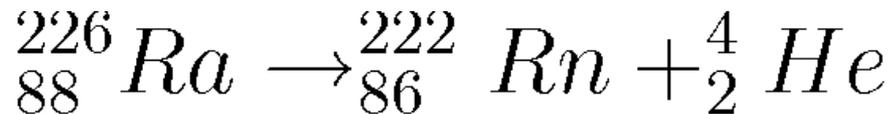
Exemplos:



$Q = 4,25 \text{ MeV}$  (exotérmica)

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

(idade da Terra)



$Q = 4,87 \text{ MeV}$  (exotérmica)

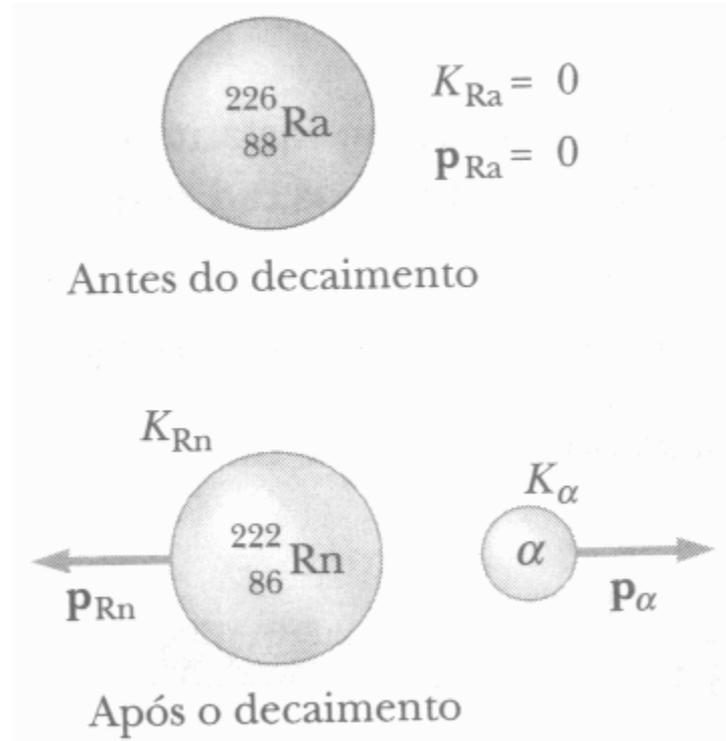
A quantidade  $Q$  é a energia de desintegração do processo, isto é, a quantidade de energia liberada durante o decaimento.

# Processos de decaimento radioativo

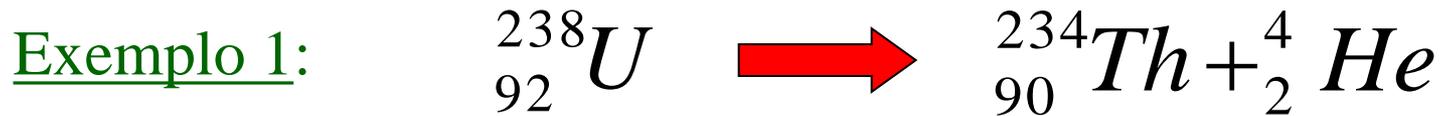
- O **decaimento alfa** pode ocorrer espontaneamente porque o “núcleo pai”, **X**, apresenta uma energia de repouso (massa) maior que a soma das energias de repouso (massas) do “núcleo filho”, **Y**, e da partícula  **$\alpha$** . A energia de desintegração **Q** é dada por:

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

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



# Processos de decaimento radioativo



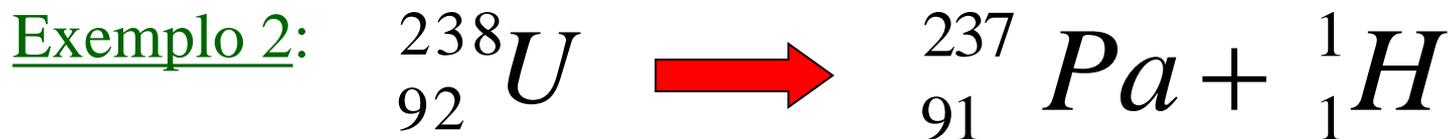
A carga e o número de núcleons se conserva.

A energia liberada na desintegração é

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

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

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

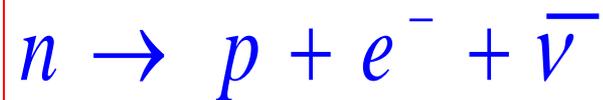


$$Q = [238,050 - (237,0512 + 1,007)] c^2 \longrightarrow Q \approx -7,64 \text{ MeV} \text{ (proibida ou endotérmica)}$$

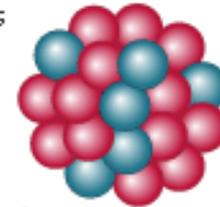
# Processos de decaimento radioativo

## 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



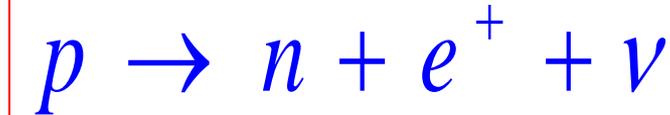
Proton



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** ( $\nu$ ), 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,  $\nu$ , 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:



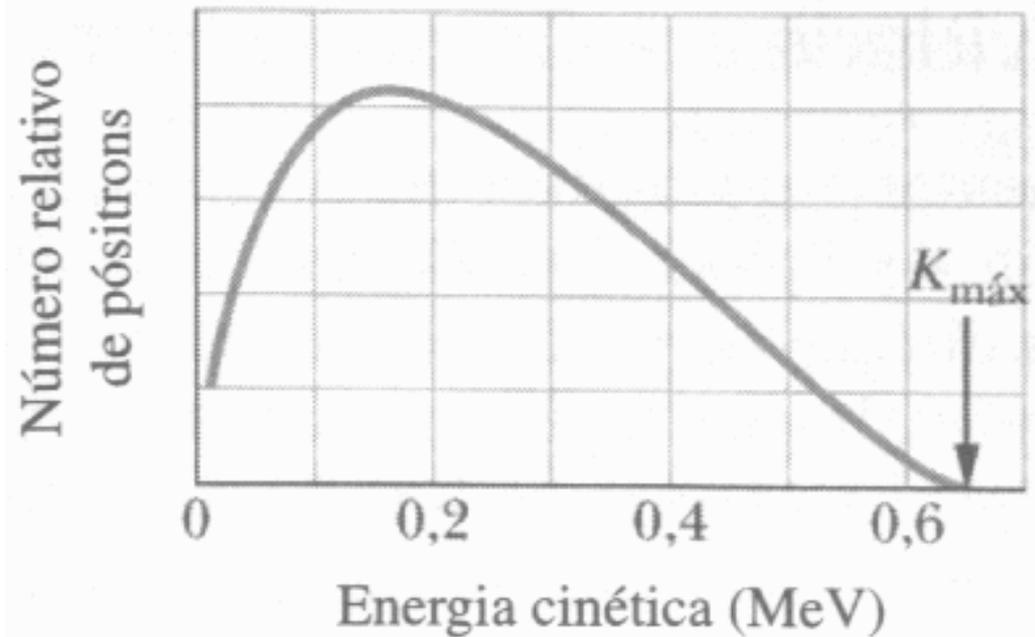
Como exemplos de decaimentos beta temos a decaimento do carbono 14 e do nitrogênio 12:



