AULA 2

Energia de Ligação e de Separação

META:

Inroduzir conceitos de energia de ligação e energia de separação de núcleos.

OBJETIVOS:

Determinar energia de ligação de núcleos em unidades de energia e em unidades de massa atômica.

Determinar energia de ligação média de núcleos.

Determinar energia de separação de núcleos por partes.

Determinar energia de separação de próton, nêutron e partúcula alfa de núcleo.

PRÉ-REQUISITOS

Os conhecimentos de determinação de massa de núcleos da Aula 1.

2.1 Energia de Ligação

Outra característica importante de núcleos é a energia de ligação, E_l. Energia de ligação de um núcleo ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ designa-se como

$$E_l\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right) \tag{2.22}$$

ou simplesmente

$$E_l\left(Z, A\right) \tag{2.23}$$

O significação física da energia de ligação é a energia mínima necessária para desintegração de um núcleo por núcleons e calculada por fórmula

$$E_l\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right) = E_l\left(Z, A\right) = ZM_p + NM_n - M\left(Z, A\right) \tag{2.24}$$

A energia de ligação caracteriza o grau de firmeza de um núcleo. Quanto maior a energia de ligação tanto o núcelo é mais firme e, então, precisa mais energia para desintegrar o núcleo. Geralmente energia de ligação é expressa em MeV.

A energia de ligação calcule-se também usando as massas atômicas em vez de massas nucleares. Adicionando e subtraindo Z massa de Z elétrons na fórmula (2.24) temos

$$\begin{aligned} E_l\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right) &= E_l\left(Z, A\right) \\ &= ZM_p + ZM_e + NM_n - M\left(Z, A\right) - ZM_e \\ &= Z\left(M_p + M_e\right) + NM_n - \left(M\left(Z, A\right) + ZM_e\right) \end{aligned} \tag{2.25}$$

Observando que $(M_p + M_e)$ é a massa do átomo de hidrogênio

$$M_p + M_e = M_{at}\left({}^{1}_{1}\mathrm{H}\right) \tag{2.26}$$

e $(M(Z,A) + ZM_e)$ é a massa do átomo ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$

$$M(Z,A) + ZM_e = M_{at}(Z,A) \tag{2.27}$$

podemos escrever

$$E_l\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right) = E_l(Z,A) = ZM_{at}\left({}^{1}_{1}\mathrm{H}\right) + NM_n - M_{at}(Z,A) \tag{2.28}$$

Energia de ligação pode ser calculada também por meio de defeitos de massa de núcleos ou de nuclídeos. Da fórmula (2.24) e da definição do defeito de massa de núcleo (1.14) temos

$$E_l\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right) = E_l(Z,A) = ZM_p + NM_n - M(Z,A)$$

$$= Z(\Delta(1,1) + 1) + N(\Delta(0,1) + 1) - (\Delta(Z,A) + A)$$

$$= Z\Delta_p + N\Delta_n + Z + N - \Delta(Z,A) - A$$

$$= Z\Delta_p + N\Delta_n - \Delta(Z,A)$$

pois $Z + N = A$. Então

$$E_l\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right) = E_l(Z,A) = Z\Delta_p + N\Delta_n - \Delta(Z,A) \tag{2.29}$$

Ou lembrando que $\Delta_p = \delta_p - M_e$ e $\Delta(Z,A) = \delta(Z,A) - ZM_e$ podemos receber a fórmula que usa os defeitos de massa de nuclídeos

$$E_l\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right) = E_l(Z,A) = Z(\delta_p - M_e) + N\delta_n - (\delta(Z,A) - ZM_e)$$

$$= Z\delta_p - ZM_e + N\delta_n - \delta(Z,A) + ZM_e$$

$$= Z\delta_p + N\delta_n - \delta(Z,A)$$

Então recebemos mais uma fórmula para cálculo de energia de ligação

$$E_l\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right) = E_l(Z,A) = Z\delta_p + N\delta_n - \delta(Z,A) \tag{2.30}$$

Na última fórmula podem ser usados os dados da Tabela 1.1. Claro que na fórmula (2.30) o resultado é recebido em uma e é necessário tranforma-lo em MeV.

Exemplo

Determinar energia de ligação da partícula alfa.

