

---

## Reações Nucleares

### **META:**

Discutir reações nucleares em geral.

Introduzir limiar de reação para reações endo-energéticas.

Discutir reação de fissão nuclear em cadeia e sua aplicação em reatores nucleares.

Discutir reação de fusão nuclear.

### **OBJETIVOS:**

Ao fim da aula os alunos deverão ser capazes de:

Determinar energia de reação nuclear.

Determinar limiar de reação.

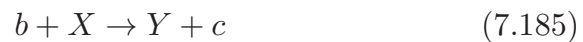
### **PRÉ-REQUISITOS**

Os conhecimentos de determinação de massa de núcleos da Aula

1. Os conhecimentos de material de colisões de partículas da disciplina "Física A".

## 7.1 Reações Nucleares

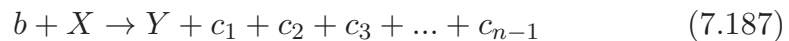
Consideraremos agora reações nucleares em geral. Supomos que temos um núcleo inicial que sofre colisão com uma partícula ou com outro núcleo. Núcleo inicial chamaremos *núcleo alvo* ou *partícula alvo*. Partícula (ou núcleo) que colide com núcleo alvo chamaremos *partícula projétil*. Em processo de colisão ocorre uma reação nuclear que resulta em produção de novas partículas ou núcleos. Partículas ou núcleos produzidos em resultado de reação nuclear chamaremos *partículas filhos* ou *núcleos filhos*. Reações nucleares escreveremos simbolicamente na forma seguinte



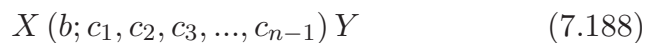
onde ao lado esquerdo são partículas iniciais, ao lado direito são partículas finais. Ou usaremos outra forma. Para mesma reação da Eq. (7.185) escreveremos



Partículas iniciais de reação são chamadas também *entrada da reação*. Partículas finais produzidas na reação são chamadas *saída da reação*. Situação típica quando na reação participam duas partículas iniciais e duas partículas finais. Em geral, na saída de reação podem ser mais de duas partículas. Neste caso escreveremos



ou



Na Eq. (7.187) ou na (7.188),  $X$  é núcleo (partícula) alvo,  $b$  é partícula projétil,  $Y$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ , ...,  $c_{n-1}$  são núcleos e partículas produzidos na reação.

Nas reações nucleares, mesmo como em qualquer outro processo físico, devem ser satisfeitas as leis de conservação. As leis de conservação mais importantes são a lei de conservação de energia e a lei de conservação de momento. Além disso deve ser conservada carga elétrica e número total de núcleons. Designaremos massa de núcleo alvo por  $M_a$ , massa de partícula projétil por  $M_b$ , energia cinética de núcleo alvo por  $K_a$ , energia cinética de partícula projétil por  $K_b$ , momento de núcleo alvo por  $\vec{p}_a$ , momento de partícula projétil por  $\vec{p}_b$ . Designaremos massas de partículas produzidas por  $M_1$ ,  $M_2$ , ...,  $M_n$ , energias cinéticas de partículas produzidas por  $K_1$ ,  $K_2$ , ...,  $K_n$ , momentos de partículas produzidas por  $\vec{p}_1$ ,  $\vec{p}_2$ , ...,  $\vec{p}_n$ . Massa total de partículas iniciais designaremos por  $M_i$

$$M_i = M_a + M_b \quad (7.189)$$

energia cinética total de partículas iniciais por  $K_i$

$$K_i = K_a + K_b \quad (7.190)$$

e momento total de partículas iniciais por  $\vec{p}_i$

$$\vec{p}_i = \vec{p}_a + \vec{p}_b \quad (7.191)$$

Massa total de partículas produzidas designaremos por  $M_f$

$$M_f = M_1 + M_2 + \dots + M_n \quad (7.192)$$

energia cinética de partículas produzidas por  $K_f$

$$K_f = K_1 + K_2 + \dots + K_n \quad (7.193)$$

e momento total de partículas produzidas por  $\vec{p}_f$

$$\vec{p}_f = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n \quad (7.194)$$

