

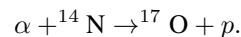
## Notas de Aula de Introdução à Física Nuclear (NHZ3026)

Prof. Dr. Marcelo Augusto Leigui de Oliveira  
 Centro de Ciências Naturais e Humanas (CCNH)  
 Universidade Federal do ABC (UFABC)  
 Santo André - SP

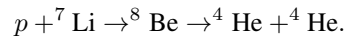
### AULA #10: Reações nucleares

#### I. REAÇÕES NUCLEARES

Reações nucleares são colisões entre 2 núcleos, tais colisões podem ou não dar origem a outras espécies nucleares:  
 Em (1919) Rutherford observou em laboratório:



(1932) J.D. Cockroft e E.T.S. Walton produziram em um acelerador de prótons:



Hoje, o projétil pode ser qualquer núcleo ou partícula subnuclear:  $p$ ,  $n$ ,  $\alpha$ , núcleos pesados ( $Z > 3$ ),  $e^\pm$ ,  $\pi$ ,  $K$ , etc.

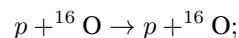
Nomenclatura:

- Espalhamento: colisão de uma partícula e um alvo em que a partícula incidente aparece como produto:  $a + A \rightarrow a + \dots$ ;
- Espalhamento elástico: espalhamento em que nenhuma partícula é criada e nenhuma energia é perdida:  $a + A \rightarrow a + A$ ;
- Espalhamento inelástico: espalhamento em que o alvo fica excitado ou se quebra ou outras partículas são produzidas:  

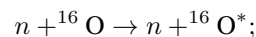
$$a + A \rightarrow \begin{cases} a + A^* \\ a + B + C + \dots \end{cases};$$
- Reação nuclear: colisões de uma partícula e um alvo em que os constituintes são rearranjados:  $a + A \rightarrow b + B$ .

Exemplos:

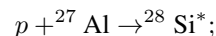
- Espalhamento elástico:



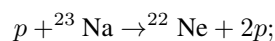
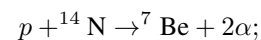
- Espalhamento inelástico:



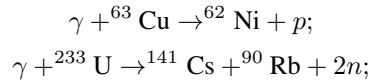
- Reação de captura:



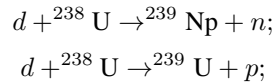
- Reações nucleares:



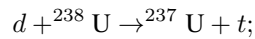
- Fotorreação ou reação fotonuclear:



- Reações de *stripping*:



- Reações de *pick-up*:

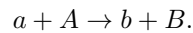


onde, para as 3 últimas reações, utilizamos algumas das abreviações abaixo:

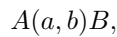
$n \equiv {}^1_0\text{n}$  (nêutron),  $p \equiv {}^1_1\text{H}$  (próton),  $d \equiv {}^2_1\text{H}$  (dêuteron),  $t \equiv {}^3_1\text{H}$  (trítio),  $h \equiv {}^3_2\text{He}$  (hélion),  $\alpha \equiv {}^4_2\text{He}$  (alfa).

Notação:

Seja a reação:



Esta notação é equivalente a



que ainda pode ser reduzida a

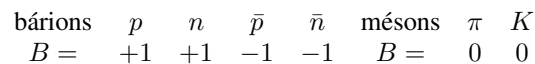


se  $A$  e  $B$  forem irrelevantes (conhecidos).

### A. Leis de conservação

Ao analisar as reações nucleares aplicamos as seguintes leis de conservação:

1. **Número bariônico** ( $B$ ): núcleons e antinúcleons criados/destruídos em pares.



