

# Física IV - Poli - Engenharia Elétrica: 21ª Aula (06/11/2014)

Prof. Alvaro Vannucci

Na última aula vimos:

- Energia de ligação nuclear:

$$E_{\text{ligação}} (\text{MeV}) = [ZM(H) + NM_n - M({}_Z^A X)] \times 931,5 \frac{\text{MeV}}{u}$$

- Taxa de decaimento radioativo:

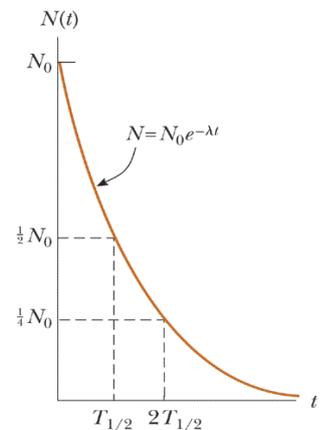
$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \Rightarrow \text{integrando} \Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}; \quad \lambda \equiv \text{constante de desintegração ou de decaimento}$$

- Atividade radioativa de uma amostra com  $N_0$  nucleons:

$$R = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N = N_0 \lambda e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t}; \quad R_0 \equiv \text{atividade radioativa em } t=0$$

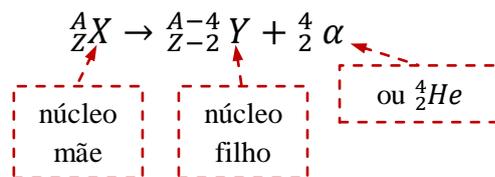
- Meia-vida de uma amostra (tempo para que metade dos núcleos decaia):

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$



➤ Tipos de decaimentos (espontâneos) mais significativos:

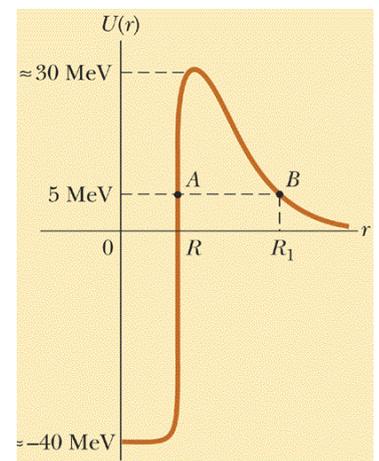
1º) **Desintegração  $\alpha$  (composta de dois prótons e dois nêutrons):**



➤ A energia disponível (na forma de  $E_{\text{cinética}}$  dos produtos da desintegração, principalmente da partícula  $\alpha$ ) após o decaimento é dada por:

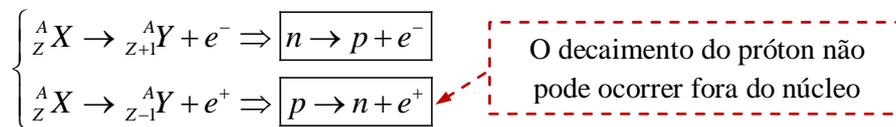
$$Q = [M_X - (M_Y + M_\alpha)] c^2, \quad \text{quando as massas são dadas em kg}$$

➤ A explicação para o decaimento  $\alpha$  espontâneo baseia-se no mecanismo quântico de tunelamento, sendo que  $R$ , na figura, indica a distância da ação nuclear:

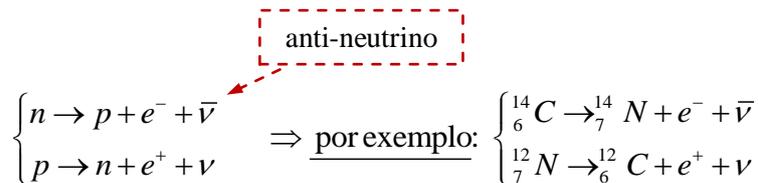


- Exemplos:  $\begin{cases} {}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{H} & ; T_{1/2}({}_{92}^{238}\text{U}) = 4,47 \times 10^9 \text{ anos} \\ {}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{H} & ; T_{1/2}({}_{88}^{226}\text{Ra}) = 1,6 \times 10^3 \text{ anos} \end{cases}$