# Processos de decaimento radioativo

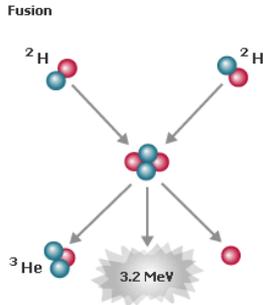
- Enquanto no decaimento  $\alpha$  praticamente toda a energia liberada,  $Q$ , vai para a partícula  $\alpha$ , no decaimento  $\beta$  esta energia pode se distribuir de diferentes formas entre a energia do elétron (pósitron) e do anti-neutrino (neutrino).
- Porém, os pósitrons apresentam uma energia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

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



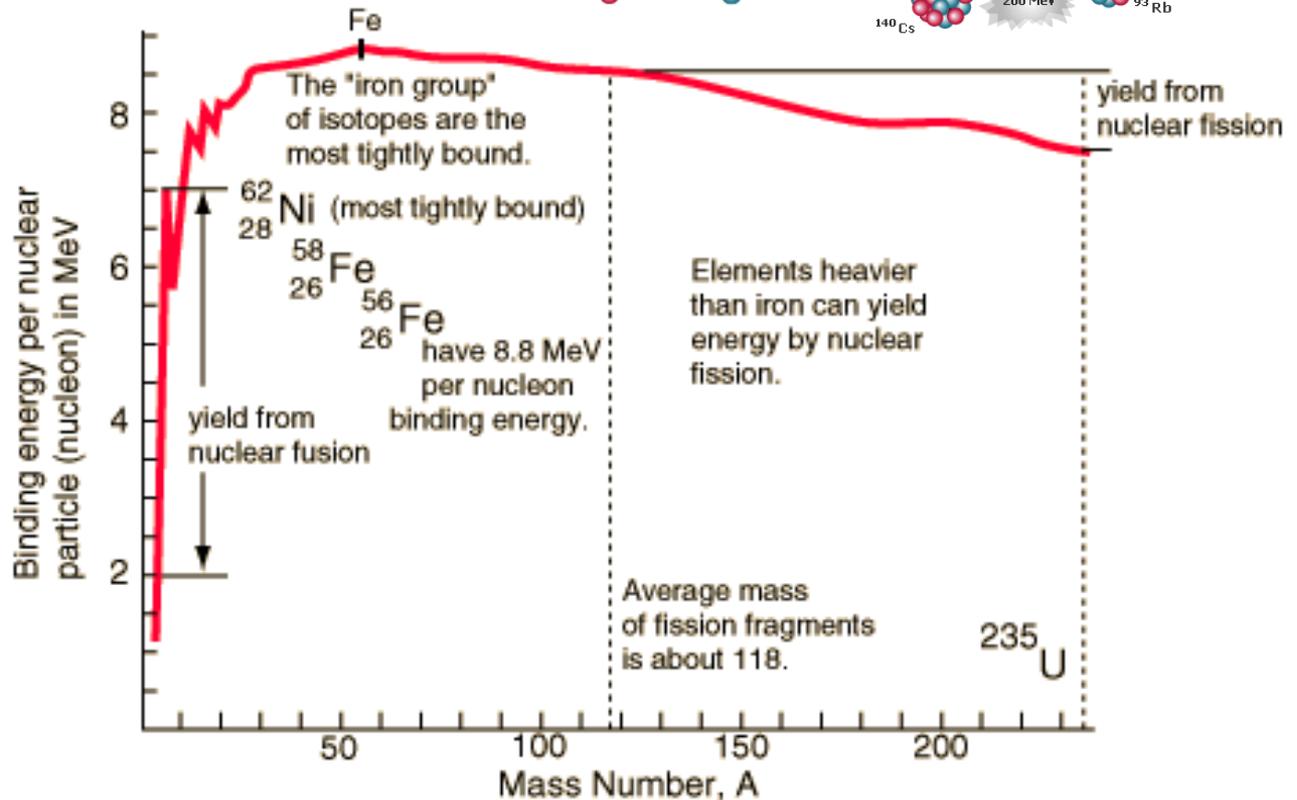
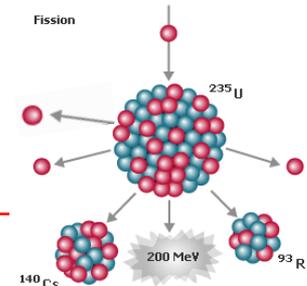
# Energia nuclear

- 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

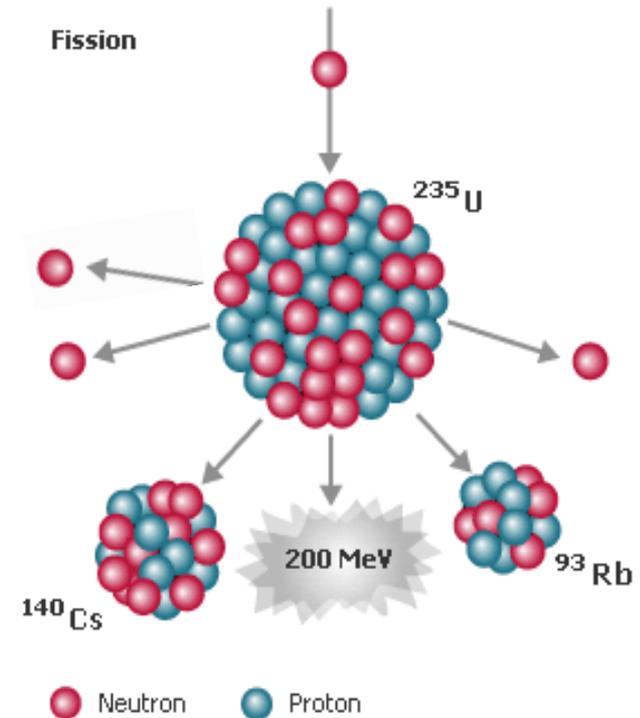


# Energia nuclear

## Fissão nuclear

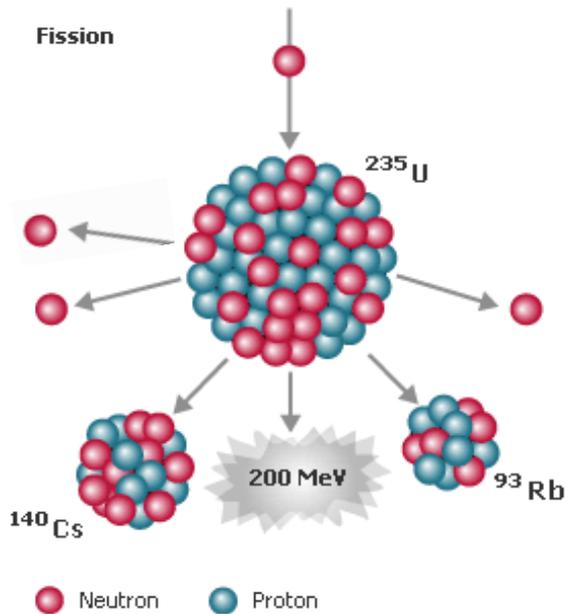
Os primeiros experimentos de fissão nuclear foram feitos por Enrico Fermi em 1935 e por Otto Hahn e Fritz Strassman, em 1939.

