

# CAPÍTULO 30: Física Nuclear (REVISÃO)

## Algumas Propriedades dos Núcleos

- Carga e Massa
- O Tamanho dos Núcleos
- **Estabilidade Nuclear**

## Energia de Ligação

## Radioatividade

## Os Processos de Decaimento Radioativo

- O Decaimento Alfa, Beta, Gama e Captura de Elétrons

## Datação pelo Carbono 14

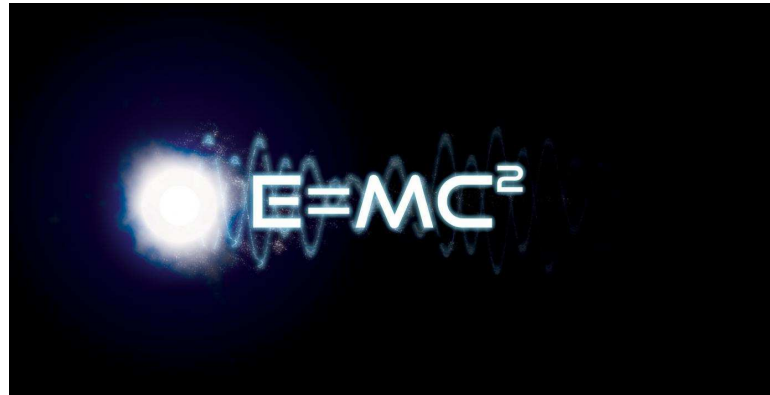
## Reações Nucleares



## **Lista de exercícios sugerida – Capítulo 30:**

**Exs.: 3, 4, 5, 8, 11, 19, 41, 42, 47, 51, 53, 55, 56, 58, 59**

A expressão



significa que uma certa quantidade de massa implica uma quantidade de energia mesmo que a massa esteja em repouso.

Se trata de um conceito ausente na Mecânica Clássica.

Na Mecânica Quântica a energia de repouso de um corpo é o produto da sua massa pelo fator de conversão **(velocidade da luz ao quadrado).**

ou, uma quantidade de energia de um objeto em repouso por unidade da sua própria massa é equivalente à velocidade da luz ao quadrado.

$$\frac{E(\text{MeV})}{m(u)} = c^2 \quad \text{ou} \quad m(u) = \frac{E}{c^2} \left( \frac{\text{MeV}}{c^2} \right)$$

A **diferença de massa** entre os núcleos separados em nucleons e o núcleo (ligado) contendo esses nucleons, quando **multiplicada** pelo **quadrado da velocidade da luz** fornece a energia de ligação do núcleo.  
 Matematicamente temos:

$$E_l = \Delta m \cdot c^2$$

Podemos calcular a energia de ligação de qualquer núcleo  ${}^A_Z X$  utilizando a expressão:

$$E_l(\text{MeV}) = [ZM(H) + Nm_n - M({}^A_Z X)] \times 931,494 \text{ MeV} / u$$

onde  $M(H): 1.007825 = [(m_p = 1.007276) + (m_{e^-} = 5.486 \times 10^{-4})]$

$$E_R = mc^2 = (1.660559 \times 10^{-27} \text{ Kg}) (2.99792 \times 10^8 \text{ m/s})^2 =$$

$$E_R = mc^2 = 931.494 \text{ MeV}$$

## Seção 30.2 – Energia de Ligação

**Exercício 09:** Utilizando o gráfico da figura, que representa a **energia de ligação por nucleon**, em função do número de massa, estime quanta energia é liberada quando um núcleo com número de massa 200 se divide em dois núcleos cada um com número de massa 100.

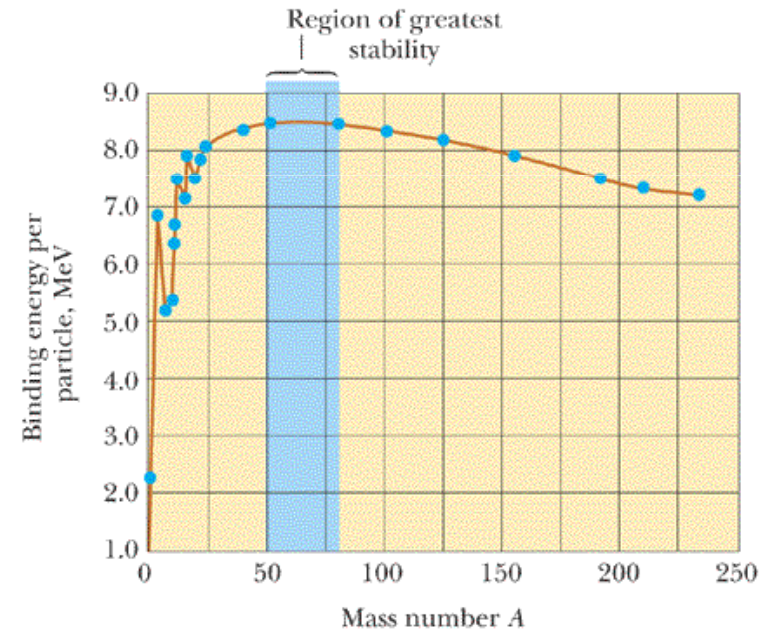
Seaway, Jearns, Principles of Physics, 3/e  
Figure 30.10