## 2º) Desintegração $\beta$ (composta de dois prótons e dois nêutrons):



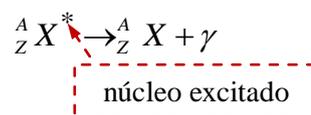
- Nos decaimentos destes tipos, percebeu-se que uma outra partícula deveria existir (neutrino) para que se conservassem a energia, o momento angular e linear totais:



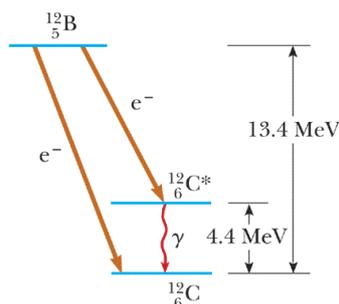
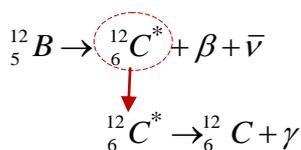
- A reação acima envolvendo o  ${}_{6}^{14}\text{C}$  é comumente utilizada para a datação de amostras arqueológicas (e biológicas).
- Devido ao bombardeamento de raios cósmicos, são produzidos núcleos de  ${}^{14}\text{C}$  na atmosfera terrestre de forma que a razão  ${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$  no dióxido de carbono é mais ou menos constante, aproximadamente  $1,3 \times 10^{-12}$ .
- Os seres vivos (animais, plantas) ao morrerem deixam de absorver carbono da atmosfera, de forma que a razão  ${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$  *diminui* porque o  ${}_{6}^{14}\text{C}$  decai ao longo do tempo ( $T_{1/2}({}_{6}^{14}\text{C}) = 5730 \text{ anos}$ ).

## 3º) Decaimento $\gamma$

- Fóton muito energético é emitido por um núcleo que se encontra excitado, geralmente após sofrer um decaimento  $\alpha$  ou  $\beta$ :



- Exemplo:



- 
- **Exercício:** Uma amostra de carvão com  $m = 25\text{ g}$  foi descoberta nas ruínas de um antigo povoado e a atividade radioativa do  $^{14}\text{C}$  desta amostra foi medida como sendo de 250 integrações por minuto. Determine a data de morte da árvore.

**Resolução:**

- Considerando inicialmente que todos os núcleos de carbono da amostra são do tipo  $^{12}_6\text{C}$  (estáveis), então o número de núcleos será:

$$1\text{ mol} \rightarrow 12\text{ g} \rightarrow 6 \times 10^{23}$$
$$25\text{ g} \rightarrow N_0(^{12}_6\text{C}) \Rightarrow N_0(^{12}_6\text{C}) \sim 1,25 \times 10^{24} \text{ núcleos}$$

- Como a razão:  $\frac{N_0(^{14}\text{C})}{N_0(^{12}\text{C})} = 1,3 \times 10^{-12} \Rightarrow \underline{\underline{N_0(^{14}\text{C}) \sim 1,63 \times 10^{12} \text{ núcleos}}}$

- Sendo que a meia-vida do  $^{14}\text{C}$  é de  $5730 \approx 1,8 \times 10^4 \text{ s}$ , então a atividade inicial da amostra é obtida lembrando que:

$$\underline{\underline{R_0 = N_0 \lambda}}, \text{ onde } \lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} \Rightarrow \underline{\underline{\lambda(^{14}\text{C}) = 3,8 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}}}$$

$$\therefore R_0 \sim 6,25 \text{ desintegrações/s} = 375 \text{ desint./min}$$

- Como foi medida experimentalmente uma atividade  $R = 250 \text{ desint./min}$ , então, usando que  $\underline{\underline{R = R_0 e^{-\lambda t}}}$ :

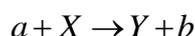
$$\frac{R}{R_0} = e^{-\lambda t} \Rightarrow \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = -\lambda t \Rightarrow \ln\left(\frac{250}{375}\right) = -(3,8 \times 10^{-12})t \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{t \approx 1,05 \times 10^{11} \text{ s} \approx 3300 \text{ anos}}}$$