As reações típicas são:

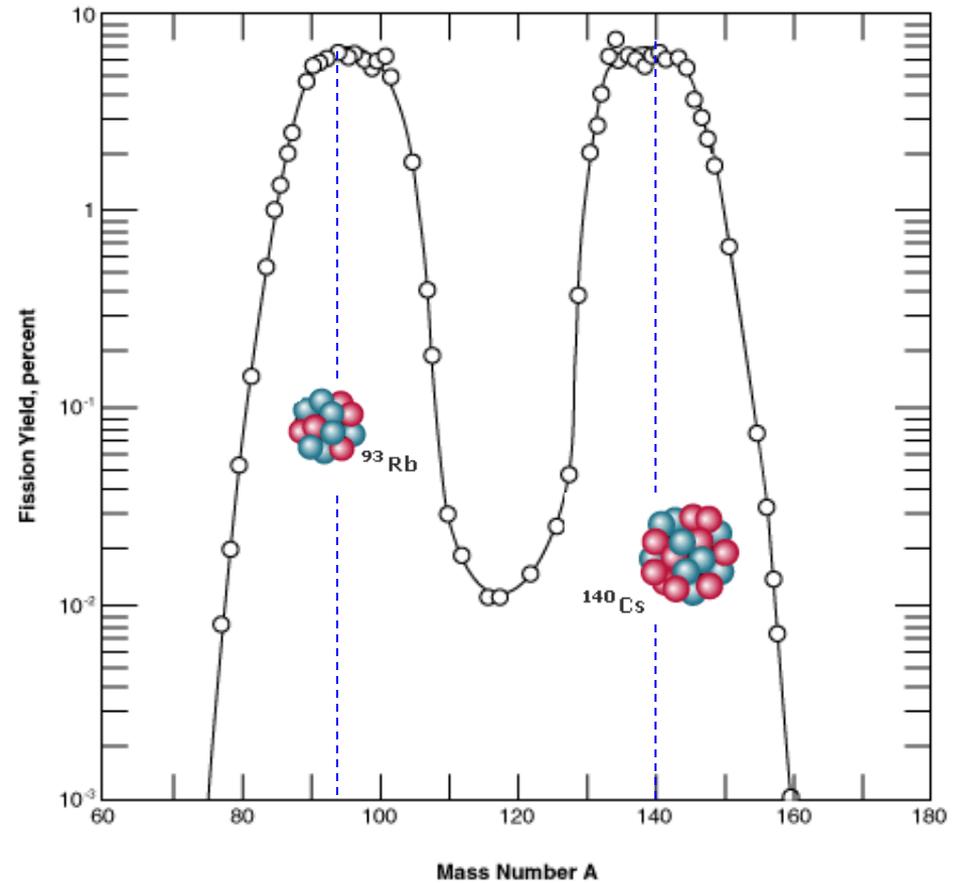


# Energia nuclear

## Distribuição dos fragmentos de fissão do $^{235}\text{U}$

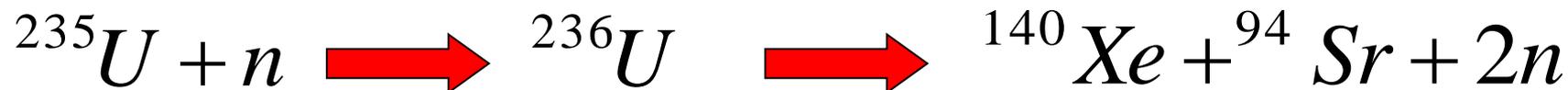


Thermal Neutron Fission of U-235



# Energia nuclear

## Fissão nuclear



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

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

Finalmente:



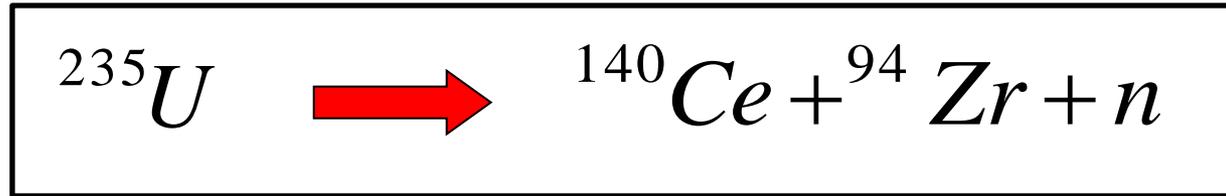
# Energia nuclear

## Fissão nuclear

### Prob. 2:

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

|                   |            |
|-------------------|------------|
| $^{235}\text{U}$  | 235,0439 u |
| $^{140}\text{Ce}$ | 139,9054 u |
| $^{94}\text{Zr}$  | 93,9063 u  |
| n                 | 1,00866 u  |