$$\Delta E_L = E_{L(i)} - E_{L(f)}$$

$$\text{Do gráfico, para } A = 200: \frac{E_L}{A} \sim 7.4 \text{ MeV}$$

$$\text{Do gráfico, para } A = 100: \frac{E_L}{A} \sim 8.4 \text{ MeV}$$

$$\Delta E_L = E_{L(f)} - E_{L(i)}$$



## Seção 30.2 – Energia de Ligação

**Exercício 09:** Utilizando o gráfico da figura, que representa a **energia de ligação por nucleon**, em função do número de massa, estime a diferença de energia entre o estado inicial e o estado final de um núcleo com número de massa 200 (estado inicial) que se divide em dois núcleos cada um com número de massa 100 (estado final).

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e  
Figure 30.10

$$\Delta E_L = E_{L(i)} - E_{L(f)}$$

Do gráfico, para  $A = 200 \Rightarrow \frac{E_L}{A} \sim 7.4 \text{ MeV}$

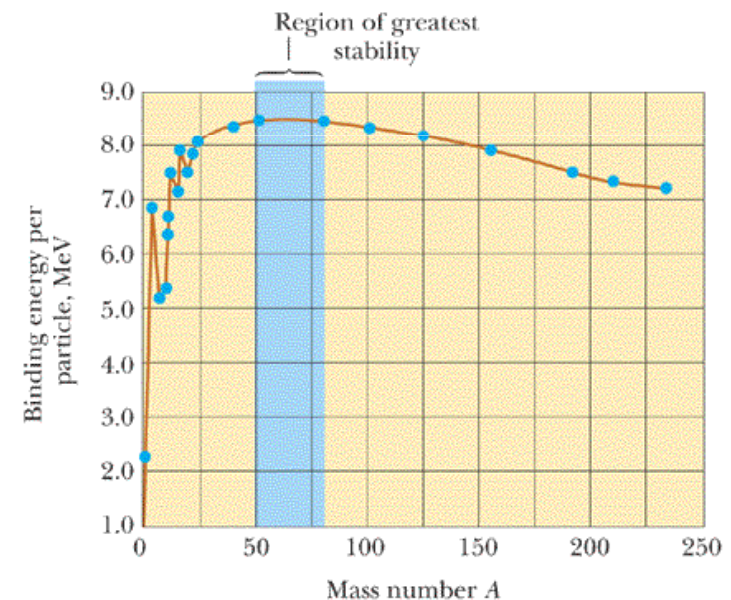
Do gráfico, para  $A = 100 \Rightarrow \frac{E_L}{A} \sim 8.4 \text{ MeV}$

$$E_{L(i)} = 200 \times 7.4 \text{ MeV} = 1480 \text{ MeV}$$

$$E_{L(f)} = 2 \cdot (100 \times 8.4 \text{ MeV}) = 2 \cdot 840 \text{ MeV}$$

$$1680 \text{ MeV}$$

$$\Delta E_L = E_{L(f)} - E_{L(i)} = (1680 - 1480) \text{ MeV} = 200 \text{ MeV}$$



## Energia de Ligação

**Seção 30.2 – Exercício 12** O isótopo  $^{139}_{57}\text{La}$  é estável. Seu isóbaro radioativo

$^{139}_{59}\text{La}$  localiza-se abaixo da linha de núcleos estáveis e desintegra-se por

emissão beta ( $e^+$ ). Um outro isóbaro radioativo do  $^{139}\text{La}$ , o  $^{139}_{55}\text{Cs}$

desintegra-se por emissão beta ( $e^-$ ) e localiza-se acima da linha de núcleos estáveis. (a) Qual dos isóbaros tem a maior razão entre o número de nêutrons e o número de prótons?

(b) Qual dos isóbaros do La tem a maior energia de ligação?

Considere  $M(^{139}\text{La}) \approx 138.90634u$

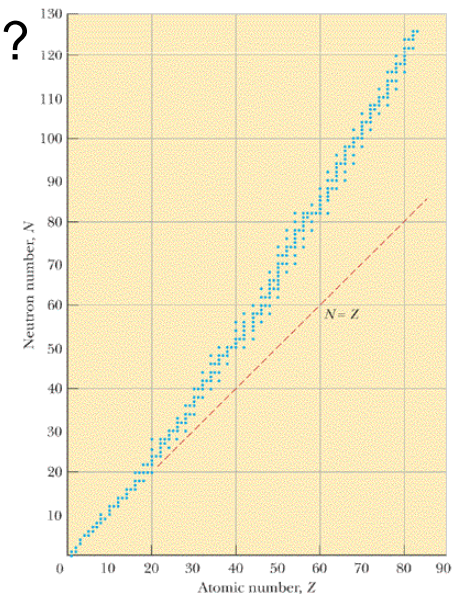
Próton:  $1.6726 \times 10^{-27} \text{ Kg} \rightarrow u = 1.007276$