Para  $E < 140$  MeV (limiar de produção de mésons), temos a conservação do número de prótons e nêutrons, separadamente;

2. **Carga**:

$$\left(\sum_i q_i\right)_{\text{antes}} = \left(\sum_i q_i\right)_{\text{depois}},$$

ou, para a força forte:

$$\left(\sum_i Z_i\right)_{\text{antes}} = \left(\sum_i Z_i\right)_{\text{depois}};$$

3. **Massa-energia e momento linear**:

$$E_a + E_A = E_b + E_B \quad \text{e} \quad \vec{p}_a + \vec{p}_A = \vec{p}_b + \vec{p}_B,$$

onde  $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$ ,  $p = |\vec{p}|$  e  $P = (E/c, \vec{p})$ ;

4. **Momento angular:**

$$\sum_i \vec{J}_i = \text{const.}$$

Por exemplo, na reação:

$$\begin{array}{r}
 L_i = \\
 J_i = \\
 |J_i - J_f| \leq l \leq J_i + J_f :
 \end{array}
 \begin{array}{r}
 {}^{10}\text{Be} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^1\text{H} + {}^{13}\text{C} \\
 3 \pm 0 \quad 1/2 \pm 1/2 \\
 3 \quad 1 \text{ ou } 0 \\
 l = 2, 3, \text{ ou } 4;
 \end{array}$$

5. **Paridade:** conservada pela força forte, violada pela força fraca. No exemplo anterior:

$$\Pi({}^{10}\text{Be}) = \Pi({}^4\text{He}) = \Pi({}^1\text{H}) = + \text{ (par)},$$

$$\Pi({}^{13}\text{C}) = - \text{ (ímpar)},$$

mas  $\Pi_i = (-1)^l \Pi_f$  :

$$\Rightarrow \Pi_1 \cdot \Pi_2 = (-1)^l \Pi_3 \cdot \Pi_4 \Rightarrow l = 3;$$

6. **Isospin ( $T$ ):** como  $m_p \approx m_n$ ,  $m_{\pi^\pm} \approx m_{\pi^0}$ , ... sugere-se que são estados diferentes com multiplicidade  $2T + 1$ :

partícula	$p$	$n$	$\pi^+$	$\pi^0$	$\pi^-$
$T$	1/2	1/2	1	1	1
$T_z$	+1/2	-1/2	+1	0	-1.

B. **Cinemática das reações - valor  $Q$** 

Seja a reação:  $a + A \rightarrow B + b$ , por exemplo:  $\alpha + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{17}\text{O} + p$ .

Considerando-se que a partícula  $\alpha$  incide sobre um alvo estacionário, temos, por conservação de energia, que:

$$(K_a + m_a c^2) + m_A c^2 = (K_B + m_B c^2) + (K_b + m_b c^2),$$

onde os índices  $a, A(b, B)$  referem-se a antes(depois) da colisão.

Define-se o *valor  $Q$*  da reação como a diferença entre as energias cinéticas depois e antes da reação — que é correspondente a:

$$Q = K_B + K_b - K_a = (m_a + m_A - m_b - m_B)c^2. \quad (1)$$

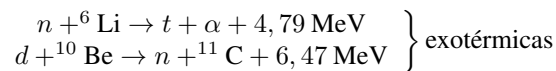
Conhecendo-se o valor  $Q$  da reação, pode-se calcular a massa de um dos produtos da reação por:

$$m_B = m_a + m_A - m_b - Q/c^2.$$

Ademais:

$$\begin{array}{l}
 Q > 0 : \text{ reação exotérmica (liberação de energia);} \\
 Q < 0 : \text{ reação endotérmica (absorção de energia).}
 \end{array}$$

Exemplos:



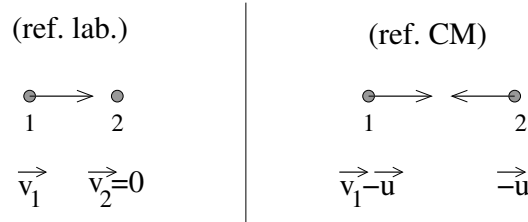
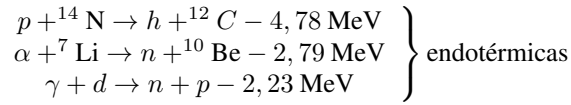


Figura 1: Colisão entre 2 partículas no referencial de laboratório (à esquerda) e do centro de massa (à direita).

Seja uma colisão entre 2 partículas no referencial de laboratório (projétil+alvo), tal que:

$$\vec{p}_1 = m_1 \vec{v}_1 \text{ e } K_1 = \frac{1}{2} m v_1^2$$

$$\vec{p}_2 = 0 \text{ e } K_2 = 0$$

e seja  $\vec{u}$  a velocidade do referencial do centro de massa (medida no referencial do laboratório).