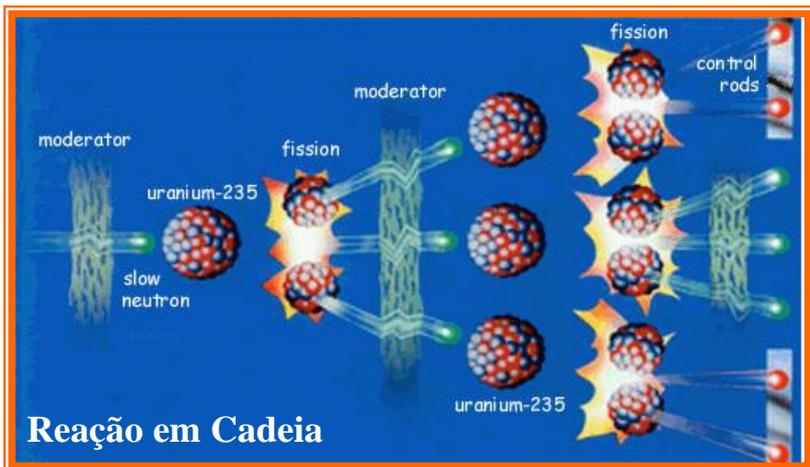


$$Q = - \Delta m \cdot c^2$$

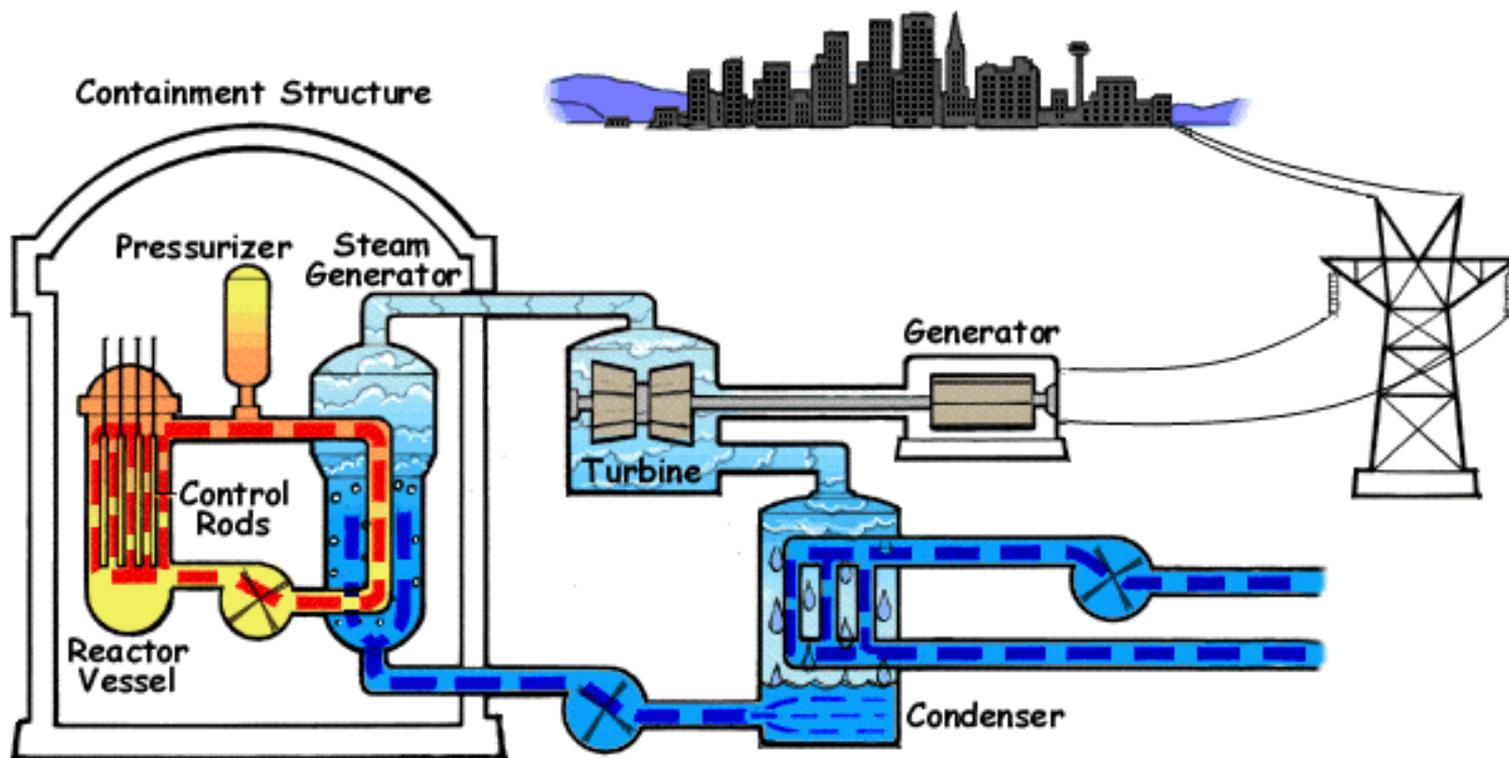
$$\Delta m = (139,9054 \text{ u} + 93,9063 \text{ u} + 1,00866 \text{ u}) - (235,0439 \text{ u}) = -0,22354 \text{ u}$$

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

**Exotérmica!**

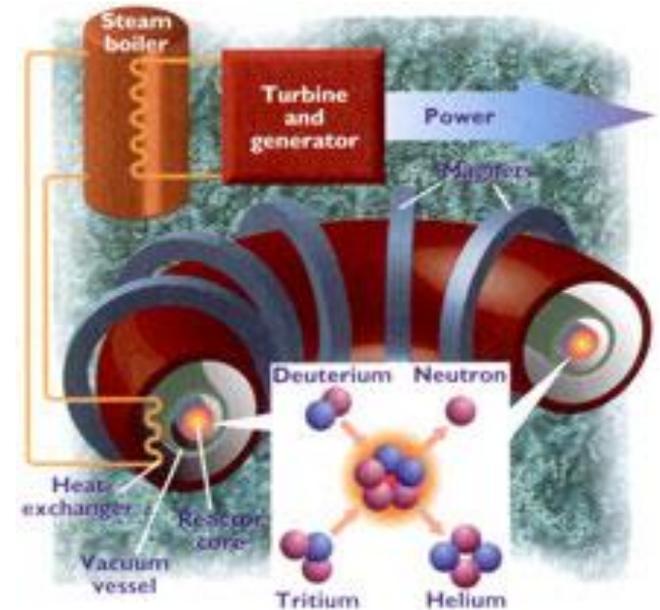
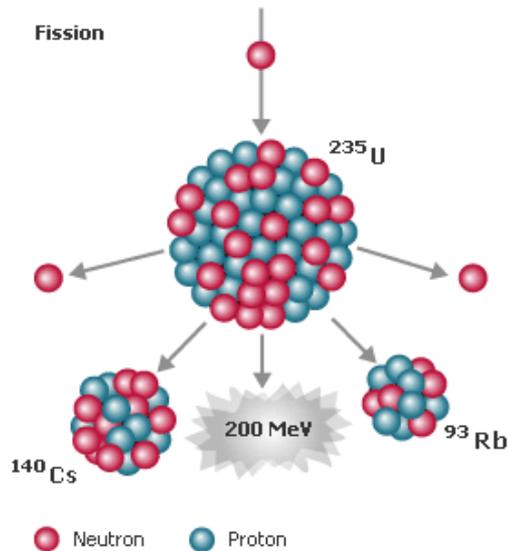