$M(H): 1.007825 = 1.007276 + (5.486 \times 10^{-4})$

Nêutron:  $1.6750 \times 10^{-27} \text{ Kg} \rightarrow m_n = 1.008665$

$$E_l(\text{MeV}) = \left[ ZM(H) + Nm_n - M\left(\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X \right) \right] \times 931,494 \text{ MeV} / u$$

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e  
Figure 30.4



Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

(a) Qual dos isóbaros tem a maior razão entre o número de nêutrons e o número de prótons?

$${}^{139}_{59}\text{La} \quad {}^{139}_{57}\text{La} \quad {}^{139}_{55}\text{Cs} \quad \frac{A-Z}{Z} = \frac{139-59}{59} = 1.355$$

$$\frac{A-Z}{Z} = \frac{139-57}{57} = 1.438$$

$$\frac{A-Z}{Z} = \frac{139-55}{55} = 1.527$$

(b) Qual dos isótopos tem a maior energia de ligação?

$$\text{Próton} : 1.6726 \times 10^{-27} \text{ Kg} \rightarrow u = 1.007276$$

$$M(H) : 1.007825 u = 1.007276 + (5.486 \times 10^{-4})$$

$$\text{Nêutron} : 1.6750 \times 10^{-27} \text{ Kg} \rightarrow m_n = 1.008665$$

$$E_l(\text{MeV}) = \left[ ZM(H) + Nm_n - M\left({}^A_Z X\right) \right] \times 931,494 \text{ MeV} / u$$

**(b) Qual deles tem a maior energia de ligação?**

$$E_l(\text{MeV}) = [ZM(H) + Nm_n - M({}_Z^A X)] \times 931,494 \text{MeV} / u$$

Para o  ${}_{57}^{139}\text{La}$  :  $E_l(\text{MeV}) =$

$$[57(1.007825u) + 82(1.008665u) - 138.906346u] \times 931,494 \text{MeV} / u$$

$$E_l(\text{MeV}) = 1164.56 \text{MeV}$$

$$\frac{E_l}{\text{nucleon}} = \frac{1164.56 \text{MeV}}{139} = 8.378 \text{MeV}$$

Para o  ${}_{59}^{139}\text{La}$  :  $E_l(\text{MeV}) =$

$$[59(1.007825u) + 80(1.008665u) - 138.906346u] \times 931,494 \text{MeV} / u$$

$$1162.99 = \text{MeV}$$

$$\frac{E_l}{\text{nucleon}} = \frac{1162.99 \text{MeV}}{139} = 8.367 \text{MeV}$$



# CAPÍTULO 30: Física Nuclear (REVISÃO)

## Algumas Propriedades dos Núcleos

- Carga e Massa
- O Tamanho dos Núcleos
- Estabilidade Nuclear

## Energia de Ligação

## Radioatividade

## Os Processos de Decaimento Radioativo

- O Decaimento Alfa, Beta, Gama e Captura de Elétrons

## Datação pelo Carbono 14

## Reações Nucleares



## **Lista de exercícios sugerida – Capítulo 30:**

**Exs.: 3, 4, 5, 8, 11, 19, 41, 42, 47, 51, 53, 55, 56, 58, 59**

## Seção 30.3 – Radioatividade

**Exercício 16:** Quanto tempo transcorre antes de que a radioatividade de

uma amostra de  ${}_{33}^{72}\text{As}$  **diminua de 90%**, sabendo que sua meia vida é de 26 horas?

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

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

## Seção 30.3 – Radioatividade

**Exercício 16:** Quanto tempo transcorre antes de que a radioatividade de

uma amostra de  ${}_{33}^{72}\text{As}$  **diminua de 90%**, sabendo que sua meia vida é de 26 horas?

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

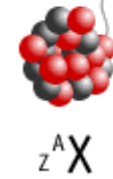
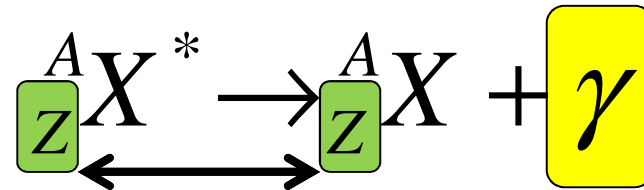
$$\lambda = \frac{\ln 2}{26 \text{ horas}} = 0.0266 \frac{1}{\text{horas}}$$

$$\frac{A}{A_0} = 0.10 = e^{-\lambda t} \Rightarrow \ln(0.10) = -\lambda t \Rightarrow 2.303 = \left( \frac{0.0267}{\text{horas}} \right) t$$