Usando notação introduzida designaremos energia total de partículas antes de reação por

$$\begin{aligned} E_i &= M_a c^2 + K_a + M_b c^2 + K_b \\ &= M_i c^2 + K_i \end{aligned} \quad (7.195)$$

e energia total de partículas depois de reação por

$$\begin{aligned} E_f &= M_1 c^2 + K_1 + M_2 c^2 + K_2 + \dots \\ &+ M_n c^2 + K_n = M_f c^2 + K_f \end{aligned} \quad (7.196)$$

Tal que energia total e momento total são conservados, temos

$$E_i = E_f \quad (7.197)$$

ou

$$M_i c^2 + K_i = M_f c^2 + K_f \quad (7.198)$$

e

$$\vec{p}_i = \vec{p}_f \quad (7.199)$$

ou

$$\vec{p}_a + \vec{p}_b = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n \quad (7.200)$$

Da Eq. (7.198) temos

$$M_i c^2 - M_f c^2 = K_f - K_i = Q \quad (7.201)$$

onde por  $Q$  é designada quantidade chamada *energia de reação*. No caso  $Q > 0$ , energia é produzida na reação. Tal reação chama-se *reação exo-energética*. Se  $Q < 0$ , energia é consumida na reação.

Tal reação chama-se *reação endo-energética*. Para reações endo-energéticas é conveniente introduzir uma quantidade positiva  $Q_e$

$$Q_e = -Q \quad (7.202)$$

que apresenta energia consumida na reação endo-energética. No caso  $Q = 0$ , ocorre espalhamento elástico de partículas iniciais sem transformação de núcleos. Ocorre somente redistribuição de energia cinética e de momento entre partículas.

## 7.2 Limiar de Reação

Discutiremos agora reações endo-energéticas e determinaremos energia cinética mínima da partícula projétil necessária para realizar reação considerada. Quantidade que corresponde a essa energia cinética mínima é chamada *limiar de energia da reação*, ou simplesmente *limiar da reação*. Para simplicidade consideraremos uma reação com duas partículas iniciais e duas partículas finais.



Para quantidades associadas com partículas usaremos índices seguintes:  $a$  para partícula alvo,  $b$  para partícula projétil, 1, 2 para partículas finais. Tal que consideramos reação endo-energética,  $Q < 0$ , introduzimos uma quantidade positiva  $Q_e = -Q$ .

Supomos que partícula alvo está em repouso, portanto  $\vec{p}_a = 0$ ,  $K_a = 0$ . Então para energia de reação da Eq. (7.201) temos

$$Q = M_i c^2 - M_f c^2 = K_f - K_i = K_1 + K_2 - K_b \quad (7.204)$$

Ou em termos da quantidade  $Q_e$

$$Q_e = M_f c^2 - M_i c^2 = K_b - K_1 - K_2 \quad (7.205)$$

As leis de conservação de energia total e de momento dão

$$M_i c^2 + K_b = M_f c^2 + K_1 + K_2 \quad (7.206)$$

e

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_b \quad (7.207)$$

Da Eq. (7.206) recebemos energia cinética da partícula projétil

$$K_b = M_f c^2 - M_i c^2 + K_1 + K_2 \quad (7.208)$$

ou, usando Eq. (7.205)

$$K_b = Q_e + K_1 + K_2 \quad (7.209)$$

Na Eq. (7.209) termo  $K_1 + K_2$  apresenta energia cinética total de partículas produzidas.

Velocidade de centro de massa de partículas produzidas<sup>13</sup> é

$$\vec{v}_c = \frac{M_1 \vec{v}_1 + M_2 \vec{v}_2}{M_1 + M_2} = \frac{\vec{p}_1 + \vec{p}_2}{M_1 + M_2} \quad (7.210)$$

Ou, usando Eq. (7.207), temos

$$\vec{v}_c = \frac{\vec{p}_b}{M_1 + M_2} \quad (7.211)$$

Velocidades de partículas produzidas relativo ao centro de massa deles são

$$\vec{v}'_1 = \vec{v}_1 - \vec{v}_c, \quad \vec{v}'_2 = \vec{v}_2 - \vec{v}_c \quad (7.212)$$

Portanto podemos escrever que

$$\vec{v}_1 = \vec{v}'_1 + \vec{v}_c, \quad \vec{v}_2 = \vec{v}'_2 + \vec{v}_c \quad (7.213)$$

---

<sup>13</sup>Conceito de centro de massa de sistema de partículas foi discutido na disciplina "Física A".