Solução

Lembrando que a partícula alfa é o núcleo de hidrogênio ${}_2^4\text{He}$, da fórmula (2.30) recebemos

$$E_l\left({}_2^4\text{He}\right) = E_l\left(2,4\right) = 2\delta_p + 2\delta_n - \delta\left(2,4\right) \qquad (2.31)$$

Encontrando na Tabela 1.1 os defeitos de massa de nuclídeos $\delta_p = \delta\left(1,1\right) = 0{,}00783$, $\delta_n = 0{,}00867$, $\delta\left(2,4\right) = 0,00260$, substituimos os na fórmula (2.31)

$$E_l\left({}_2^4\text{He}\right) = 2 \cdot 0.00783 + 2 \cdot 0.00867 - 0.00260 = 0.0304 \text{ uma}$$

Transformando uma em MeV recebemos a energia de ligação da partícula α

$$E_l\left(\alpha\right) = E_l\left({}_2^4\text{He}\right) = 0.0304 \cdot 931.5 = 28.318 \text{ MeV}$$

2.2 Energia de Ligação Média

Energia de ligação média para um núcleo ${}_Z^A\text{X}$ é definida como

$$\varepsilon\left(Z,A\right) = \frac{E_l\left(Z,A\right)}{A} \qquad (2.32)$$

Gráfico da ε versus A para isóbaros mais estáveis é mostrado na Figura 2.1. A curva de ε cresce até o seu valor máximo de $\varepsilon_{\max} = 8,8$ MeV que é atingido para $A = 56$ que corresponde ao ferro. Depois do valor máximo a curva gradualmente decresce.

Para nucleos com A maior de 20 pode ser usada aproximação para energia de ligação média $\varepsilon \approx 8,0$ MeV, tal que energia de ligação pode ser aproximadamente estimada como

$$E_l\,(Z, A) \approx A \cdot 8,0 \text{ MeV} \tag{2.33}$$

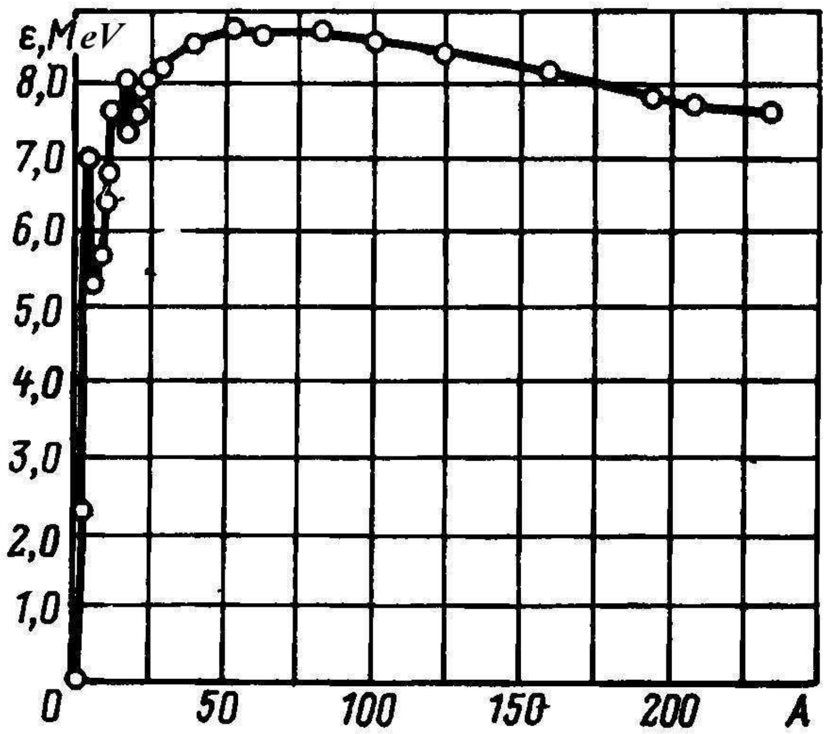

Figura 2.1: Energia de ligação média ε versus número de massa A

2.3 Energia de Separação

Analogamente à energia de ligação introduze-se o conceito de energia de separação de núcleo por partes. Por exemplo um núcleo ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ é separado por dois núcleos ${}^{A_1}_{Z_1}\mathrm{X}_1$ e ${}^{A_2}_{Z_2}\mathrm{X}_2$

$${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}\mathrm{X}_1 + {}^{A_2}_{Z_2}\mathrm{X}_2 \tag{2.34}$$

onde devem ser satisfeitas as condições

$$A_1 + A_2 = A \tag{2.35}$$

e

$$Z_1 + Z_2 = Z \tag{2.36}$$

A energia de separação é determinada pela fórmula

$$E_s\left({}_Z^A\mathrm{X}\right)\left[{}_{Z_1}^{A_1}\mathrm{X}_1 + {}_{Z_2}^{A_2}\mathrm{X}_2\right] =$$

$$= M\left(Z_1, A_1\right) + M\left(Z_2, A_2\right) - M\left(Z, A\right) \tag{2.37}$$