$$t \approx 86.3 \text{ horas}$$

# Radiatividade $\alpha$ (alfa), $\beta$ (beta), $\gamma$ (gama)

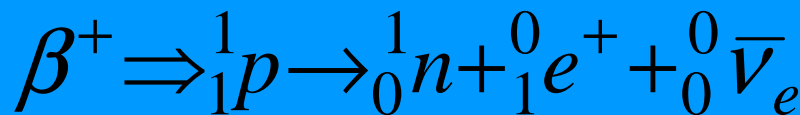
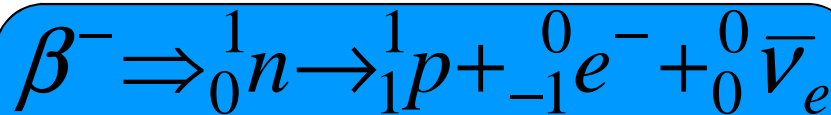
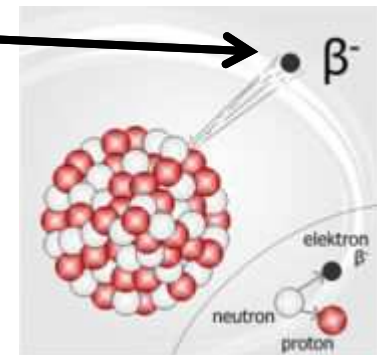
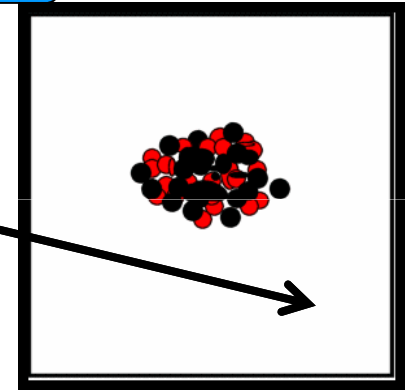
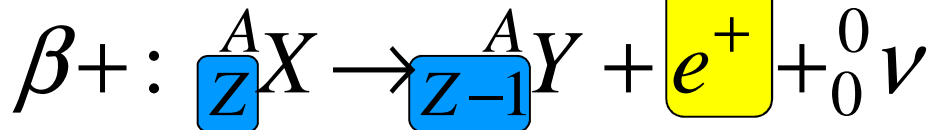
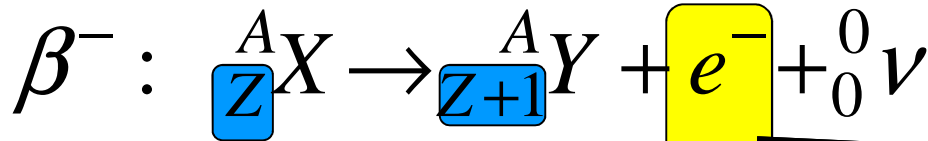
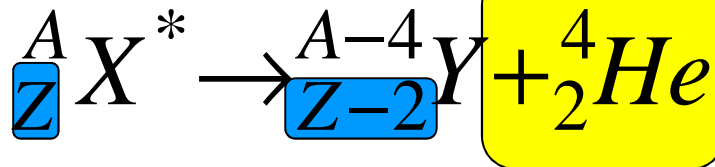
Decaimento  $\gamma$ -gama **não muda o número atômico (Z)**



Gamma ( $\gamma$ ) decay

Decaimento  $\alpha$  (alfa) e  $\beta$  (beta) **muda o número atômico**

M  
U  
D  
A  
Z

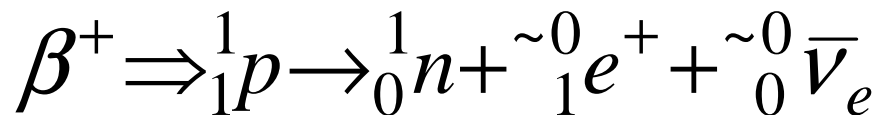
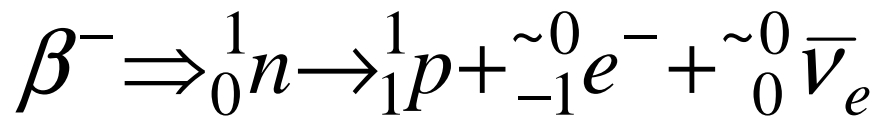
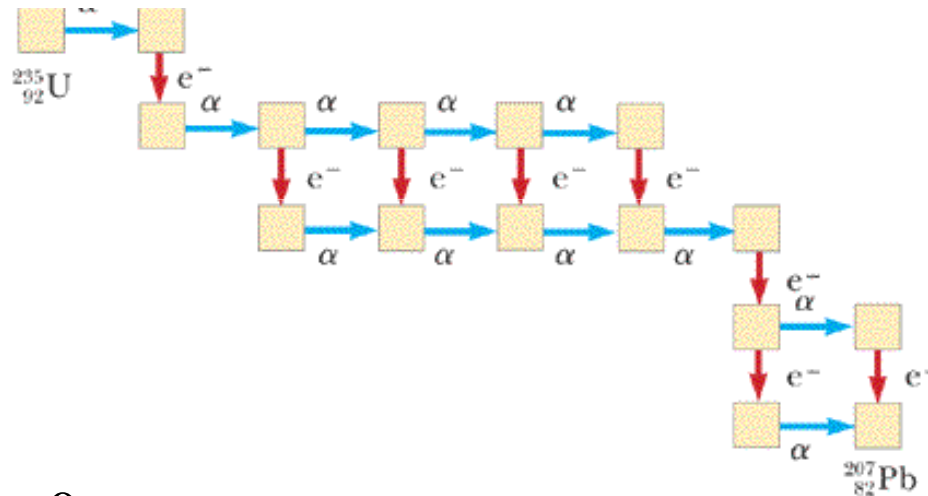
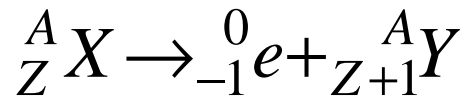
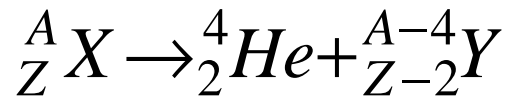
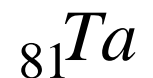
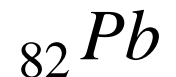
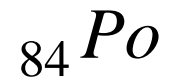
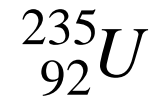