Apresentamos o termo  $K_1 + K_2$  na forma

$$\begin{aligned}
 K_1 + K_2 &= \frac{1}{2}M_1v_1^2 + \frac{1}{2}M_2v_2^2 & (7.214) \\
 &= \frac{1}{2}M_1(\vec{v}'_1 + \vec{v}_c)^2 + \frac{1}{2}M_2(\vec{v}'_2 + \vec{v}_c)^2 \\
 &= \frac{1}{2}M_1v_1'^2 + 2\frac{1}{2}M_1\vec{v}'_1\vec{v}_c + \frac{1}{2}M_1v_c^2 \\
 &\quad + \frac{1}{2}M_2v_2'^2 + 2\frac{1}{2}M_2\vec{v}'_2\vec{v}_c + \frac{1}{2}M_2v_c^2 \\
 &= \frac{1}{2}M_1v_1'^2 + \frac{1}{2}M_2v_2'^2 + \frac{1}{2}(M_1 + M_2)v_c^2 \\
 &\quad + (M_1\vec{v}'_1 + M_2\vec{v}'_2)\vec{v}_c
 \end{aligned}$$

Aqui designamos

$$K'_1 = \frac{1}{2}M_1v_1'^2, \quad K'_2 = \frac{1}{2}M_2v_2'^2, \quad K_c = \frac{1}{2}(M_1 + M_2)v_c^2 \quad (7.215)$$

e observamos que no último termo<sup>14</sup>

$$M_1\vec{v}'_1 + M_2\vec{v}'_2 = 0 \quad (7.216)$$

Portanto<sup>15</sup>

$$K_1 + K_2 = K_c + K'_1 + K'_2 \quad (7.217)$$

<sup>14</sup>Da Eq. (7.212)

$$\begin{aligned}
 M_1\vec{v}'_1 + M_2\vec{v}'_2 &= M_1(\vec{v}_1 - \vec{v}_c) + M_2(\vec{v}_2 - \vec{v}_c) \\
 &= M_1\vec{v}_1 + M_2\vec{v}_2 - (M_1 + M_2)\vec{v}_c
 \end{aligned}$$

Mas da Eq. (7.210)

$$M_1\vec{v}_1 + M_2\vec{v}_2 = (M_1 + M_2)\vec{v}_c$$

Portanto

$$M_1\vec{v}'_1 + M_2\vec{v}'_2 = 0$$

<sup>15</sup>Esse resultado é conhecido como teorema de König. Foi discutido na disciplina "Física A".

As quantidades  $K'_1$ ,  $K'_2$ ,  $K_c$  têm significado seguinte:  $K'_1$ ,  $K'_2$  são energias cinéticas de partículas relativo ao centro de massa,  $K_c$  é energia cinética do centro de massa de partículas.

Então, usando Eq. (7.217), escrevemos  $K_b$  na forma

$$K_b = Q_e + K_c + K'_1 + K'_2 \quad (7.218)$$

Da Eq. (7.211)

$$\begin{aligned} K_c &= \frac{1}{2} (M_1 + M_2) v_c^2 & (7.219) \\ &= \frac{1}{2} (M_1 + M_2) \frac{p_b^2}{(M_1 + M_2)^2} \\ &= \frac{1}{2} \frac{p_b^2}{M_1 + M_2} = \frac{1}{2} \frac{M_b^2 v_b^2}{M_1 + M_2} \\ &= \frac{1}{2} M_b v_b^2 \frac{M_b}{M_1 + M_2} = K_b \frac{M_b}{M_1 + M_2} \end{aligned}$$