---

## Reações Nucleares

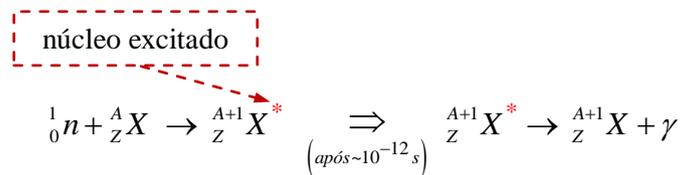
- Quando utilizamos uma partícula qualquer ( $a$ ) para bombardear um elemento-alvo  $X$  e obtemos como resultado um outro elemento  $Y$  e uma outra partícula ( $b$ ), temos então uma reação nuclear:



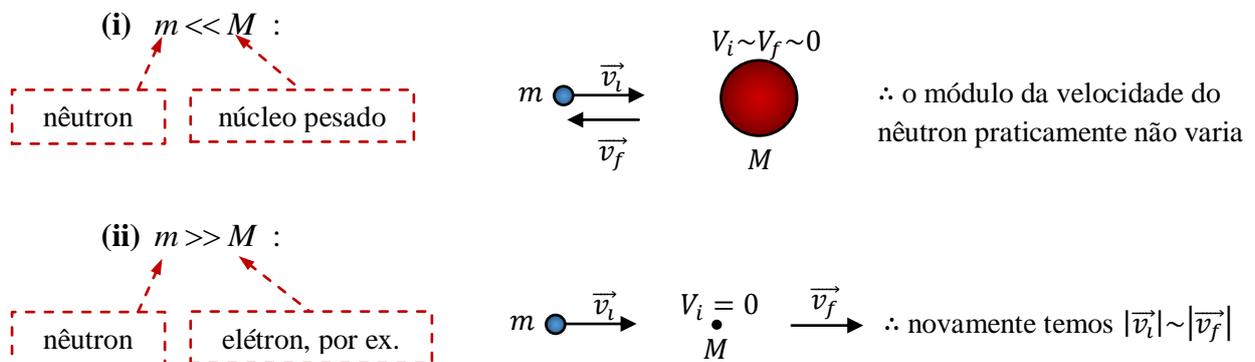
- A variação de massa (energia) de repouso de todos os constituintes, antes e após a reação, fornece a **energia da reação ( $Q$ )**:

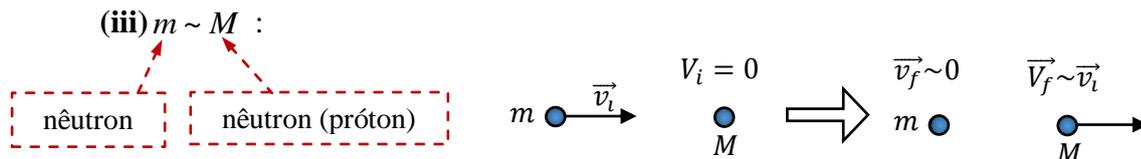
$$\underline{\underline{Q = (M_a + M_X - M_Y - M_b) c^2}}$$

- Se  $Q > 0$  temos uma reação exotérmica, e se  $Q < 0$  temos uma reação endotérmica.
- Uma reação tipo endotérmica não ocorrerá a não ser que a partícula utilizada no bombardeamento tenha energia cinética inicial maior que  $|Q|$ .
- Agora, quando temos uma reação nuclear na qual as partículas **a** e **b** são idênticas e também os núcleos **X** e **Y** são iguais, então temos um evento de **espalhamento**.
- Duas reações nucleares particularmente importantes são as de **Fissão** (de núcleos pesados) e **Fusão** (de núcleos leves).
- Mas antes de abordarmos o processo de fissão nuclear, será importante falarmos um pouco sobre o **nêutron**.
- Como vimos acima, o nêutron livre sofre um decaimento  $\beta$  (com a emissão de um anti-neutrino), transformando-se em um próton. A vida-média do nêutron livre é de aproximadamente 10 minutos.
- Os nêutrons livres, criados a partir de decaimentos nucleares, são geralmente muito energéticos (rápidos), com energias  $E \gtrsim 1\text{MeV}$ .
- Por não terem carga elétrica, eles vão perdendo energia através de sucessivas colisões (eventos de espalhamento).
- Ele se torna *termalizado* quando sua energia  $E \sim kT_{\text{meio}}$ ; e só então haverá uma grande possibilidade dele ser absorvido por um núcleo.