No referencial do centro de massa:

$$\vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 = 0$$

$$\vec{p}'_1 = \vec{p}_c = m_1(\vec{v}_1 - \vec{u}) \text{ e } K'_1 = \frac{\vec{p}_c^2}{2m_1}$$

$$\vec{p}'_2 = -\vec{p}_c = -m_2 \vec{u} \text{ e } K'_2 = \frac{\vec{p}_c^2}{2m_2}$$

De onde, demonstra-se que (exercício 3):

$$p_c = \frac{m_2 p_1}{m_1 + m_2} \tag{2}$$

$$K_c = \frac{m_2 K_1}{m_1 + m_2} \tag{3}$$

Para que uma reação possa ocorrer, temos que satisfazer a condição:

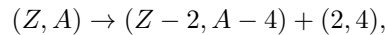
$$K_c + Q > 0 \Rightarrow K_c > -Q$$

Assim, para uma reação genérica ( $1 + 2 \rightarrow 3 + 4$ ), temos, no referencial de laboratório ( $K_2 = 0$ ):

- No caso exotérmico:  $Q > 0 \Rightarrow K_3 + K_4 > K_1$ , indicando que a reação sempre ocorre, mesmo que  $K_1 \rightarrow 0$ ;
- No caso endotérmico:  $Q < 0 \Rightarrow K_1 > K_3 + K_4$ , indicando que existe um limiar de energia para a reação ocorrer:  $K_1' > -Q$ , conforme o exercício 3.

1) O decaimento  $\alpha$ :

Seja o decaimento  $\alpha$ :



onde  $\alpha = (2, 4) = {}^4_2\text{He}$ .

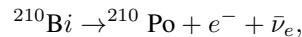
Supondo o núcleo pai inicialmente em repouso, o valor  $Q$  do decaimento é:

$$Q_\alpha = K_{(Z-2, A-4)} + K_\alpha = [m(Z, A) - m(Z - 2, A - 4) - m(2, 4)]c^2,$$

que é a *energia disponível* — na forma de energia cinética —, compartilhada pelo núcleo filho e a partícula  $\alpha$ . Se  $Q_\alpha > 0$ , o decaimento é energeticamente possível.

2) O decaimento  $\beta$

Seja o decaimento  $\beta$ :



o valor  $Q$  do decaimento é:

$$Q_\beta = K_e + K_\nu = [m({}^{210}\text{Bi}) - m({}^{210}\text{Po})]c^2 = (209,984095\text{ u} - 209,982848\text{ u})(931,5\text{ MeV/u}) = 1,161\text{ MeV},$$

que é a energia cinética disponível, compartilhada pela partícula  $\beta$  e o neutrino (desprezando-se a energia cinética do núcleo filho).: Assim, a energia máxima da partícula  $\beta$  é obtida quando a energia do neutrino é nula:  $K_e^{max} = 1,161\text{ MeV}$ .

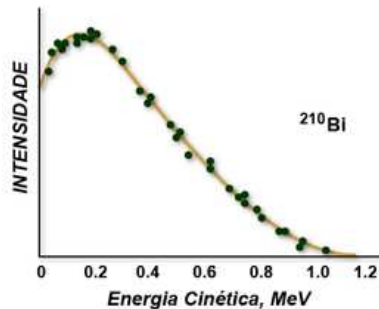


Figura 2: Decaimentos  $\beta$  do  ${}^{210}\text{Bi}$ : espectro energético contínuo e com um valor de energia cinética máxima.

Dentre uma amostra de isóbaros, as massas dos seus núcleos se distribuem em *parábolas de massa* (ou *curva de estabilidade de isóbaros*). Um núcleo, cujo  $Z$  não corresponde a um mínimo, pode procurar a configuração mais estável por  $\beta^-$  (aumentando  $Z$ ), ou por  $\beta^+$  e captura eletrônica  $\varepsilon$  (diminuindo  $Z$ ).