Então

$$K_c = K_b \frac{M_b}{M_1 + M_2} \quad (7.220)$$

Substituindo Eq. (7.220) na Eq. (7.218), temos

$$K_b = Q_e + K_b \frac{M_b}{M_1 + M_2} + K'_1 + K'_2$$

Portanto

$$K_b \left( 1 - \frac{M_b}{M_1 + M_2} \right) = Q_e + K'_1 + K'_2 \quad (7.221)$$

e

$$K_b = \left( 1 - \frac{M_b}{M_1 + M_2} \right)^{-1} (Q_e + K'_1 + K'_2) \quad (7.222)$$

Da Eq. (7.205)

$$Q_e = M_f c^2 - M_i c^2 = (M_1 + M_2) c^2 - (M_a + M_b) c^2$$

podemos expressar  $M_1 + M_2$  como

$$M_1 + M_2 = Q_e/c^2 + M_a + M_b \quad (7.223)$$



Tal que

$$1 - \frac{M_b}{M_1 + M_2} = \frac{Q_e/c^2 + M_a + M_b - M_b}{Q_e/c^2 + M_a + M_b} \quad (7.224)$$

$$= \frac{Q_e/c^2 + M_a}{Q_e/c^2 + M_a + M_b}$$

e

$$\left(1 - \frac{M_b}{M_1 + M_2}\right)^{-1} = \frac{Q_e/c^2 + M_a + M_b}{Q_e/c^2 + M_a} \quad (7.225)$$

$$= 1 + \frac{M_b}{Q_e/c^2 + M_a}$$

Para reações nucleares típicas, quando velocidade de partícula projétil não relativística energia de reação  $Q_e$  é bem menor de energia de repouso de núcleo alvo,  $Q_e \ll M_a c^2$ . Portanto na Eq. (7.225) pode ser desprezado o termo  $Q_e/c^2$ , pois  $Q_e/c^2 \ll M_a$ .

Portanto

$$\left(1 - \frac{M_b}{M_1 + M_2}\right)^{-1} \approx 1 + \frac{M_b}{M_a} \quad (7.226)$$

Então, no caso não relativístico recebemos energia cinética de projétil

$$K_b = \left(1 + \frac{M_b}{M_a}\right) (Q_e + K'_1 + K'_2) \quad (7.227)$$

Limiar de energia de reação  $K_{lim}$  recebemos impondo  $K'_1 = K'_2 = 0$ , que corresponde a situação quando energia é suficiente somente para realizar reação mas já insuficiente para iniciar movimento de partículas produzidas. Então,

$$K_{lim} = Q_e \left(1 + \frac{M_b}{M_a}\right) \quad (7.228)$$

Observamos, que limiar de energia de reação é sempre maior de energia de reação.

### 7.3 Reação de Fissão em Cadeia

História de descoberta de fissão induzida de núcleos começou em 1934, quando E. Fermi com colaboradores tentou receber novos elementos lançando nêutrons em núcleos atômicos. Em experimentos de Fermi foi usado urânio, como elemento mais pesado que existe naturalmente. Estudo sistemático de resultados de experimentos mostrou que produtos da reação contêm núcleos de vários elementos mais leves. Geralmente núcleos produzidos na reação são  $\beta$ -ativos com vários períodos de meia-vida. Fração de núcleos produzidos na reação de fissão de núcleos de urânio  ${}_{92}^{235}\text{U}$  em dependência de seus números de massa de é demonstrada na Fig. 7.1. Como vemos na Fig. 7.1, separação mais provável é por

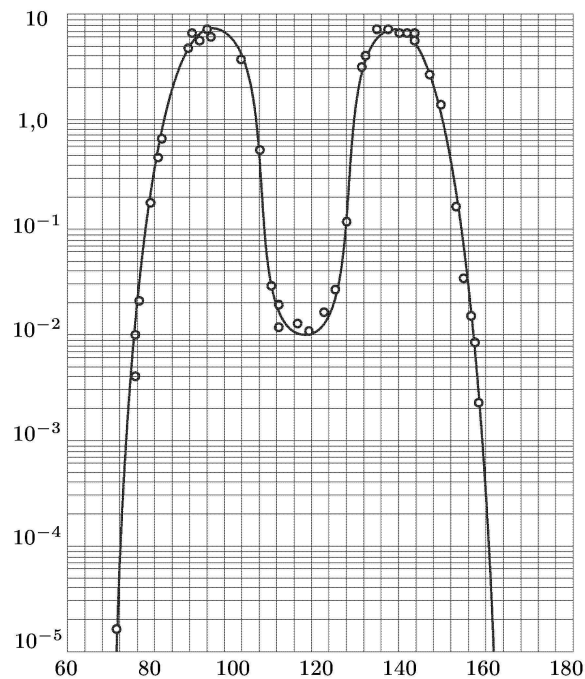
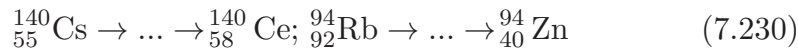