Nos colchetes ao lado esquerdo da fórmula são indicados os núcleos em quais ocorre separação do núcleo inicial. Para alguns núcleos a energia de separação por partes calculada pela fórmula (2.37) pode dar um valor negativo. Neste caso tal núcleo é instável e sofre separação espontânea por partes indicadas.
Energia de separação pode ser calculada por meio de defeitos de massa de núcleos. Aplicando a definição do defeito de massa de núcleos (1.14) na fórmula (2.37), temos

$$E_s\left({}_Z^A\mathrm{X}\right)\left[{}_{Z_1}^{A_1}\mathrm{X}_1 + {}_{Z_2}^{A_2}\mathrm{X}_2\right] = \Delta\left(Z_1, A_1\right) + A_1$$

$$+\Delta\left(Z_2, A_2\right) + A_2 - \Delta\left(Z, A\right) - A$$

e como $A_1 + A_2 = A$, recebemos que

$$E_s\left({}_Z^A\mathrm{X}\right)\left[{}_{Z_1}^{A_1}\mathrm{X}_1 + {}_{Z_2}^{A_2}\mathrm{X}_2\right] =$$

$$= \Delta\left(Z_1, A_1\right) + \Delta\left(Z_2, A_2\right) - \Delta\left(Z, A\right) \tag{2.38}$$

Usando agora a relação entre defeitos de massa de núcleos e nuclídeos (1.18), temos

$$E_s\left({}_Z^A\mathrm{X}\right)\left[{}_{Z_1}^{A_1}\mathrm{X}_1 + {}_{Z_2}^{A_2}\mathrm{X}_2\right] = \delta\left(Z_1, A_1\right) - Z_1 M_e$$

$$+\delta(Z_2, A_2) - Z_2 M_e - \delta(Z, A) + Z M_e$$

e como $Z_1 + Z_2 = Z$, recebemos

$$E_s\left({}^A_Z\text{X}\right)\left[{}^{A_1}_{Z_1}\text{X}_1 + {}^{A_2}_{Z_2}\text{X}_2\right] =$$

$$= \delta(Z_1, A_1) + \delta(Z_2, A_2) - \delta(Z, A) \qquad (2.39)$$

na última fórmula já diretamente pode ser usados os dados da tabela de defeitos de massas de nuclídeos.

Outra maneira de cálculo de energia de separação é por meio de energias de ligação do núcleo inicial e dos nucleos produzidos que são dadas como

$$E_l\left({}^A_Z\text{X}\right) = E_l(Z, A) = Z M_p + N M_n - M(Z, A)$$

$$E_l\left({}^{A_1}_{Z_1}\text{X}_1\right) = E_l(Z_1, A_1) = Z_1 M_p + N_1 M_n - M(Z_1, A_1)$$

$$E_l\left({}^{A_2}_{Z_2}\text{X}_2\right) = E_l(Z_2, A_2) = Z_2 M_p + N_2 M_n - M(Z_2, A_2)$$

Tal que as massas dos núcleos são

$$M(Z, A) = Z M_p + N M_n - E_l(Z, A) \qquad (2.40)$$

$$M(Z_1, A_1) = Z_1 M_p + N_1 M_n - E_l(Z_1, A_1) \qquad (2.41)$$

$$M(Z_2, A_2) = Z_2 M_p + N_2 M_n - E_l(Z_2, A_2) \qquad (2.42)$$

Substituimdo as fórmulas (2.40), (2.41), (2.42) na fórmula (2.37) temos

$$E_s\left({}^A_Z\text{X}\right)\left[{}^{A_1}_{Z_1}\text{X}_1 + {}^{A_2}_{Z_2}\text{X}_2\right] = Z_1 M_p + N_1 M_n - E_l(Z_1, A_1)$$

$$+Z_2 M_p + N_2 M_n - E_l(Z_2, A_2) - Z M_p - N M_n + E_l(Z, A)$$

$$= (Z_1 + Z_2) M_p + (N_1 + N_2) M_n - E_l(Z_1, A_1) - E_l(Z_2, A_2)$$

$$-Z M_p - N M_n + E_l(Z, A)$$

Como $Z_1 + Z_2 = Z$ e $N_1 + N_2 = N$, recebemos

$$E_s\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right)\left[{}^{A_1}_{Z_1}\mathrm{X}_1 + {}^{A_2}_{Z_2}\mathrm{X}_2\right] =$$

$$= E_l\left(Z, A\right) - E_l\left(Z_1, A_1\right) - E_l\left(Z_2, A_2\right) \tag{2.43}$$