# Reator Nuclear

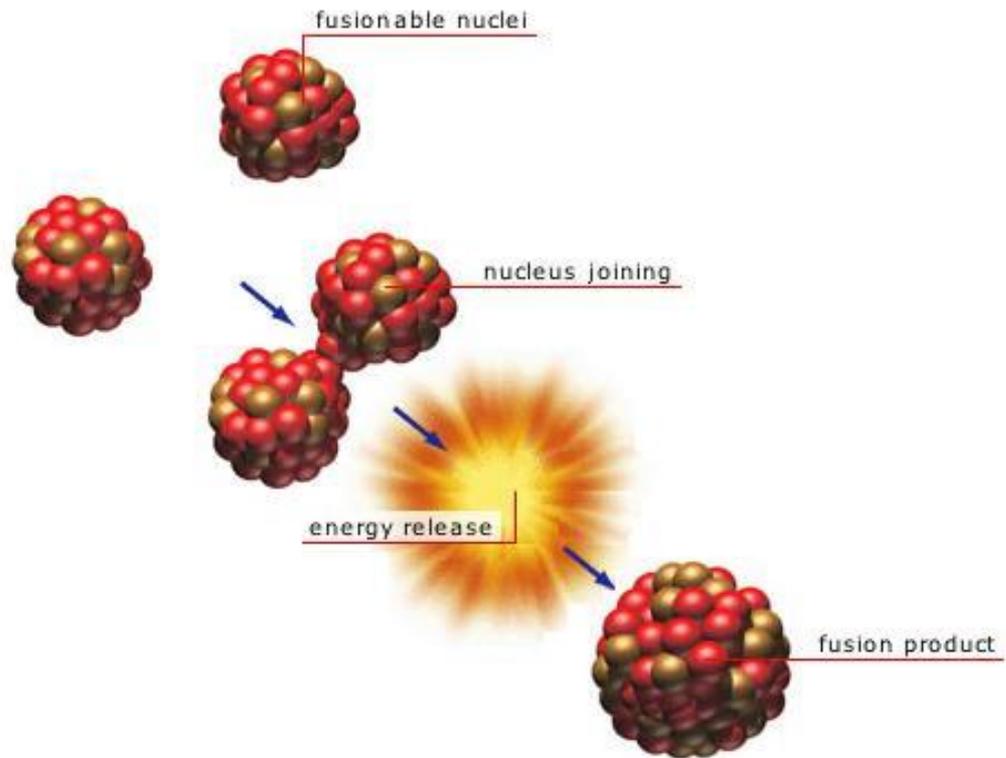


# Energia nuclear

- 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  $\tau$  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,  $23 \times 10^7$  K (20 keV).  
No Sol  $1,5 \times 10^7$  K (1,3 keV).

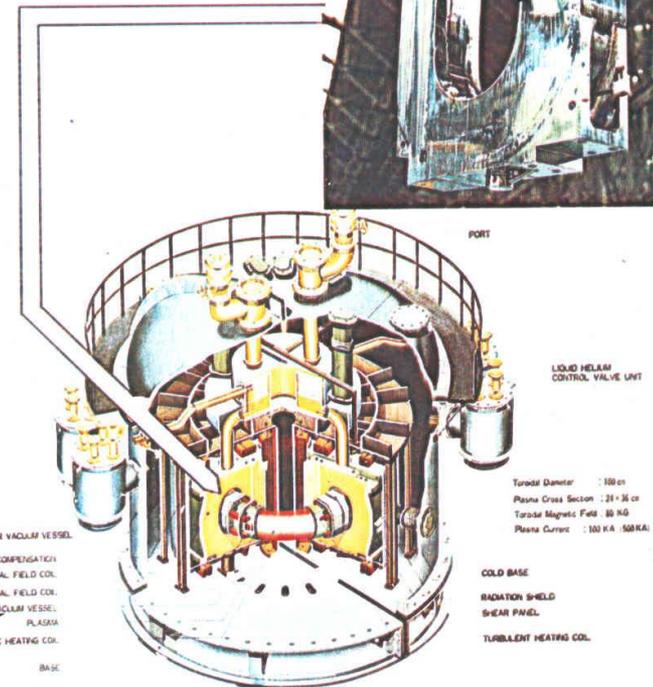
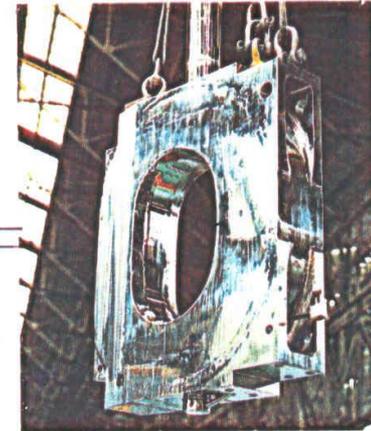
2) Densidade alta de partículas, para que a taxa de colisões d-d seja alta. Na temp. requerida, o deutério estará ionizado.

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



## 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 Nb<sub>3</sub>Sn stabilized by pure aluminum and oxygen free copper for enhanced cryogenic stability.

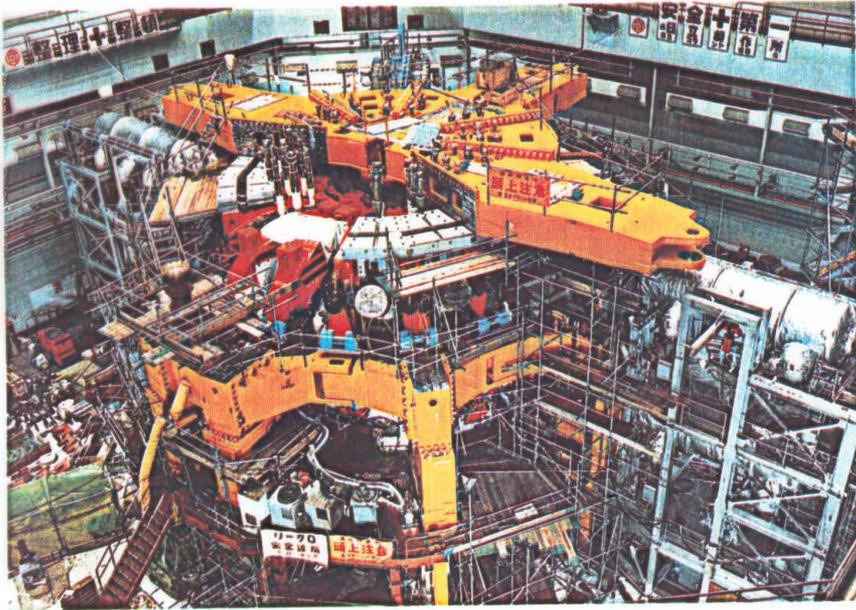


Cutaway View Of High Field Superconducting Tokamak (Triam-1M)

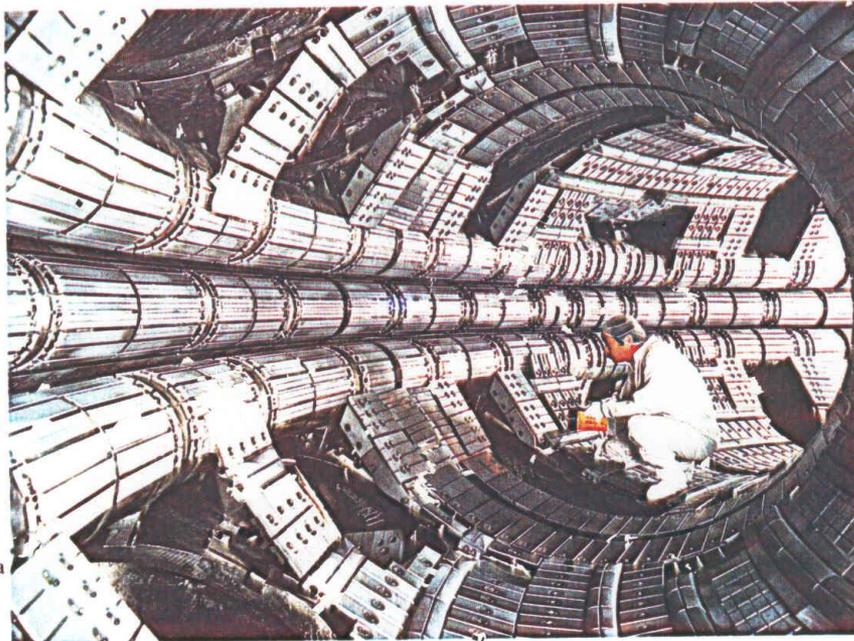
|                    |                    |                     |              |
|--------------------|--------------------|---------------------|--------------|
| Year completed     | 1986               | Max. field          | 11 T         |
| Customer           | Kyushu University  | Ampere turns        | 33,000 KAT   |
| Application        | Nuclear fusion     | Total stored energy | 75 MJ        |
| Coil configuration | Oval-shaped        | Torus radius        | 800 mm       |
| Superconductor     | Nb <sub>3</sub> 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