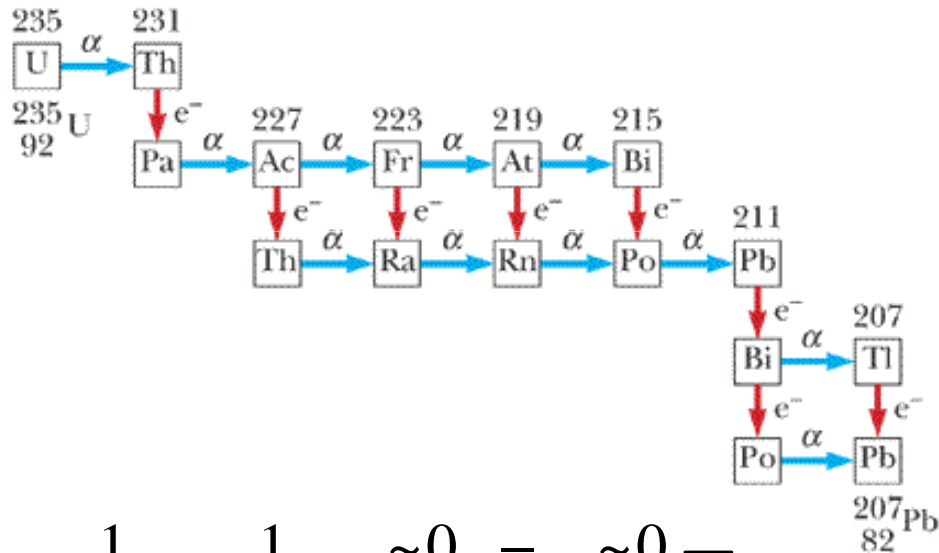
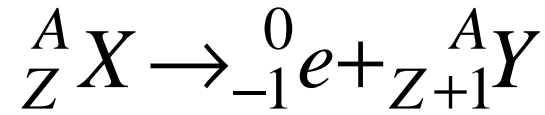
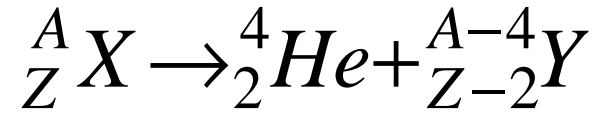
**CONSERVAÇÃO de CARGA e MASSA**

## Seção 30.4 – Os Processos de Decaimento Radioativo

### Conservação de carga e massa

**Exercício 27:** A figura mostra as sequências de desintegrações na série radioativa que começa com o U-235 (Z=92) e termina com o núcleo estável do chumbo Pb-207. Complete, cada quadrado, com o elemento “X” correto, identificando seu número de massa (A) e de carga (Z).





${}^{235}_{92} \text{U}$

${}_{91} \text{Pa}$

${}_{90} \text{Th}$

${}_{89} \text{Ac}$

${}_{88} \text{Ra}$

${}_{87} \text{Fr}$

${}_{86} \text{Rn}$

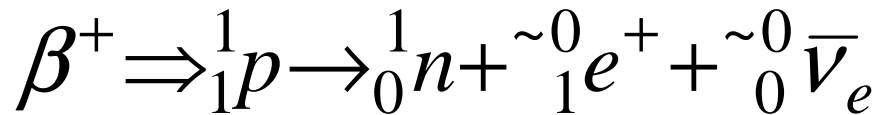
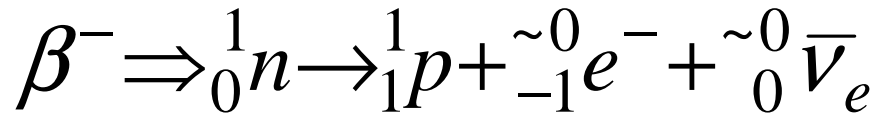
${}_{85} \text{At}$

${}_{84} \text{Po}$

${}_{83} \text{Bi}$

${}_{82} \text{Pb}$

${}_{81} \text{Ta}$



O decaimento do Radio-226 é mostrado na figura abaixo.

Além das **regras para o número de massa e para o número atômico**, a **energia total do sistema precisa ser conservada** no decaimento.

