

Aula 10: Reações nucleares

Introdução à Física Nuclear

Prof. Marcelo A. Leigui de Oliveira

Centro de Ciências Naturais e Humanas
Universidade Federal do ABC
Av. dos Estados, 5001
09210-580 Santo André-SP

7 de novembro de 2024



Universidade Federal do ABC

- 1 Reações nucleares
 - Leis de conservação
 - Cinemática das reações - valor Q
- 2 Exercícios

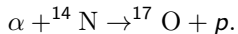
Reações nucleares

Reações nucleares são colisões entre 2 núcleos, tais colisões podem ou não dar origem a outras espécies nucleares.

Reações nucleares

Reações nucleares são colisões entre 2 núcleos, tais colisões podem ou não dar origem a outras espécies nucleares.

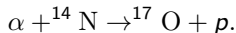
Em **(1919)** Rutherford observou em laboratório:



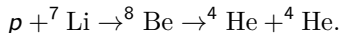
Reações nucleares

Reações nucleares são colisões entre 2 núcleos, tais colisões podem ou não dar origem a outras espécies nucleares.

Em **(1919)** Rutherford observou em laboratório:



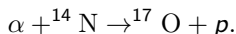
(1932) J.D. Cockroft e E.T.S. Walton produziram em um acelerador de prótons:



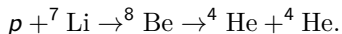
Reações nucleares

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 , α , núcleos pesados ($Z > 3$), e^\pm , π , K , etc.

Reações nucleares

Nomenclatura:

Reações nucleares

Nomenclatura:

- Espalhamento: colisão de uma partícula e um alvo em que a partícula incidente aparece como produto: $a + A \rightarrow a + \dots$;

Reações nucleares

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: $a + A \rightarrow a + A$;

Reações nucleares

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: $a + A \rightarrow \begin{cases} a + A^* \\ a + B + C + \dots \end{cases}$;

Reações nucleares

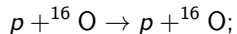
Nomenclatura:

- 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: $a + A \rightarrow b + B$.

Reações nucleares

Exemplos:

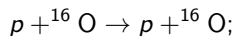
- Espalhamento elástico:



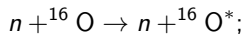
Reações nucleares

Exemplos:

- Espalhamento elástico:



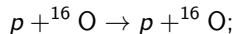
- Espalhamento inelástico:



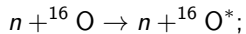
Reações nucleares

Exemplos:

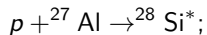
- Espalhamento elástico:



- Espalhamento inelástico:



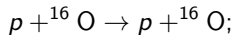
- Reação de captura:



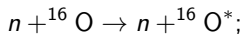
Reações nucleares

Exemplos:

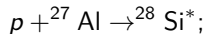
- Espalhamento elástico:



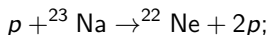
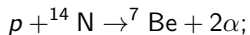
- Espalhamento inelástico:



- Reação de captura:

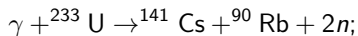
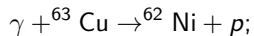


- Reações nucleares:



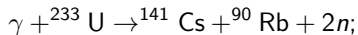
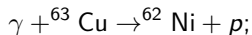
Reações nucleares

- Fotorreação ou reação fotonuclear:

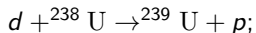
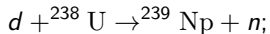


Reações nucleares

- Fotorreação ou reação fotonuclear:

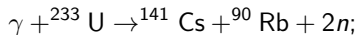
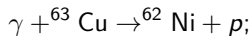


- Reações de *stripping*:

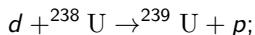
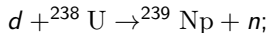


Reações nucleares

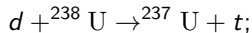
- Fotorreação ou reação fotonuclear:



- Reações de *stripping*:

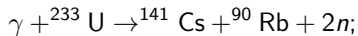
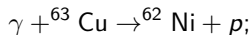


- Reações de *pick-up*:

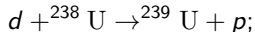
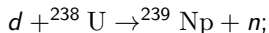


Reações nucleares

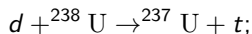
- Fotorreação ou reação fotonuclear:



- 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), $h \equiv {}^3_2\text{He}$ (hélio), $\alpha \equiv {}^4_2\text{He}$ (alfa).