Figura 7.1: Fração de produtos de fissão induzida de núcleo de  ${}_{92}^{235}\text{U}$  versus número de massa  $A$ .

partes na maneira seguinte: massa de uma parte é em 3/2 vezes maior de massa de outra parte. Tal que reação mais provável é



Núcleos cério  ${}_{55}^{140}\text{Cs}$  e rubídio  ${}_{92}^{94}\text{Rb}$  são  $\beta$ -ativos. Depois de série de decaimentos  $\beta^-$  ocorrem transformações



em núcleos estáveis de cério  ${}_{58}^{140}\text{Ce}$  e zircônio  ${}_{40}^{94}\text{Zn}$ . Processo de fissão induzida por nêutron é ilustrada esquematicamente na Fig. 7.2. Determinaremos energia da reação da Eq. (7.226), usando

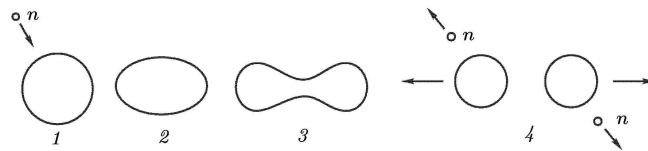


Figura 7.2: Esquema de fissão induzida de núcleo de  ${}_{92}^{235}\text{U}$ .

Eq. (7.201)

$$Q = M({}_{92}^{235}\text{U}) + M_n - M({}_{55}^{140}\text{Cs}) - M({}_{92}^{94}\text{Rb}) - 2M_n \quad (7.231)$$

Substituindo valores de massas de núcleos na Eq. (7.231), recebemos que energia da reação é positiva, portanto reação é exoenergética. Valor de energia da reação é  $Q = 175 \text{ MeV}$ , que é valor de energia liberada na reação de fissão induzida de núcleo de  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . Na reação da Eq. (7.229) junto com núcleos de  ${}_{55}^{140}\text{Cs}$  e  ${}_{92}^{94}\text{Rb}$  são produzidos 2 nêutrons livres. Eles podem induzir outra reação de fissão de núcleos de  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . Então, recebemos possibilidade de *reação de fissão em cadeia*.

Observamos, que além de urânio  ${}_{92}^{235}\text{U}$  existem outros isótopos estáveis de urânio. Minério de urânio contem 99,27% de isótopo de  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , 0,72% de isótopo de  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , 0,01% de isótopo de  ${}_{92}^{234}\text{U}$ . Entretanto, reação de fissão em cadeia é mais fácil realizar com núcleos de  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , pois eles desintegram-se por nêutrons térmicos. Nêutrons térmicos são nêutrons que têm energia cinética igual a energia cinética de movimento caótico de partículas de meio com temperatura de ambiente. Valor de energia cinética de nêutrons térmicos aproximadamente é 0,025 eV. Nêutrons térmicos são chamados também nêutrons lentos. Reação de fissão de outros isótopos de urânio ocorre com nêutrons rápidos com energia cinética de valor  $\approx 1$  MeV.

Além disso, para iniciar reação de fissão em cadeia é necessário ter material em que concentração de núcleos de  ${}_{92}^{235}\text{U}$  é suficiente grande, 3-5%. Para receber material com concentração necessária de núcleos de  ${}_{92}^{235}\text{U}$  são usados vários métodos. Entre eles são centrifugação, termodifusão, difusão de gases, métodos eletromagnéticos. Processo de aumento de concentração de núcleos de  ${}_{92}^{235}\text{U}$  até valor de 3-5% é chamado *enriquecimento*.