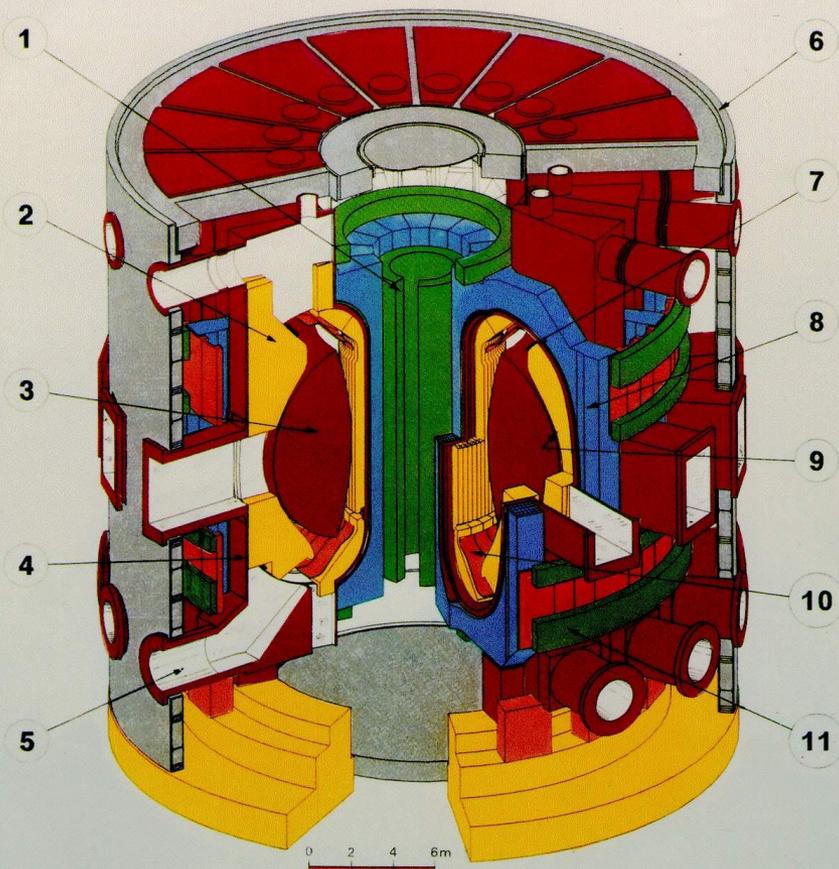


JT-60 Tokamak Machine under Installation



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 Nb<sub>3</sub>Sn para o Projeto ITER.

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

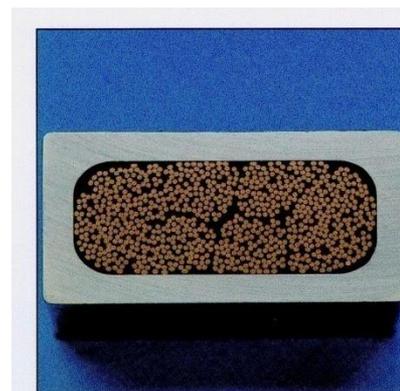


Fig. 1

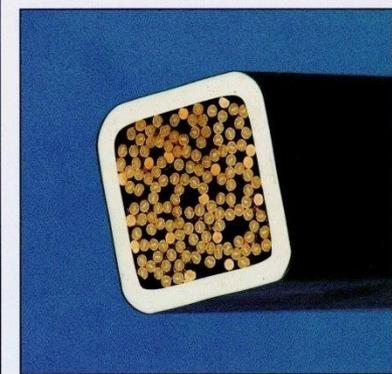


Fig. 2

**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 núcleos radioativos presentes na amostra:

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

onde  $\lambda$  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 ( $\tau$ ):

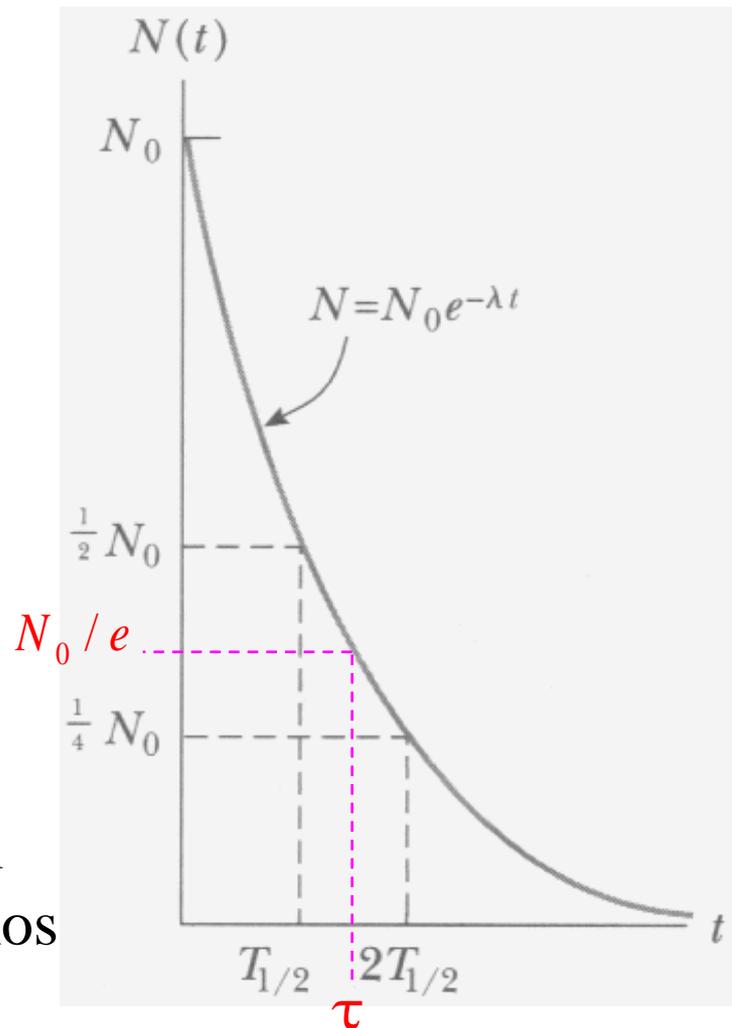
Tempo necessário para que  $N$  e  $R$  caiam a  $1/e$  do valor inicial:

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

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.