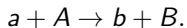
Reações nucleares

Notação:

Reações nucleares

Notação:

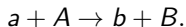
Seja a reação:



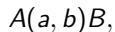
Reações nucleares

Notação:

Seja a reação:



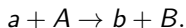
Esta notação é equivalente a



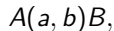
Reações nucleares

Notação:

Seja a reação:



Esta notação é equivalente a



que ainda pode ser reduzida a



se A e B forem irrelevantes (conhecidos).

Leis de conservação

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

Leis de conservação

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

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

Leis de conservação

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

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

bárions	p	n	\bar{p}	\bar{n}	mésons	π	K
$B =$	+1	+1	-1	-1	$B =$	0	0

Leis de conservação

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

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

bárions	p	n	\bar{p}	\bar{n}	mésons	π	K
$B =$	$+1$	$+1$	-1	-1	$B =$	0	0

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

Leis de conservação

- **Carga:**

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

Leis de conservação

- **Carga:**

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

ou, para a força forte:

$$\left(\sum_i Z_i\right)^{\text{antes}} = \left(\sum_i Z_i\right)^{\text{depois}},$$

Leis de conservação

- **Massa-energia:**

$$E_a + E_A = E_b + E_B$$

Leis de conservação

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

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

Leis de conservação

- **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 $P = (E/c, \vec{p})$;

Leis de conservação

- **Momento angular:**

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

Leis de conservação

- **Momento angular:**

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

Por exemplo, na reação:

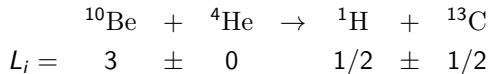


Leis de conservação

- **Momento angular:**

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

Por exemplo, na reação:

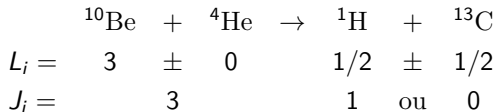


Leis de conservação

- **Momento angular:**

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

Por exemplo, na reação:

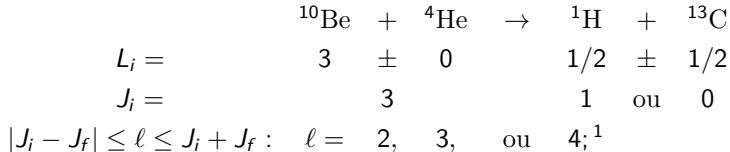


Leis de conservação

- **Momento angular:**

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

Por exemplo, na reação:



¹Obs.:vide paridade.

Leis de conservação

- **Paridade:** conservada pela força forte, violada pela força fraca.

Leis de conservação

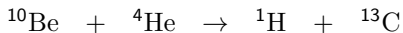
- **Paridade:** conservada pela força forte, violada pela força fraca. No exemplo anterior:



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

Leis de conservação

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

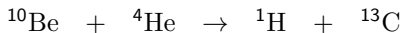


$$\Pi({}^{10}\text{Be}) = \Pi({}^4\text{He}) = \Pi({}^1\text{H}) = + \text{ (par)},$$

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

Leis de conservação

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



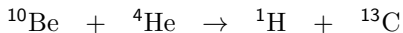
$$\Pi({}^{10}\text{Be}) = \Pi({}^4\text{He}) = \Pi({}^1\text{H}) = + \text{ (par)},$$

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

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

Leis de conservação

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



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

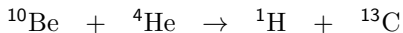
$$\Pi({}^{13}\text{C}) = - \text{ (ímpar)},$$

$$\text{mas } \Pi_i = (-1)^\ell \Pi_f :$$

$$\Rightarrow \Pi_1 \cdot \Pi_2 = (-1)^\ell \Pi_3 \cdot \Pi_4$$

Leis de conservação

- **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 $\Pi_i = (-1)^\ell \Pi_f$:

$$\Rightarrow \Pi_1 \cdot \Pi_2 = (-1)^\ell \Pi_3 \cdot \Pi_4 \Rightarrow \ell = 3;^2$$

²Obs.:vide momento angular.