Agora estimaremos quantidade de energia liberada em reação de fissão em cadeia. Supomos que processo é iniciado por um nêutron. Depois de fissão de um núcleo de urânio (Eq. (7.229)) temos 2 nêutrons emitidos, quais chamaremos nêutrons da primeira geração. Dois nêutrons da primeira geração induzam duas novas reações de fissão. Então, na próxima etapa, ou na segunda geração, temos já  $2^2 = 4$  nêutrons emitidos. Se processo de fissão continua, na  $n$ -ésima geração temos  $2^n$  nêutrons emitidos. Vida média de nêutrons emitidos, até colisão com núcleo de urânio, é  $\tau \approx 10^{-7}$

s. Tal que durante intervalo de tempo  $\Delta t = 8 \cdot 10^{-6}$  s temos 80 gerações de nêutrons que induzam fissão de núcleos de urânio. Número total de nêutrons de todas gerações é

$$N = 1 + 2 + 2^2 + 2^3 + \dots + 2^{80} \approx 2^{81} = 2,4 \cdot 10^{24} \quad (7.232)$$

que é igual a número de reações de fissão de núcleos de urânio. Em cada reação de fissão é liberada energia  $Q = 175$  MeV. Portanto recebemos energia total liberada

$$\begin{aligned} E &= N \cdot Q = 2,4 \cdot 10^{24} \cdot 175 \quad (7.233) \\ &= 4,2 \times 10^{26} \text{ MeV} = 6,72 \times 10^{13} \text{ J} \end{aligned}$$

Quantidade de núcleos de  $2,4 \cdot 10^{24}$  compõe proximadamente 1 kg de  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . Para comparação: queima de 1 kg de carvão produz  $3,5 \cdot 10^7$  J. Claro, que energia de  $6,72 \times 10^{13}$  J produzida durante  $\Delta t = 8 \cdot 10^{-6}$  s por quantidade de 1 kg de material causa explosão enorme. Esse efeito é usado em arma nuclear. Entretanto, é possível realizar reação de fissão nuclear em cadeia controlada.

Supomos que um material contém  $N_n$  nêutrons livres na  $n$ -ésima geração e  $N_{n+1}$  nêutrons na  $(n+1)$ -ésima geração. Introduzimos fator de multiplicação de nêutrons

$$K = \frac{N_{n+1}}{N_n} \quad (7.234)$$

ou

$$N_{n+1} = KN_n$$

Supomos que em instante inicial existe  $N_0$  nêutrons livres. Na primeira geração temos

$$N_1 = KN_0$$

na segunda

$$N_2 = K N_1 = K^2 N_0$$

na  $n$ -ésima

$$N_n = K N_{n-1} = K^2 N_{n-2} = \dots = K^n N_0 \quad (7.235)$$

Então, comportamento de reação de fissão em cadeia depende do valor de fator de multiplicação  $K$ . Impondo  $n \rightarrow \infty$  na Eq. (7.235) recebemos três variantes de comportamento da reação

$$K > 1, K^n \rightarrow \infty - \text{explosão}$$

$$K < 1, K^n \rightarrow 0 - \text{amortecimento}$$

$$K = 1, K^n \rightarrow 1 - \text{equilíbrio}$$

Então, no caso de equilíbrio ( $K = 1$ ), recebemos processo controlado. Reação de fissão em cadeia controlada é realizada em reatores nucleares. Reatores nucleares são usados em usinas nucleares em fim de produção de energia elétrica. Energia liberada em reação de fissão é levada em forma de energia cinética de produtos da reação. Colisões de produtos de reação com átomos de material e de construção de reator leva a produção de calor. Calor produzido já pode ser usado em ciclo termodinâmico usual para produção de trabalho útil. Por exemplo, para rotação de turbinas de usina elétrica.