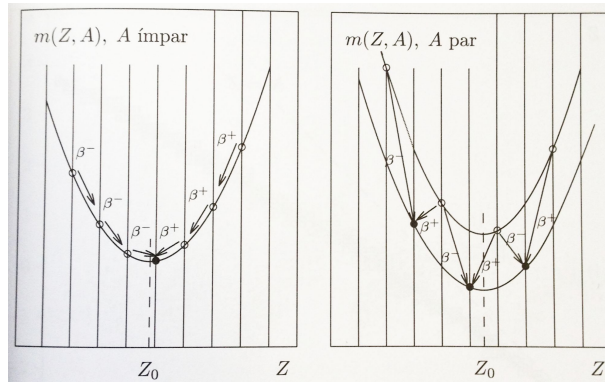


Figura 3: Parábolas de massa para  $A$  fixo (núcleos estáveis estão indicados por círculos cheios e os instáveis por círculos vazios).

Sejam  $m(Z, A)$  a massa do núcleo e  $M(Z, A)$  a massa atômica.

Decaimento beta negativo ( $\beta^-$ ):  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

$$Q_{\beta^-} = \{m(Z, A) - [m(Z + 1, A) + m_e]\}c^2 = \{m(Z, A) + Zm_e - [m(Z + 1, A) + Zm_e + m_e]\}c^2 \approx \\ \approx [M(Z, A) - M(Z + 1, A)]c^2;$$

Decaimento beta positivo ( $\beta^+$ ):  $p \rightarrow n + e^+ + \nu$

$$Q_{\beta^+} = \{m(Z, A) - [m(Z - 1, A) + m_e]\}c^2 = \{m(Z, A) + Zm_e - [m(Z - 1, A) + Zm_e + m_e]\}c^2 = \\ = \{m(Z, A) + Zm_e - [m(Z - 1, A) + (Z - 1)m_e + 2m_e]\}c^2 \approx \\ \approx [M(Z, A) - M(Z - 1, A) - 2m_e]c^2;$$

Captura eletrônica ( $\varepsilon$ ):  $p + e^- \rightarrow n + \nu$

$$Q_\varepsilon = [m(Z, A) + m_e - m(Z - 1, A)]c^2 = \{m(Z, A) + Zm_e - [m(Z - 1, A) + Zm_e - m_e]\}c^2 \approx \\ \approx [M(Z, A) - M(Z - 1, A)]c^2,$$

onde as aproximações nas últimas passagens vêm do fato de desprezarmos a energia de ligação dos elétrons atômicos.

De onde podemos concluir que, como a energia liberada deve ser sempre positiva para o processo ocorrer:

$$M_{Z,A} > M_{Z+1,A} \Rightarrow \beta^- \text{ pode ocorrer;}$$

$$M_{Z,A} > M_{Z-1,A} \Rightarrow \varepsilon \text{ pode ocorrer;}$$

$$M_{Z,A} > M_{Z-1,A} + 2m_e \Rightarrow \beta^+ \text{ pode ocorrer.}$$

a maior diferença de energia necessária para o decaimento  $\beta^+$  ocorrer explica o fato de termos poucos emissores de pósitrons na natureza.

3) A fotoprodução de píons:

Seja a reação:

$$p + \gamma \rightarrow p + \pi^0$$

$$K_p^i + m_p c^2 + E_\gamma = K_p^f + m_p c^2 + K_\pi^f + m_\pi c^2 \Rightarrow$$

$$\Delta K_p = K_p^i - K_p^f = K_\pi^f + m_\pi c^2 - E_\gamma \geq m_\pi c^2 - E_\gamma \Rightarrow E_\gamma \gtrsim 135 \text{ MeV},$$

mas outros fótons de energias mais baixas podem dar origem ao processo desde que o próton seja rápido o suficiente (no referencial do próton, a frequência do fóton é aumentada por efeito Doppler).