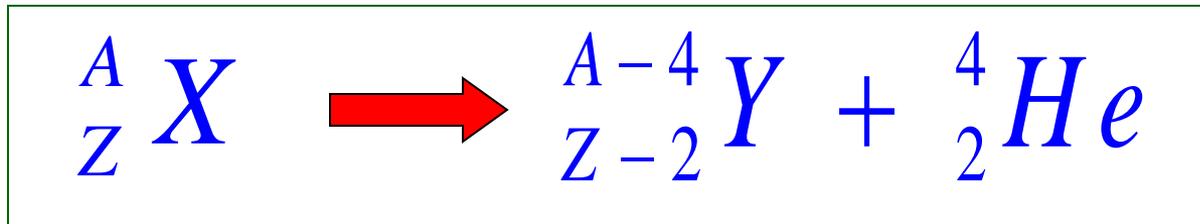


# Processos de decaimento radioativo

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

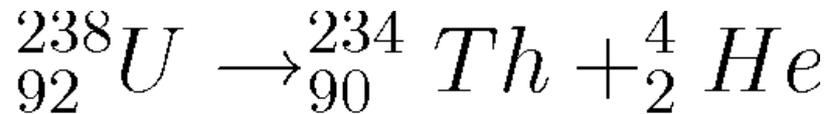
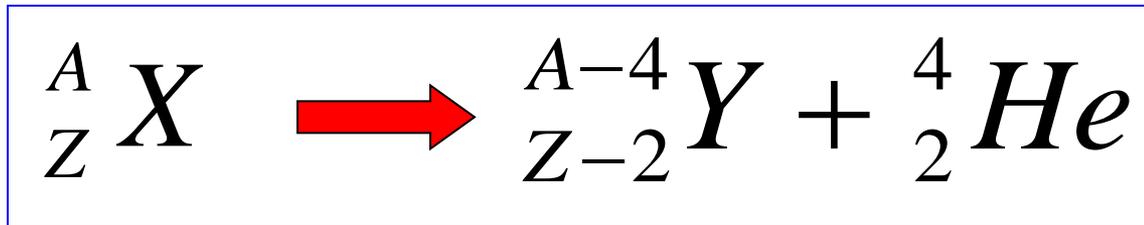
## a) O decaimento alfa :

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

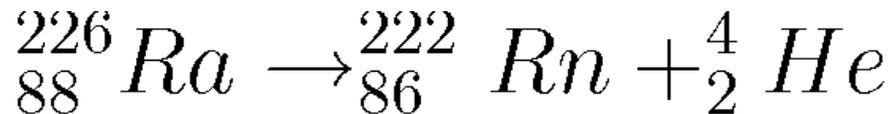
Exemplos:



$Q = 4,25 \text{ MeV}$  (exotérmica)

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

(idade da Terra)



$Q = 4,87 \text{ MeV}$  (exotérmica)

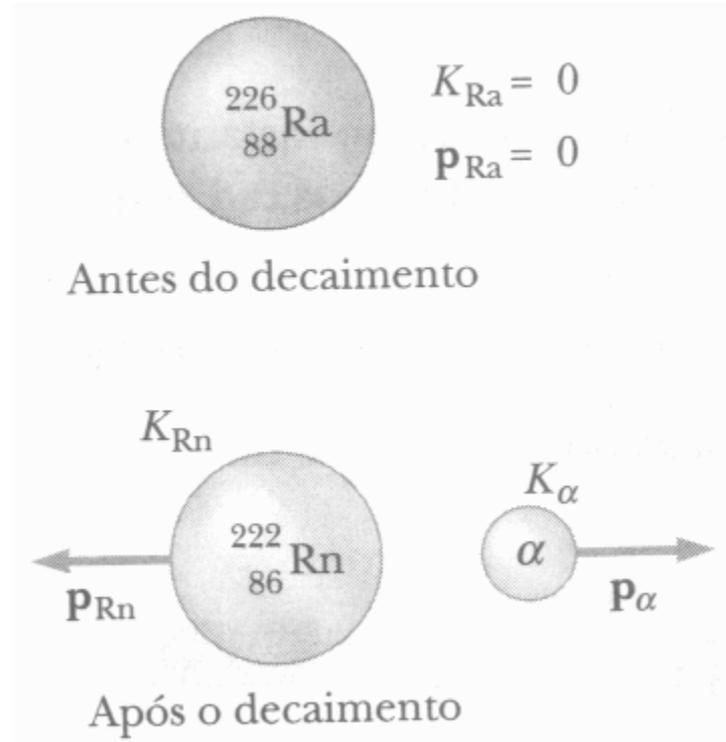
A quantidade  $Q$  é a energia de desintegração do processo, isto é, a quantidade de energia liberada durante o decaimento.

# 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  **$\alpha$** . 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  **$\alpha$** . A **partícula  $\alpha$** , por ser mais leve, carregará quase toda a energia cinética.



# Processos de decaimento radioativo

## O mecanismo do decaimento alfa

- A meia vida do  $^{238}\text{U}$  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?

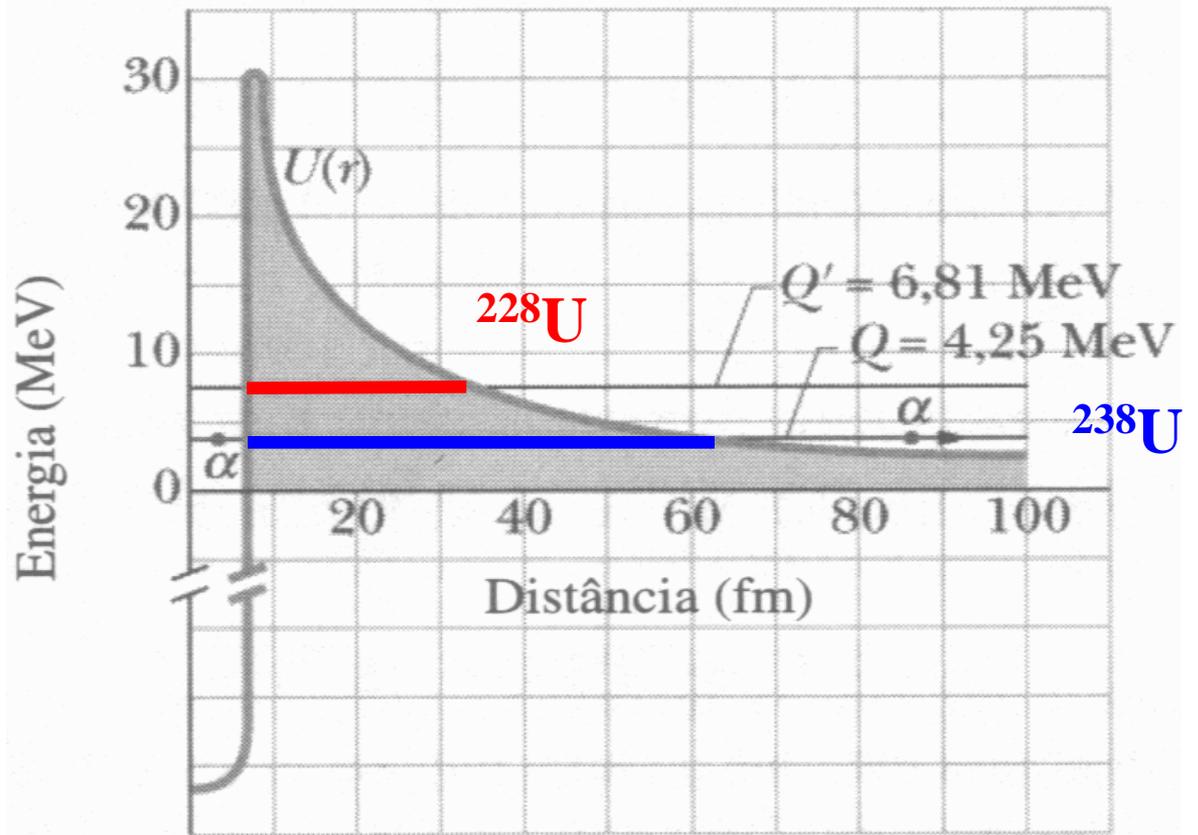
(O processo de decaimento  $\alpha$  foi explicado em 1928 por Gamow, Gurney e Condon.)