Em alguns casos pode ocorrer separação de um núcleo por mais de duas partes. Por exemplo por n partes. Simbolicamente escrevemos essa separação como

$${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}\mathrm{X}_1 + {}^{A_2}_{Z_2}\mathrm{X}_2 + \ldots + {}^{A_n}_{Z_n}\mathrm{X}_n \tag{2.44}$$

Nesse caso também devem ser satisfeitas as condições

$$A_1 + A_2 + \ldots + A_n = A \tag{2.45}$$

$$Z_1 + Z_2 + \ldots + Z_n = Z \tag{2.46}$$

Generalização das fórmulas (2.37), (2.38), (2.39), (2.43) para este caso é óbvia

$$E_s\left({}^{A}_{Z}\mathrm{X}\right)\left[{}^{A_1}_{Z_1}\mathrm{X}_1 + {}^{A_2}_{Z_2}\mathrm{X}_2 + \ldots + {}^{A_n}_{Z_n}\mathrm{X}_n\right] =$$

$$= M\left(Z_1, A_1\right) + M\left(Z_2, A_2\right) \ldots + M\left(Z_n, A_n\right) - M\left(Z, A\right) \tag{2.47}$$

$$= \Delta\left(Z_1, A_1\right) + \Delta\left(Z_2, A_2\right) \ldots + \Delta\left(Z_n, A_n\right) - \Delta\left(Z, A\right) \tag{2.48}$$

$$= \delta\left(Z_1, A_1\right) + \delta\left(Z_2, A_2\right) \ldots + \delta\left(Z_n, A_n\right) - \delta\left(Z, A\right) \tag{2.49}$$

$$= E_l\left(Z, A\right) - E_l\left(Z_1, A_1\right) - E_l\left(Z_2, A_2\right) - \ldots - \left(Z_n, A_n\right) \tag{2.50}$$

Como exercícios consideraremos agora energia de separação de próton, nêutron e partícula alfa em termos de massas, defeitos de massa e de energia de ligação.

Separação de próton de um núcleo ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ simbolicamente escreve-se como

$${}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow p + {}^{A-1}_{Z-1}\mathrm{Y} \tag{2.51}$$

Cálculo de energia de separação de próton é efetuada pelas fórmulas

$$E_p\left({}^A_Z\mathrm{X}\right) = E_{s,p}\left({}^A_Z\mathrm{X}\right)\left[p + {}^{A-1}_{Z-1}\,\mathrm{Y}\right] =$$

$$= M_p + M\left(Z-1, A-1\right) - M\left(Z, A\right)$$

$$= \delta_p + \delta\left(Z-1, A-1\right) - \delta\left(Z, A\right) \qquad (2.52)$$

Usando a definição de energias de ligação (2.24) para os núcleos ${}^A_Z\mathrm{X}$ e ${}^{A-1}_{Z-1}\mathrm{Y}$, temos

$$E_p\left({}^A_Z\mathrm{X}\right) = M_p + \left(Z-1\right)M_p + NM_n - E_l\left(Z-1, A-1\right)$$

$$-ZM_p - NM_n + E_l\left(Z, A\right)$$

portanto

$$E_p\left({}^A_Z\mathrm{X}\right) = E_l\left(Z, A\right) - E_l\left(Z-1, A-1\right) \qquad (2.53)$$

Separação de nêutron de um núcleo ${}^A_Z\mathrm{X}$ simbolicamente escreve-se como

$${}^A_Z\mathrm{X} \rightarrow n + {}^{A-1}_{Z}\,\mathrm{X} \qquad (2.54)$$

Cálculo de energia de separação de nêutron é efetuada pelas fórmulas

$$E_n\left({}^A_Z\mathrm{X}\right) = E_{s,n}\left({}^A_Z\mathrm{X}\right)\left[n + {}^{A-1}_{Z}\,\mathrm{X}\right]$$

$$= M_n + M\left(Z, A-1\right) - M\left(Z, A\right)$$

$$= \delta_n + \delta\left(Z, A-1\right) - \delta\left(Z, A\right) \qquad (2.55)$$

Usando a definição de energias de ligação (2.24) para os núcleos ${}^A_Z\mathrm{X}$ e ${}^{A-1}_{Z}\mathrm{X}$ temos

$$E_n\left({}^A_Z\mathrm{X}\right) = M_n + ZM_p + \left(N-1\right)M_n$$

$$-E_l\left(Z, A-1\right) - ZM_p - NM_n + E_l\left(Z, A\right)$$

portanto

$$E_n\left({}^A_Z\mathrm{X}\right) = E_l\left(Z, A\right) - E_l\left(Z, A-1\right) \tag{2.56}$$