- Agora, por não terem carga e provocarem colisões com núcleos da matéria, como no caso de colisões elásticas entre bolas de bilhar, vamos lembrar do curso de *Física I* a situação de colisão frontal correspondente aos casos:

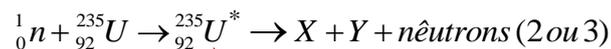




- Ou seja, só se consegue termalizar nêutrons energéticos eficientemente fazendo com que colidam com substâncias constituídas por núcleos leves (poucos nucleons)
- A água ( $H_2O$ ), por exemplo, é constituída por 66% de átomos com apenas 1 próton no núcleo. São, portanto, bons termalizadores de nêutrons.
- Outros materiais que são bons termalizadores (e absorvedores) de nêutrons são o boro e a parafina. Em materiais deste tipo, os nêutrons rápidos são termalizados em  $\Delta t \sim 1ms$ .

### *Fissão nuclear*

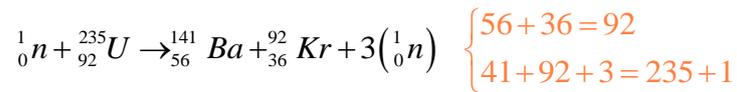
- Processo pelo qual um núcleo grande e pesado como o  $^{235}U$  ou o  $^{239}Pu$  se divide (*fissiona*) em dois ou mais núcleos menores.
- Trata-se de um fenômeno que ocorre naturalmente para certos núcleos mas que também pode ser estimulado (induzido) bombardeando o núcleo físsil com um nêutron lento.
- Reação nuclear correspondente ao  $^{235}_{92}U$  :



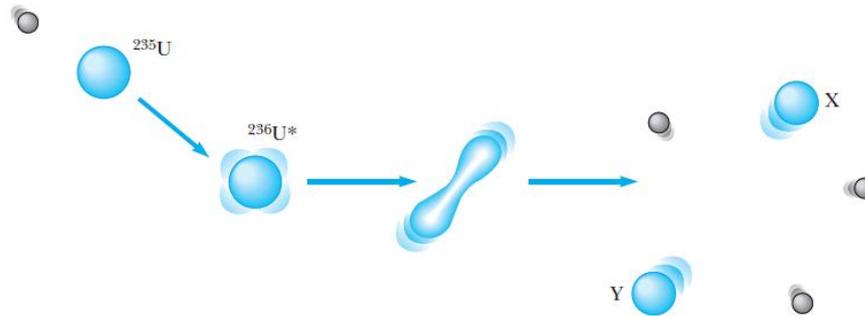
estado intermediário,  
excitado com  $\Delta t \sim 10^{-12}s$

- O fato importante das reações nucleares como esta, é que a soma das massas de repouso dos *produtos da fissão* é menor do que as massas de repouso dos constituintes iniciais (que se transforma em uma grande quantidade de energia :  $E = mc^2$ )
- A energia que se obtém em cada desintegração por fissão é da ordem de  $200MeV$ , que é então transportada pelos produtos da reação.
- Os núcleos resultantes de reação de fissão são chamados de *fragmentos de fissão*.

➤ Por exemplo:

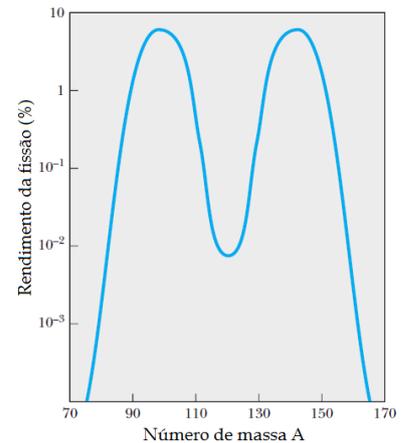


➤ Um modelo teórico que se utiliza para estudar o processo de fissão nuclear é o da *gota líquida*.