## 7.4 Fusão Nuclear

Discutiremos agora efeito oposto a fissão nuclear – fusão de núcleos leves. Consideraremos reações





Energia de reação da Eq. (7.236) é

$$\begin{aligned} Q &= 2M({}^2_1\text{H}) - M({}^3_1\text{H}) - M_n \quad (7.239) \\ &= 3,27 \text{ MeV} \end{aligned}$$

de reação da Eq. (7.237) é

$$\begin{aligned} Q &= 2M({}^2_1\text{H}) - M({}^3_1\text{H}) - M_p \quad (7.240) \\ &= 4,03 \text{ MeV} \end{aligned}$$

e de reação da Eq. (7.238) é

$$\begin{aligned} Q &= M({}^2_1\text{H}) + M({}^3_1\text{H}) - M({}^4_2\text{He}) - M_n \quad (7.241) \\ &= 17,59 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Energias de reações são positivas, portanto reações são exo-energéticas.

Em processo de fusão de núcleos leves ocorre liberação de energia e são formados núcleos mais pesados. Energia liberada é levada em forma de energia cinética de movimento de produtos de reação. Quando foi entendido que em reações de fusão nuclear é liberada energia foi levantada questão de possibilidade de construção de reator termo-nuclear. Isto é tal reator em que energia de reações de fusão nuclear pode ser usada para produção de energia elétrica em quantidades industriais. Estimativas dão resultado seguinte. Em reações (7.236), e (7.237) participam somente núcleos de deutério  ${}^2_1\text{H}$ , que é designado também por D,  $\text{D} = {}^2_1\text{H}$ . Energia média liberada nessas reações é  $\approx 1,8 \text{ MeV}$  por cada núcleo. Água natural contém 0,015% de núcleos de D por número de átomos. Isso dá  $5 \cdot 10^{17}$

núcleos de D em 1 g de água. Portanto energia que pode ser produzida de 1 g de água é

$$\begin{aligned} E &= 1.8 \cdot 5 \cdot 10^{17} = 0,9 \cdot 10^{18} \text{ MeV} & (7.242) \\ &= 1,44 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

Então como combustível termo-nuclear pode servir água usual<sup>16</sup>. Para iniciar reações de fusão nuclear é necessário aquecer combustível até temperatura  $10^8$  K. Matéria aquecida até tantas temperaturas é chamada *plasma*. Métodos que permitem efetuar tanto aquecimento são seguintes: por meio de radiação eletromagnética de alta frequência; por meio de radiação de laser de alta potência; por injeção de feixes de elétrons de altas energias. Energia liberada em reações de fusão pode ser transformada diretamente em energia elétrica por meio de gerador magneto-hidrodinâmico. Esquema de construção de gerador magneto-hidrodinâmico é seguinte. Plasma é localizada em campos elétricos e magnéticos de uma configuração especial em que ela é acelerada. Elétrons livres são retirados de plasma por eletródos laterais de construção. Aqueles elétrons criam corrente elétrica que pode ser diretamente usada em processos tecnológicos.

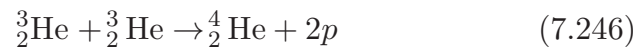
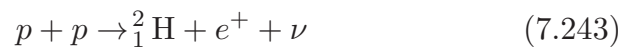
Uma dificuldade drástica em possibilidade de construção de reator termo-nuclear é instabilidade de cordão de plasma. Pequenas perturbações de forma cilíndrica de cordão levam a sua quebra e processo torna-se descontrolado. Então, projeto de construção de reator termo-nuclear que podia usar energia de fusão nuclear atualmente está aberto.

---

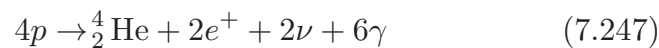
<sup>16</sup>Lembramos, que queima de 1 kg de carvão produz energia  $E = 3,5 \cdot 10^7$  J.



Entretanto, reações de fusão nuclear são efetivamente realizadas em carvão de estrelas. Estabilidade de plasma de altas temperaturas é suportada por forma esférica e campo gravitacional de estrelas. Em resultado de série de reações, que é chamado *ciclo de hidrogênio*, em estrelas jovens de quatro prótons é produzido um núcleo de hélio. Apresentamos essas reações



Então,



Em estrelas mais velhas são realizados outros ciclos, em que ocorrem reações de fusão de núcleos mais pesados. São conhecidos ciclo de carbono, ciclo de hélio, ciclo de neônio. Reações de fusão nuclear são um meio de produção de elementos pesados dentro de estrelas.