Agora discutiremos energia de separação da partícula alfa. Lembramos que a partícula alfa é o núcleo de hélio, ${}^4_2\mathrm{He}$. Então, separação da partícula alfa de um núcleo ${}^A_Z\mathrm{X}$ simbolicamente escreve-se como

$${}^A_Z\mathrm{X} \to \alpha + {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} \tag{2.57}$$

Cálculo de energia de separação da partícula alfa é efetuada pelas fórmulas (2.37), (2.39), (2.43)

$$E_\alpha\left({}^A_Z\mathrm{X}\right) = E_{s,\alpha}\left({}^A_Z\mathrm{X}\right)\left[\alpha + {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y}\right]$$

$$= M_\alpha + M\left(Z-2, A-4\right) - M\left(Z, A\right)$$

$$= \delta_\alpha + \delta\left(Z-2, A-4\right) - \delta\left(Z, A\right)$$

$$= E_l\left(Z, A\right) - E_l\left(Z-2, A-4\right) - E_l\left(\alpha\right) \tag{2.58}$$

Exemplo 1

Sabendo que energias de ligação dos núcleos de enxofre ${}^{32}_{16}\mathrm{S}$ e de oxigênio ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ são $E_l\left({}^{32}_{16}\mathrm{S}\right) = 272$ MeV, $E_l\left({}^{16}_{8}\mathrm{O}\right) = 128$ MeV, determinar a energia de separação do núcleo ${}^{12}_{6}\mathrm{S}$ por 2 núcleos de ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$.

Solução

Usando a fórmula de separação de núcleo na forma (2.43) temos

$$E_s\left({}^{32}_{16}\mathrm{S}\right)\left[2\,{}^{16}_{8}\mathrm{O}\right] = E_l\left(16, 32\right) - 2 \cdot E_l\left(8, 16\right)$$

$$= 272 - 2 \cdot 128 = 16 \text{ MeV}$$

Exemplo 2

Sabendo que energias de ligação do núcleo de carbono ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ e da partícula α são $E_l\left({}^{12}_{6}\mathrm{C}\right) = 92$ MeV, $E_l\left({}^{4}_{2}\mathrm{He}\right) = 28$ MeV, determinar a energia de separação do núcleo ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ por 3 partículas α.

Solução

Usando a fórmula de separação de núcleo na forma (2.50) temos

$$E_s\left({}^{12}_{6}\mathrm{C}\right)\left[3{}^{4}_{2}\mathrm{He}\right] = E_l\left(6, 12\right) - 3 \cdot E_l\left(2, 4\right)$$

$$= 92 - 3 \cdot 28 = 8 \text{ MeV}$$

Exemplo 3

Determinar energia de separação de próton e de nêutron do núcleo de deutério ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$.

Solução

Usando as fórmulas de separação de próton (2.52) e de nêutron (2.55), temos

$$E_p\left({}^{2}_{1}\mathrm{H}\right) = \delta_p + \delta\left(1-1, 2-1\right) - \delta\left(1, 2\right)$$

$$= \delta_p + \delta\left(0, 1\right) - \delta\left(1, 2\right)$$

$$= \delta_p + \delta_n - \delta\left(1, 2\right)$$

e

$$E_n\left({}^{2}_{1}\mathrm{H}\right) = \delta_n + \delta\left(1, 2-1\right) - \delta\left(1, 2\right)$$

$$= \delta_n + \delta\left(1, 1\right) - \delta\left(1, 2\right)$$

$$= \delta_n + \delta_p - \delta\left(1, 2\right)$$

Então vemos que

$$E_p\left({}^{2}_{1}\mathrm{H}\right) = E_n\left({}^{2}_{1}\mathrm{H}\right) = \delta_n + \delta_p - \delta\left(1, 2\right)$$

Substituindo valores de defeitos de massa da Tabela 1.1, recebemos

$$E_p\left({}_1^2\mathrm{H}\right) = E_n\left({}_1^2\mathrm{H}\right) = 0.00783 + 0.00876 - 0.01410$$

$$= 0.00249 \text{ uma}$$

$$E_p\left({}_1^2\mathrm{H}\right) = E_n\left({}_1^2\mathrm{H}\right) = 0.00249 \cdot 931.5 = 2.3194 \text{ MeV}$$

Observamos também que da fórmula (2.30)

$$\delta_n + \delta_p - \delta\left(1,2\right) = E_l\left(1,2\right) = E_l\left({}_1^2\mathrm{H}\right)$$

portanto

$$E_p\left({}_1^2\mathrm{H}\right) = E_n\left({}_1^2\mathrm{H}\right) = E_l\left({}_1^2\mathrm{H}\right)$$

Exemplo 4

Determinar energia de separação de próton e de nêutron do núcleo de nitrogênio ${}_7^{13}\mathrm{N}$.