Leis de conservação

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

Leis de conservação

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

partícula p n π^+ π^0 π^-

Leis de conservação

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

partícula	p	n	π^+	π^0	π^-
T	1/2	1/2	1	1	1

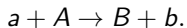
Leis de conservação

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

partícula	p	n	π^+	π^0	π^-
T	1/2	1/2	1	1	1
T_z	+1/2	-1/2	+1	0	-1

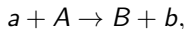
Cinemática das reações - valor Q

Seja a reação:

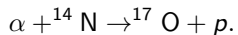


Cinemática das reações - valor Q

Seja a reação:

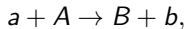


por exemplo:

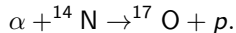


Cinemática das reações - valor Q

Seja a reação:



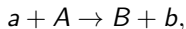
por exemplo:



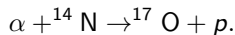
Considerando-se que a partícula α incide sobre um alvo estacionário ...

Cinemática das reações - valor Q

Seja a reação:



por exemplo:

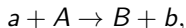


Considerando-se que a partícula α incide sobre um alvo estacionário, temos, por conservação de energia, que:

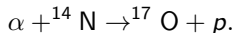
$$(K_a + m_a c^2) + m_A c^2 = (K_B + m_B c^2) + (K_b + m_b c^2)$$

Cinemática das reações - valor Q

Seja a reação:



por exemplo:



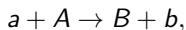
Considerando-se que a partícula α incide sobre um alvo estacionário, temos, por conservação de energia, que:

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

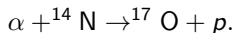
onde os índices $a, A(b, B)$ referem-se a antes(depois) da colisão.

Cinemática das reações - valor Q

Seja a reação:



por exemplo:



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

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

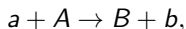
onde os índices $a, A(b, B)$ referem-se a antes(depois) da colisão.

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

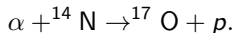
$$Q = K_B + K_b - K_a.$$

Cinemática das reações - valor Q

Seja a reação:



por exemplo:



Considerando-se que a partícula α 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:

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

Cinemática das reações - valor Q

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

Cinemática das reações - valor Q

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

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

Cinemática das reações - valor Q

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 ...

Cinemática das reações - valor Q

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:

$Q > 0$: reação exotérmica (liberação de energia);

Cinemática das reações - valor Q

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

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

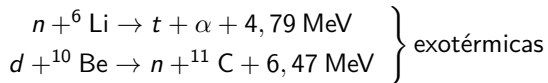
Ademais:

$Q > 0$: reação exotérmica (liberação de energia);

$Q < 0$: reação endotérmica (absorção de energia).

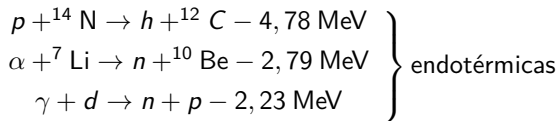
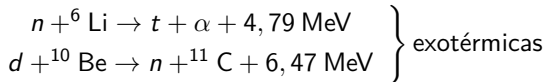
Cinemática das reações - valor Q

Exemplos:



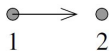
Cinemática das reações - valor Q

Exemplos:



Cinemática das reações - valor Q

(ref. lab.)



$$\vec{v}_1 \quad \vec{v}_2 = 0$$

(ref. CM)

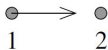


$$\vec{v}_1 - \vec{u} \quad -\vec{u}$$

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

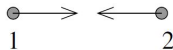
Cinemática das reações - valor Q

(ref. lab.)