## 7.5 Conclusão

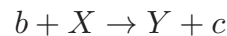
Nesta aula discutimos reações nucleares em geral. Introduzimos limiar de reação para reações endo-energéticas. Discutimos reação de fissão nuclear em cadeia e sua aplicação em reatores nucleares. Discutir reação de fusão nuclear e sua aplicação astrofísica.



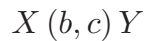
## RESUMO

No resumo dessa Aula constam os seguintes tópicos:

Foram consideradas reações nucleares em geral. Simplicamente esquema de reação é escrita como



ou



Foi introduzida a quantidade de energia de reação  $Q$  determinada como

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

onde  $M_i$  é massa de núcleos e partículas iniciais,  $M_f$  é massa de núcleos e/ou partículas finais (produzidos). No caso  $Q > 0$ , a reação é exo-energética, energia é produzida na reação. Se  $Q < 0$ , a reação é endo-energética, energia é consumida na reação. Para reações endo-energéticas é introduzida uma quantidade positiva  $Q_e = -Q$ . No caso  $Q = 0$ , ocorre espalhamento elástico de partículas iniciais sem transformação de núcleos.

Foi introduzida característica de reações endo-energéticas – limiar de reação  $K_{lim}$ , que é energia cinética mínima da partícula projétil. Limiar de reação é determinado como

$$K_{lim} = Q_e \left( 1 + \frac{M_b}{M_a} \right)$$

onde  $M_a$  é massa da partícula alvo,  $M_b$  é massa da partícula projétil.

Foi discutida reação de fissão em cadeia no exemplo com núcleos de urânio  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . Foram demonstrados as condições de reação controlada e possibilidade de construção de reator nuclear. Foi estimada energia liberada em reação de fissão em cadeia.

Foi discutida também reação de fusão nuclear. Foi estimada energia liberada em reação de fusão de núcleos leves. Foi indicada impossibilidade de construção de reator de fusão nuclear e apresentada esquema de processos de fusão nuclear em carvão de estrelas.

## PRÓXIMA AULA



Em nossa próxima aula começaremos discutir partículas elementares. Apresentaremos classificação das partículas elementares. Apresentaremos modelo de quarks de hádrons.

## ATIVIDADES



**ATIV. 7.1.** Escrever símbolos corretos em lugar de x em reações:

a)  ${}_{5}^{10}\text{B}(x, \alpha) {}_{4}^{8}\text{Be}$ ; b)  ${}_{8}^{17}\text{O}({}_{1}^{2}\text{H}, n)x$ .

**ATIV. 7.2.** Determinar energia de reações a)  ${}_{3}^{7}\text{Li}(p, n){}_{4}^{7}\text{Be}$ ; b)  ${}_{3}^{7}\text{Li}(\alpha, n){}_{5}^{10}\text{B}$ ; c)  ${}_{6}^{16}\text{O}({}_{1}^{2}\text{H}, \alpha){}_{7}^{14}\text{N}$ .

**ATIV. 7.3.** Em reação  ${}_{3}^{7}\text{Li}(p, n){}_{4}^{7}\text{Be}$ , a partícula projétil reage com o núcleo alvo em repouso. Para qual energia cinética do próton o nêutron produzido está em repouso em referencial de centro de massa?

**ATIV. 7.4.** Determinar limiar da energia cinética de próton em reação  $(p, {}_{1}^{2}\text{H})$  com núcleo de  ${}_{3}^{7}\text{Li}$ .

**ATIV. 7.5.** Determinar energia produzida em reações a)  ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow p + {}^3_1\text{H}$ ; b)  ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow n + {}^3_2\text{He}$ .

**ATIV. 7.6.** Determinar velocidades de produtos de reação  ${}^3_2\text{He} + {}^2_1\text{H} \rightarrow p + {}^4_2\text{He}$ , supondo que energia cinética das partículas iniciais for nula.



### 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.