Solução

Usando a fórmula (2.52) para separação de próton, temos

$$E_p\left({}_7^{13}\mathrm{N}\right) = \delta_p + \delta\left(7-1, 13-1\right) - \delta\left(7,13\right)$$

$$= \delta_p + \delta\left(6,12\right) - \delta\left(7,13\right)$$

Substituindo valores de defeitos de massa da Tabela 1.1, recebemos

$$E_p\left({}_7^{13}\mathrm{N}\right) = 0.00783 + 0 - 0.00547 = 0.00236 \text{ uma}$$

Transformando uma em MeV, obtemos

$$E_p\left({}_7^{13}\mathrm{N}\right) = 0.00236 \cdot 931.5 = 2.1983 \text{ MeV}$$

Para separação de nêutron usamos a fórmula (2.55)

$$E_n\left({}^{13}_{7}\mathrm{N}\right) = \delta_n + \delta\,(7, 13-1) - \delta\,(7, 13)$$

$$= \delta_n + \delta\,(7, 12) - \delta\,(7, 13)$$

Substituindo valores de defeitos de massa da Tabela 1.1, recebemos

$$E_n\left({}^{13}_{7}\mathrm{N}\right) = 0.00867 + 0.01861 - 0.00547 = 0.02181 \text{ uma}$$

Transformando uma em MeV, obtemos

$$E_n\left({}^{13}_{7}\mathrm{N}\right) = 0.02181 \cdot 931.5 = 20.316 \text{ MeV}$$

A energia de separação de nêutron é maior da energia de ligação de próton devido a repulsão coulombiana que sofre um próton em um núcleo.

Exemplo 5

Determinar energia de separação da partícula α do núcleo de urânio ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$.

Solução

Primeiramente determinamos o núcleo produzido depois da separação da partícula α do núcleo de urânio ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$. A reação da separação escrevemos como

$${}^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{A_2}_{Z_2}\mathrm{X}$$

Aqui

$$A = 238,\ Z = 92;\ A_1 = 4,\ Z_1 = 2$$

Determinamos o número atômico Z_2 e o número de massa A_2 e

$$A_2 = A - A_1 = 238 - 4 = 234$$

$$Z_2 = Z - Z_1 = 92 - 2 = 90$$

Na Tabela periódica de elementos químicos[2] encontramos que elemento com o número atômico 90 é tório, Th. Então a reação é

$${}^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{234}_{90}\mathrm{Th}$$

Agora encontramos a massa dos nuclídeos[3] de ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$, $M_{at}\left({}^{238}_{92}\mathrm{U}\right) = 238.0507826$ uma, e de ${}^{234}_{90}\mathrm{Th}$, $M_{at}\left({}^{234}_{90}\mathrm{Th}\right) = 234.0435955$ uma. Portanto os defeitos de massa dos nuclídeos

$$\delta\,(92, 238) = M_{at}\left({}^{238}_{92}\mathrm{U}\right) - 238 = 0.0507826 \text{ uma}$$

$$\delta\,(90, 234) = M_{at}\left({}^{234}_{90}\mathrm{Th}\right) - 234 = 0.0435955 \text{ uma}$$

Defeito de massa da partícula α usamos da Tabela 1.1. Finalmente aplicamos a fórmula (2.39)

$$E_\alpha\left({}^{238}_{92}\mathrm{U}\right)\left[{}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{234}_{90}\mathrm{Th}\right] = \delta\,(2, 4) + \delta\,(92, 234) - \delta\,(92, 238)$$

$$= (0.0026032 + 0.0435955 - 0.0507826) = -0.0045839 \text{ uma}$$

$$E_\alpha\left({}^{238}_{92}\mathrm{U}\right)\left[{}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{234}_{90}\mathrm{Th}\right] = -0.0045839 \cdot 931.5 = -4.269 \text{ MeV}$$

Vemos que o valor recebido de energia de separação é negativo. Isto significa que o núcleo ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ é instável relativo à separação da partícula α e emite a espontaneamente. O núcleo ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ é radioativo e sofre decaimento α. A energia 4.269 MeV é energia liberada neste processo.

---

[2] Tabela periódica de elementos químicos é disponível no site "http://pt.wikipedia.org/wiki/Tabela_periódica"

[3] Massas de núcleos são disponíveis no site "http://atom.kaeri.re.kr/ton/index.html"

2.4 Conclusão

Nesta aula discutimos energia de ligação e energia de separação de núcleos.