Chamando de

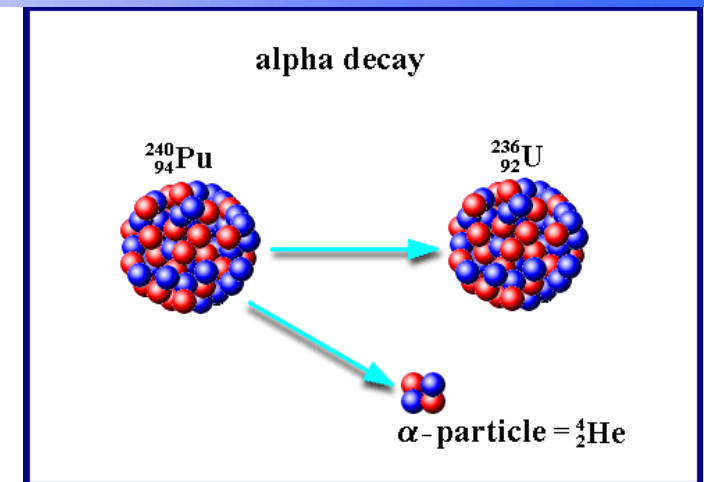
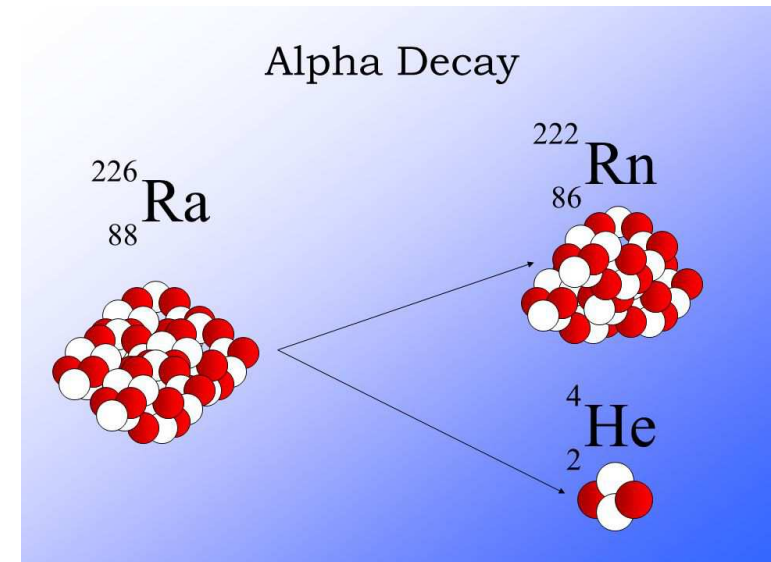
- $M_X$  a massa do núcleo-pai;
- $M_Y$  a massa do núcleo-filho;
- $M_\alpha$  a massa da partícula alfa.

Podemos definir a **energia de desintegração**:

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

Representa a parte **da energia de ligação** que aparece na forma de **energia cinética do núcleo filho e da partícula alfa**:

$$Q \equiv (M_X - M_Y - M_\alpha) \times 931.494 \text{ MeV} / u$$



A **diferença de massa** entre os núcleos separados em nucleons e o núcleo (ligado) contendo esses nucleons, quando **multiplicada** pelo **quadrado da velocidade da luz** fornece a energia de ligação do núcleo.  
 Matematicamente temos:

$$E_l = \Delta m \cdot c^2$$

Podemos calcular a energia de ligação de qualquer núcleo  ${}^A_Z X$   
 utilizando a expressão:

$$E_l (MeV) = [ZM(H) + Nm_n - M({}^A_Z X)] \times 931,494 MeV / u$$

onde  $M(H): 1.007825 = [(m_p = 1.007276) + (m_{e^-} = 5.486 \times 10^{-4})]$

$$E_R = mc^2 = (1.660559 \times 10^{-27} \text{ Kg}) (2.99792 \times 10^8 \text{ m/s})^2 =$$

$$E_R = mc^2 = 931.494 MeV$$



# CAPÍTULO 30: Física Nuclear (REVISÃO)

## Algumas Propriedades dos Núcleos

- Carga e Massa
- O Tamanho dos Núcleos
- Estabilidade Nuclear

## Energia de Ligação

## Radioatividade

## Os Processos de Decaimento Radioativo

- O Decaimento Alfa, Beta, Gama e Captura de Elétrons

## Datação pelo Carbono 14

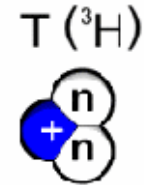
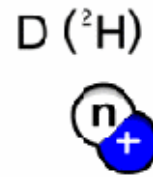
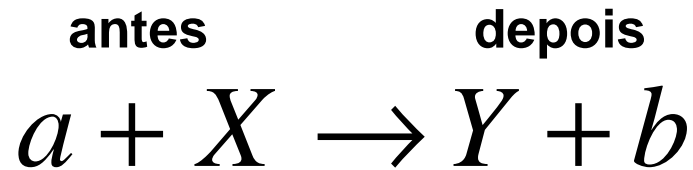
## Reações Nucleares