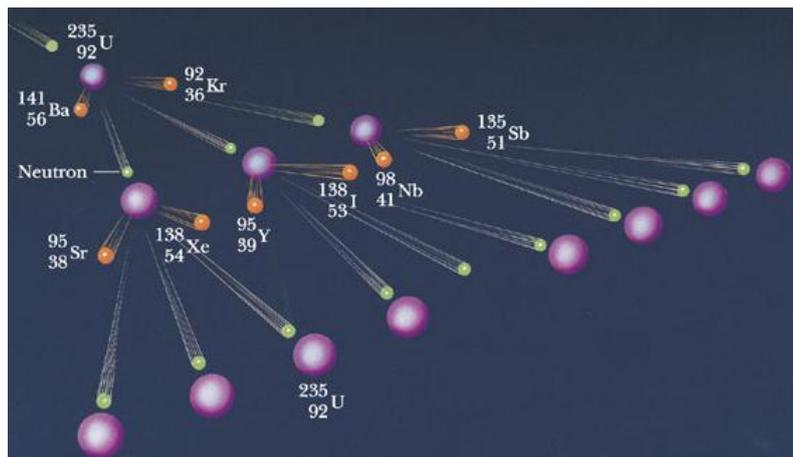
Estágios da fissão nuclear conforme descrito pelo modelo da gota líquida.

➤ Uma constatação experimental interessante é que a fissão se processa de uma *forma assimétrica* (devido ao excesso de nêutrons no núcleo mãe em comparação com o número de prótons) com relação ao tamanho dos fragmentos de fissão, de forma que um deles possui alto ( $A, Z$ ) e o outro baixo ( $A, Z$ ), conforme mostra a figura



A distribuição dos produtos de fissão em função do número de massa, na fissão do  ${}^{235}\text{U}$  por nêutrons térmicos. Observe que a ordenada está em escala logarítmica.

➤ Nos reatores nucleares de fissão, quando um núcleo de  ${}^{235}\text{U}$  fissiona, em média 2,5 nêutrons são produzidos por evento, e é esse fato que acaba provocando a *reação em cadeia*.



- Um reator, com 1kg de  $^{235}\text{U}$ , é capaz de produzir energia equivalente a 20.000 toneladas de *TNT* (dinamite) em um curto intervalo de tempo.
- O controle da reação é feito ajustando o número de nêutrons térmicos disponíveis no reator, através da introdução/retirada de barra de boro ou cádmio.
- Um dos grandes problemas dos reatores a fissão corresponde ao *lixo radioativo* que se trata dos fragmentos de fissão que apresentam geralmente intensa atividade radioativa, com meia-vidas de dezenas ou centenas de anos.
- Como a composição do urânio natural é 0,7% de  $^{235}\text{U}$  (físsil) e 99,3% de  $^{238}\text{U}$  (não físsil, mas pode ser transmutado em plutônio), o urânio deve ser *enriquecido* (aumentada a proporção do  $^{235}\text{U}$ ) para poder se utilizado.

- **Exercício 55 – cap 30:** Uma usina nuclear funciona utilizando a energia liberada na fissão nuclear para converter água a 20°C em vapor a 400°C. Teoricamente, quanta água poderia ser convertida em calor através da fissão completa de 1,00g de  $^{235}\text{U}$  com a liberação de 200MeV / fissão?

Dado:  $C_{\text{água}} = 4185 \text{ J/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ;  $C_{\text{vapor}} = 2010 \text{ J/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$  e  $L_{\text{vapor}} = 2,26 \times 10^6 \text{ J/Kg}$

**Resolução:**

- $1 \text{ mol} \rightarrow 235 \text{ g} \rightarrow 6 \times 10^{23}$  núcleos de  $^{235}\text{U}$   
 $1 \text{ g} \rightarrow N$

$$\therefore N = 2,55 \times 10^{21} \text{ núcleos} \Rightarrow E = 5,1 \times 10^{23} \text{ MeV} = 8,2 \times 10^{10} \text{ J}$$

- $Q = m_a c_a \Delta T_a + m_v c_v \Delta T_v = m(c_a \Delta T_a + c_v \Delta T_v) \Rightarrow$

$$\Rightarrow Q = m[4186(100 - 20) + 2,26 \times 10^6 + 2010(400 - 100)]$$

- Igualando  $Q = E \Rightarrow m = \frac{8,2 \times 10^{10}}{3,2 \times 10^6} = 2,6 \times 10^4 \text{ Kg} = 26 \text{ toneladas de água}$