RESUMO

No resumo dessa Aula constam os seguintes tópicos:

Foi introduzida energia de ligação de núcleos que é nergia mínima necessária para desintegrar um núcleo por núcleons. Em termos de massas de núcleos energia de ligação é espressa como

$$E_l\left({}_Z^A\mathrm{X}\right) = E_l\left(Z, A\right) = ZM_p + NM_n - M\left(Z, A\right)$$

Em termos de massas de nuclídeos energia de ligação é espressa como

$$E_l\left({}_Z^A\mathrm{X}\right) = ZM_{at}\left({}_1^1\mathrm{H}\right) + NM_n - M_{at}\left(Z, A\right)$$

Em termos de defeitos de massa de núcleos energia de ligação é

$$E_l\left({}_Z^A\mathrm{X}\right) = Z\Delta_p + N\Delta_n - \Delta\left(Z, A\right)$$

Em termos de defeitos de massa de nuclídeos energia de ligação é

$$E_l\left({}_Z^A\mathrm{X}\right) = Z\delta_p + N\delta_n - \delta\left(Z, A\right)$$

Foi introduzida também energia de ligação média, ou energia de ligação por núcleon, como

$$\varepsilon\left(Z, A\right) = \frac{E_l\left(Z, A\right)}{A}$$

Foi introduzida energia de separação de núcleo por duas partes, que é determinada como

$$E_s\left({}_{Z}^{A}\mathrm{X}\right)\left[{}_{Z_1}^{A_1}\mathrm{X}_1+{}_{Z_2}^{A_2}\mathrm{X}_2\right]=$$

$$E_s\left({}_{Z}^{A}\mathrm{X}\right)\left[{}_{Z_1}^{A_1}\mathrm{X}_1+{}_{Z_2}^{A_2}\mathrm{X}_2\right]=M\left(Z_1,A_1\right)+M\left(Z_2,A_2\right)-M\left(Z,A\right)$$

Em termos de defeitos de massa de núcleos e nuclídeos energia de separação é

$$E_s\left({}_{Z}^{A}\mathrm{X}\right)\left[{}_{Z_1}^{A_1}\mathrm{X}_1+{}_{Z_2}^{A_2}\mathrm{X}_2\right]=$$

$$=\Delta\left(Z_1,A_1\right)+\Delta\left(Z_2,A_2\right)-\Delta\left(Z,A\right)$$

$$=\delta\left(Z_1,A_1\right)+\delta\left(Z_2,A_2\right)-\delta\left(Z,A\right)$$

Energia de separação pode ser determinada através de energias de ligação de núcleo inicial e núcleos finais como

$$E_s\left({}_{Z}^{A}\mathrm{X}\right)\left[{}_{Z_1}^{A_1}\mathrm{X}_1+{}_{Z_2}^{A_2}\mathrm{X}_2\right]=$$

$$=E_l\left(Z,A\right)-E_l\left(Z_1,A_1\right)-E_l\left(Z_2,A_2\right)$$

No caso de separação por mais de duas partes as fórmulas de cálculo de energia de separação são seguintes

$$E_s\left({}_{Z}^{A}\mathrm{X}\right)\left[{}_{Z_1}^{A_1}\mathrm{X}_1+{}_{Z_2}^{A_2}\mathrm{X}_2+\ldots+{}_{Z_n}^{A_n}\mathrm{X}_n\right]=$$

$$=M\left(Z_1,A_1\right)+M\left(Z_2,A_2\right)\ldots+M\left(Z_n,A_n\right)-M\left(Z,A\right)$$

$$=\Delta\left(Z_1,A_1\right)+\Delta\left(Z_2,A_2\right)\ldots+\Delta\left(Z_n,A_n\right)-\Delta\left(Z,A\right)$$

$$=\delta\left(Z_1,A_1\right)+\delta\left(Z_2,A_2\right)\ldots+\delta\left(Z_n,A_n\right)-\delta\left(Z,A\right)$$

$$=E_l\left(Z,A\right)-E_l\left(Z_1,A_1\right)-E_l\left(Z_2,A_2\right)-\ldots-\left(Z_n,A_n\right)$$

Energia de separação de próton do núcleo é dada pelas fórmulas

$$E_p\left({}_{Z}^{A}\mathrm{X}\right)=E_{s,p}\left({}_{Z}^{A}\mathrm{X}\right)\left[p+{}_{Z-1}^{A-1}\mathrm{Y}\right]$$

$$= M_p + M\left(Z-1, A-1\right) - M\left(Z, A\right)$$

$$= \delta_n + \delta\left(Z, A-1\right) - \delta\left(Z, A\right)$$

$$E_p\left({}_Z^A\mathrm{X}\right) = E_l\left(Z, A\right) - E_l\left(Z-1, A-1\right)$$