No modelo, considera-se a partícula  $\alpha$  previamente existindo no interior do núcleo.

A partícula  $\alpha$  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.

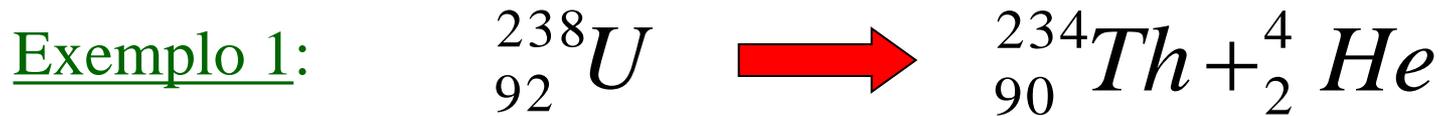
## O mecanismo do decaimento alfa

O isótopo  $^{228}\text{U}$ , 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



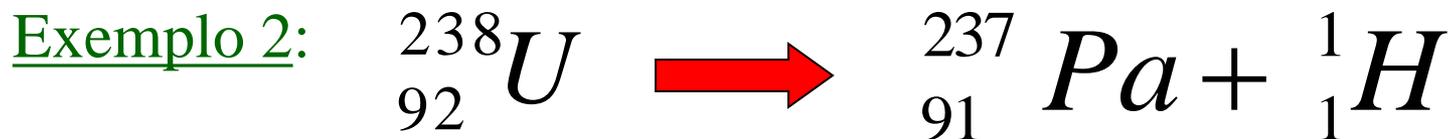
A carga e o número de núcleons se conserva.

A energia liberada na desintegração é

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

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

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

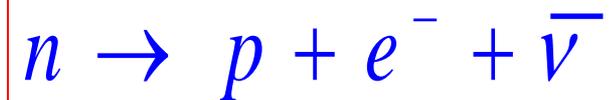


$$Q = [238,050 - (237,0512 + 1,007)] c^2 \longrightarrow Q \approx -7,64 \text{ MeV} \text{ (proibida ou endotérmica)}$$

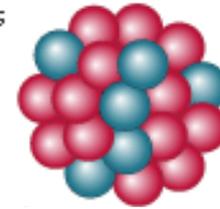
# Processos de decaimento radioativo

## 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



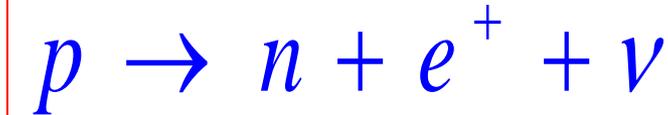
Proton



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,  $\nu$ , 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:



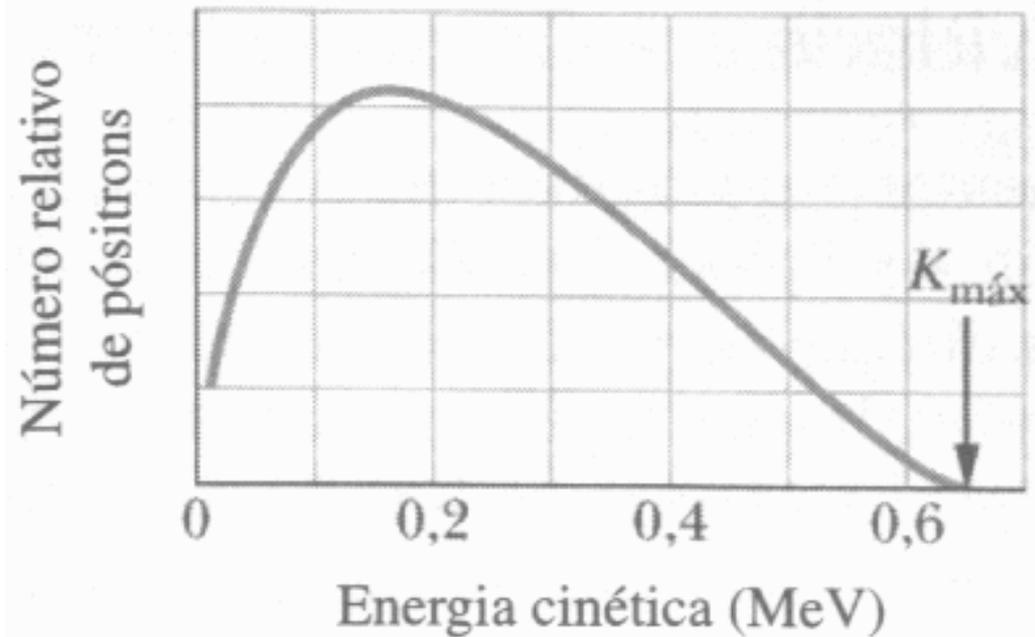
Como exemplos de decaimentos beta temos a decaimento do carbono 14 e do nitrogênio 12:



# Processos de decaimento radioativo

- Enquanto no decaimento  $\alpha$  praticamente toda a energia liberada,  $Q$ , vai para a partícula  $\alpha$ , no decaimento  $\beta$  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  $3 \text{ Gy} = 300 \text{ rad}$  aplicados ao corpo inteiro causa a morte de 50% das pessoas envolvidas.

## b) Dose equivalente:

$\text{Dose Equivalente} = \text{Dose Absorvida} \times \text{Efeito Biológico (RBE)}$

Raios gama e elétrons:  $\text{RBE} = 1$ , nêutrons:  $\text{RBE} = 5$  e partículas alfa:  $\text{RBE} = 10$ .

Unidade (sievert):  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ .

# Datação radioativa de rochas

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

## 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  $^{40}\text{Ar}$  (estáveis) e o número de átomos de  $^{40}\text{K}$  (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  $^{14}\text{C}$  é utilizado para datar amostras orgânicas. A razão entre o  $^{14}\text{C}$  e o  $^{12}\text{C}$  na nossa atmosfera é de  $1,3 \times 10^{-12}$ . (O  $^{14}\text{C}$  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  $^{14}\text{C}$  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.