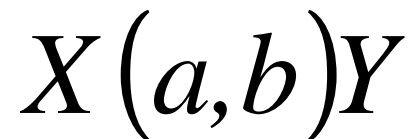
## **Lista de exercícios sugerida – Capítulo 30:**

**Exs.: 3, 4, 5, 8, 11, 19, 41, 42, 47, 51, 53, 55, 56, 58, 59**

Podem ocorrer reações nucleares quando um **núcleo alvo X** é **bombardado por uma partícula “a”**, resultando em um **núcleo “Y”** e em uma **partícula emergente “b”**:



OU



A chamada energia de reação “Q” é definida como a variação total na energia de repouso, que surge em consequência da reação, e é dada por:

$$Q = (M_a + M_X - M_Y - M_b)c^2$$

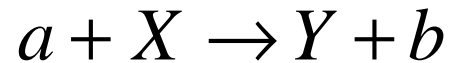
## A REAÇÃO

é chamada de **exotérmica** quando **Q** é positivo.

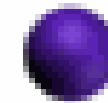
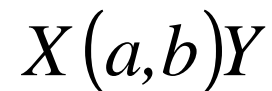
é chamada de **endotérmica** quando “**Q**” é negativa.

A energia cinética mínima da partícula incidente necessária para ocorrer essa reação é chamada de **limiar de energia**.

Considerando



ou



se ocorrer uma **reação nuclear** na qual as partículas a e b são idênticas, de tal forma que X e Y também serão idênticas, a reação é chamada de “**espalhamento**”.

Se a **energia cinética** é **conservada** durante o espalhamento, isto é,  $Q=0$ , o evento é classificado como **espalhamento elástico**.

$$Q = (M_a + M_X - M_Y - M_b)c^2$$

## Seção 30.5 – Reações Nucleares

**Exercício 35:** Em 1980, foram estimadas  $10^9$  toneladas de urânio natural com concentrações excedendo 100 partes por milhão, entre as quais, 0.7% é do isótopo fissionável U-235.

Suponha que toda a utilização de energia mundial, para efeito de cálculo, seja  $(7 \times 10^{12} \text{ J / s})$

E que esta energia fosse fornecida pela fissão do U-235 nos reatores nucleares convencionais, liberando 208MeV em cada reação (conforme calculado na aula passada). Por quanto tempo duraria o estoque (estimado em 1980)?

$$235 \text{ g U} \rightarrow 6.02 \times 10^{23} \text{ núcleos } - {}^{235}\text{U}$$

massa de  $^{235}\text{U}$  disponível (1980)  $\equiv$

$$0.007 \times 10^9 \text{ ton} \times \left( \frac{10^6 \text{ g}}{1 \text{ ton}} \right) = 7 \times 10^{12} \text{ g}$$

$$235 \text{ g} \rightarrow 6.02 \times 10^{23} \text{ núcleos}$$

$$7 \times 10^{12} \text{ g} \rightarrow X$$

$$X = \left( \frac{7 \times 10^{12} \text{ g} \times 6.02 \times 10^{23} \text{ núcleos}}{235 \text{ g}} \right) = 1.8 \times 10^{34} \text{ núcleos}$$

A energia disponível por fissão (208 MeV/evento) é:

$$E \sim (1.8 \times 10^{34} \text{ eventos}) (208 \text{ MeV / evento}) (1.60 \times 10^{-13} \text{ J / MeV})$$

$$E \sim 6 \times 10^{23} \text{ J}$$

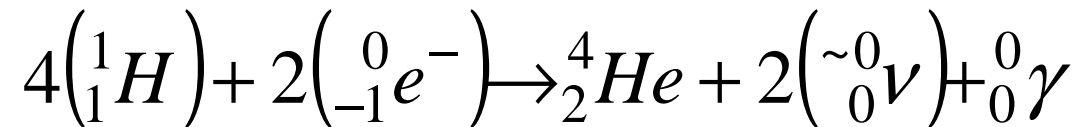
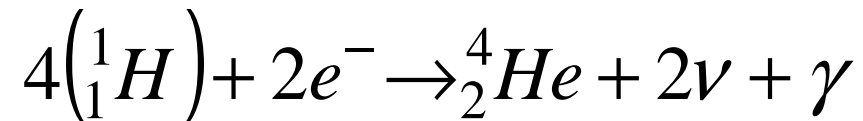
$$\Delta t = \frac{E}{P} \sim \frac{6.0 \times 10^{23} \text{ J}}{7.0 \times 10^{12} \text{ J / s}} = (8.6 \times 10^{10} \text{ s}) \left( \frac{1 \text{ ano}}{3.16 \times 10^7 \text{ s}} \right) \sim 2727 \text{ anos}$$

## Seção 30.6 – O Motor das Estrelas

### Exercício 36:

O sol irradia energia à taxa de  $3.77 \times 10^{26} \text{ W}$

Suponha que a reação resultante é dada por:



A partir da energia nuclear de repouso liberada que obedece  $E = mc^2$  temos a variação da energia total de repouso como consequência da reação nuclear dada por

$$Q \equiv (MX - MY)c^2$$

$$Q = (\Delta m)c^2$$

Calcule o número de prótons que são fundidos por segundo.