Energia de separação de nêutron do núcleo é dada pelas fórmulas

$$E_n\left({}_Z^A\mathrm{X}\right) = E_{s,n}\left({}_Z^A\mathrm{X}\right)\left[n + {}_Z^{A-1}\,\mathrm{X}\right]$$

$$= M_n + M\left(Z, A-1\right) - M\left(Z, A\right)$$

$$= \delta_n + \delta\left(Z, A-1\right) - \delta\left(Z, A\right)$$

$$= E_l\left(Z, A\right) - E_l\left(Z, A-1\right)$$

Energia de separação de partícula alfa do núcleo é dada pelas fórmulas

$$E_\alpha\left({}_Z^A\mathrm{X}\right) = E_{s,\alpha}\left({}_Z^A\mathrm{X}\right)\left[\alpha + {}_{Z-2}^{A-4}\,\mathrm{Y}\right]$$

$$= M_\alpha + M\left(Z-2, A-4\right) - M\left(Z, A\right)$$

$$= \delta_\alpha + \delta\left(Z-2, A-4\right) - \delta\left(Z, A\right)$$

$$= E_l\left(Z, A\right) - E_l\left(Z-2, A-4\right) - E_l\left(\alpha\right)$$

Para usar as fórmulas é necessário saber de determinar massas ou defeitos de massa de núcleos e nuclídeos e saber converter unidades usadas para massas.

PRÓXIMA AULA

Em próxima aula discutiremos propriedades elétricas e magnéticas de núcleos. Serão introduzidas as quantidades de quadrupôlo elétrico de núcleo, spin de núcleo e momento magnético de núcleo. Também será discutida paridade de núcleos.

ATIVIDADES

ATIV. 2.1. Determinar energia de ligação de núcleo de: a) ${}^{3}_{2}$He; b) ${}^{12}_{6}$C; c) ${}^{16}_{8}$O.

ATIV. 2.2. Calcular em u.m.a. massa de:

a) nuclídeo ${}^{8}_{3}$Li, sabendo que a sua energia de ligação é 41,3 MeV;

b) núcleo ${}^{10}_{6}$C, sabendo que sua energia de ligação média é 6,04 MeV.

ATIV. 2.3. Usando massas de nuclídeos da Tabela 1.1 determinar:

a) energia de ligação média de núcleo ${}^{16}_{8}$O;

b) energia de separação de nêutron de núcleo ${}^{11}_{5}$B;

c) energia de separação de partícula α em núcleo ${}^{11}_{5}$B;

d) energia necessária para separar núcleo ${}^{16}_{8}$O por quatro partes iguais.

ATIV. 2.4. Encontrar a energia necessária para separação de núcleo de ${}^{20}_{10}$Ne por duas partículas α e núcleo ${}^{12}_{6}$C, supondo que energias de ligação médias de núcleos sejam $\varepsilon({}^{20}_{10}\mathrm{Ne}) = 8{,}03$ MeV, $\varepsilon({}^{4}_{2}\mathrm{He}) = 7{,}07$ MeV, $\varepsilon({}^{12}_{6}\mathrm{C}) = 7{,}68$ MeV.

ATIV. 2.5. Defeito de massa de nuclídeo de ${}^{9}_{4}$Be é 11,3484 MeV = 0.01219 uma. Determinar energia de separação de núcleo ${}^{9}_{4}$Be por duas partículas α e um nêutron, sabendo que massa de nêutron é $M_n = 939{,}5731$ MeV $= 1{,}008665$ uma, massa de partícula α é $M_\alpha = 4{,}001506$ uma, massa do elétron é $M_e = 0{,}511$ MeV.

ATIV. 2.6. Encontrar energia de ligação de núcleo que tem mesmo número de prótons e nêutrons e que tem raio em η=1,5 vezes menor de raio de $^{27}_{13}$Al. Para raio de núcleo R usar formula $R = r_0 A^{1/3}$, r_0= 1,3·10^{-15} m, A é número de massa de núcleo.

LEITURA COMPLEMENTAR

ALONSO, M., FINN, E. J. - Física. Vol. III. Fundo Educativo Interamericano, 1971.

EISBERG, R., RESNICK, R. - Física Quântica. São Paulo, editora Campus, 1983.

PESSOA, E. F., COUTINHO, F. A., SALA, O. - Introdução à Física Nuclear. São Paulo, EDUSP, 1978.

CHUNG, K. C. - Introdução à Física Nuclear. Rio de Janeiro, EdUERJ, 2001.