(1965) Penzias e Wilson descobriram a radiação cósmica de fundo, com espectro de corpo negro de  $T = 2,7 \text{ K}$  (com energia equivalente de  $E_\gamma = 6 \times 10^{-4} \text{ eV}$ ). (1966) Greisen e, independentemente, Zatsepin e Kuz'min calcularam que um próton com  $E = 4 \times 10^{19} \text{ eV}$  interagiria com a radiação cósmica de fundo, produzindo píons, tal que a energia do próton seria degradada durante a propagação pelo espaço cósmico, a partir deste limiar de energia (corte GZK). (2008) O Observatório Pierre Auger publica, pela primeira vez, uma supressão no espectro de raios cósmicos com  $E > 4 \times 10^{19} \text{ eV}$ .

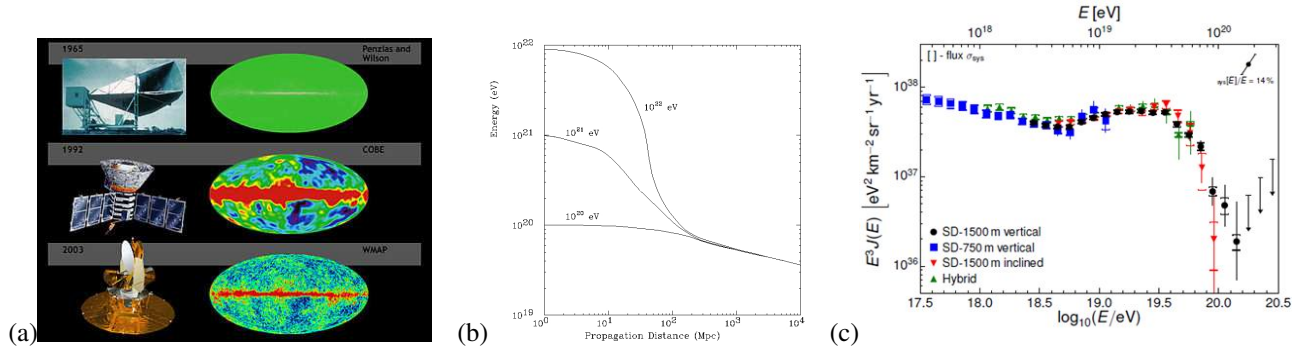
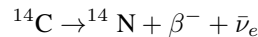
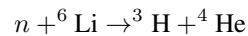
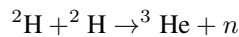
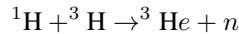


Figura 4: (a) Medidas da radiação cósmica de fundo, remanescente do Big Bang;(b) o corte GZK; (c) supressão no fluxo de raios cósmicos de ultra-alta energia, medidas do Observatório Pierre Auger (2015).

## II. EXERCÍCIOS

1. Determine o valor Q de cada uma das reações abaixo:

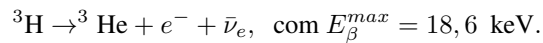


2. Numa colisão elástica entre um fóton e um próton (inicialmente em repouso), mostre que se o fóton é retroespalhado, sua energia inicial é:

$$E_0 = \frac{1}{2}(K + pc),$$

onde  $K$  e  $p$  são a energia cinética e o momento finais do próton.

3. Para uma colisão entre 2 partículas, de massas  $m_1$  e  $m_2$  e velocidades  $\vec{v}_1 \neq 0$  e  $\vec{v}_2 = 0$  (no referencial de laboratório).
- (a) Demonstre que o momento  $p_c = m_2 u$ , onde  $u$  é a velocidade do centro de massa, e a energia cinética total  $K_c = K'_1 + K'_2$ , ambos no referencial centro de massa, são dados pelas equações 2 e 3, respectivamente;
- (b) Determine, em função de  $Q$ , o limiar de energia da partícula 1 no centro de massa.
4.  $^{34}\text{Cl}$  decai em  $^{34}\text{S}$ . Se a diferença de massa entre os núclídeos é de  $5,52 \text{ MeV}/c^2$ , qual é a máxima energia da partícula  $\beta$ ? Escreva a reação correspondente e determine se trata-se de um decaimento  $\beta^+$  ou  $\beta^-$ .
5. O trítio decai por  $\beta^-$  através da equação:



Calcule o valor  $Q$  da reação e estime um limite superior para a massa do neutrino.