$$M(H): 1.007825 = 1.007276 + (5.486 \times 10^{-4})u$$

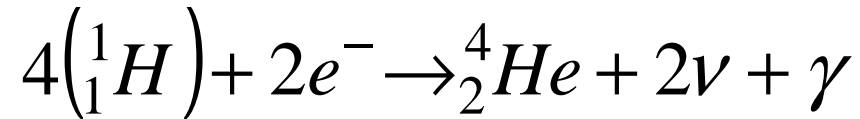
$$M({}_2^4\text{He}): 4.002602 u$$

## Seção 30.6 – O Motor das Estrelas

### Exercício 36:

O sol irradia energia à taxa de  $3.77 \times 10^{26} \text{ W}$

Suponha que a reação resultante



A partir da energia liberada

$$Q \equiv (MX - MY)c^2$$

$$Q = (\Delta m)c^2$$

Calcule o número de prótons que são fundidos por segundo.

$$Q = (\Delta m)c^2 = [4(1.007825) - 4.002602]u(931.5 \text{ MeV} / u) = 26.7 \text{ MeV}$$

$$Q = 26.7 \text{ MeV} \cdot (1.60 \times 10^{-13} \text{ J} / \text{MeV}) = 4.28 \times 10^{-12} \text{ J}$$

$$\frac{3.77 \times 10^{26} \text{ J} / \text{s}}{(4.28 \times 10^{-12} \text{ J}) / (4 \text{ prótons})} = 3.53 \times 10^{38} \text{ protons} / \text{s}$$

## Seção 30.6 – O motor das estrelas

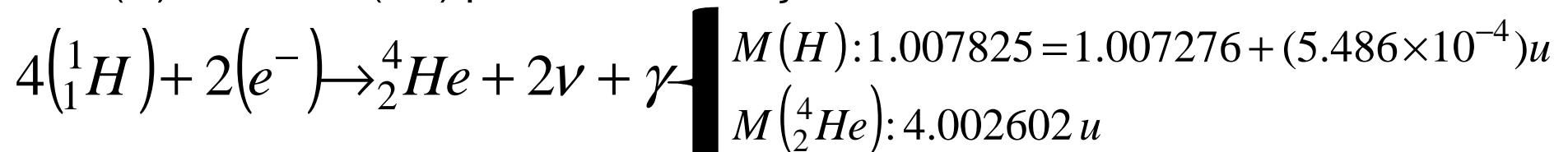
**Exercício 39:** Após determinar que o SOL tem existido por centenas de milhões de anos, logo antes da descoberta da Física Nuclear, os cientistas não podiam explicar por que o SOL tem continuado a “queimar” por um tempo tão longo. Por exemplo, se fosse um fogo gerado pelo carvão, teria queimado por cerca de 3000 anos. Suponha que o sol, cuja massa é:

$$M_{sol} = 1.99 \times 10^{30} \text{ Kg}$$

fosse constituído originalmente só de hidrogênio e que sua potência de emissão total seja de

$$P_{sol} = 3.77 \times 10^{26} \text{ W}$$

(a) Se o mecanismo de geração de energia do sol é a fusão do hidrogênio (H) em Hélio (He) por meio da reação resultante



Calcule a energia (em joules) liberada por essa reação.

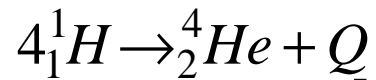
(b) Determine por quantos átomos de H o sol é constituído, considerando a massa de um átomo de H

$$m_H = 1.67 \times 10^{-27} \text{ Kg}$$

(c) Supondo que a potência total emitida permanece constante, após quanto tempo todo o H terá sido convertido em He, causando a morte do sol?



O tempo de vida real projetado do Sol é de aproximadamente 10 bilhões de anos, pois somente o H no núcleo relativamente pequeno está disponível como combustível. Apenas no núcleo as temperaturas e densidades são suficientemente altas para que a reação de fusão seja auto-sustentável.



$$Q = (\Delta m)c^2 = \left[ 4M_{{}_1^1\text{H}} - M_{{}_2^4\text{He}} \right] c^2$$

$$Q = [4(1.007825u) - 4.002602u](931.5 \text{ MeV} / u) \left( \frac{1.60 \times 10^{-13} \text{ J}}{1 \text{ MeV}} \right) = 4.28 \times 10^{-12} \text{ J}$$

$$(b) N = \frac{1.99 \times 10^{30} \text{ Kg}}{1.67 \times 10^{-27} \text{ Kg} / \text{átomo}} = 1.19 \times 10^{57} \text{ prótons}$$

$$(c) \left( 1.19 \times 10^{57} \text{ prótons} \right) \left( \frac{4.28 \times 10^{-12} \text{ J}}{4 \text{ prótons}} \right) = 1.27 \times 10^{45} \text{ J}$$

$$P = \frac{E}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{E}{P} = \frac{1.27 \times 10^{45} \text{ J}}{3.77 \times 10^{26} \text{ W}} = 3.37 \times 10^{18} \text{ s} \sim 107 \text{ bilhões de anos}$$