$$\vec{v}_1 \quad \vec{v}_2 = 0$$

(ref. CM)



$$\vec{v}_1 - \vec{u} \quad -\vec{u}$$

Figura: 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)

Cinemática das reações - valor Q

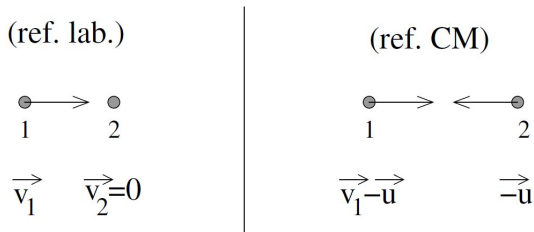


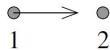
Figura: Colisão entre 2 partículas no referencial de laboratório (à esquerda) e do centro de massa (à direita).

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

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

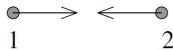
Cinemática das reações - valor Q

(ref. lab.)



$$\vec{v}_1 \quad \vec{v}_2 = 0$$

(ref. CM)



$$\vec{v}_1 - \vec{u} \quad -\vec{u}$$

Figura: 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:

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

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

Cinemática das reações - valor Q

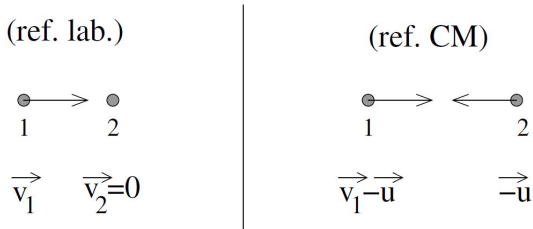


Figura: Colisão entre 2 partículas no referencial de laboratório (à esquerda) e do centro de massa (à direita).

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

Cinemática das reações - valor Q

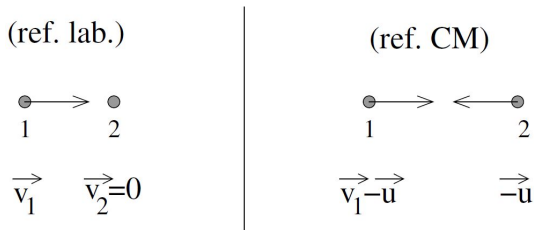


Figura: Colisão entre 2 partículas no referencial de laboratório (à esquerda) e do centro de massa (à direita).

E seja \vec{u} a velocidade do referencial do centro de massa (medida no referencial do laboratório). No referencial do centro de massa:

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

Cinemática das reações - valor Q

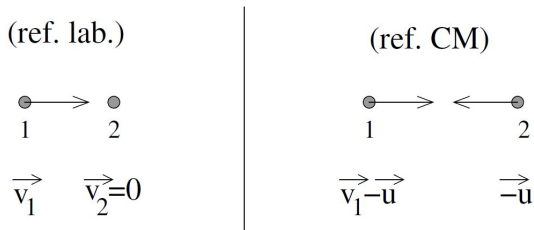


Figura: Colisão entre 2 partículas no referencial de laboratório (à esquerda) e do centro de massa (à direita).

E seja \vec{u} a velocidade do referencial do centro de massa (medida no referencial do laboratório). No referencial do centro de massa:

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

$$\vec{p}_1' = \vec{p}_c = m_1(\vec{v}_1 - \vec{u}) \text{ e } K_1' = \frac{\vec{p}_c^2}{2m_1}$$

Cinemática das reações - valor Q

(ref. lab.)



$$\vec{v}_1 \quad \vec{v}_2=0$$

(ref. CM)



$$\vec{v}_1 - \vec{u} \quad -\vec{u}$$

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

E seja \vec{u} a velocidade do referencial do centro de massa (medida no referencial do laboratório). No referencial do centro de massa:

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

$$\vec{p}_1' = \vec{p}_c = m_1(\vec{v}_1 - \vec{u}) \text{ e } K_1' = \frac{\vec{p}_c^2}{2m_1}$$

$$\vec{p}_2' = -\vec{p}_c = -m_2\vec{u} \text{ e } K_2' = \frac{\vec{p}_c^2}{2m_2}$$

Cinemática das reações - valor Q

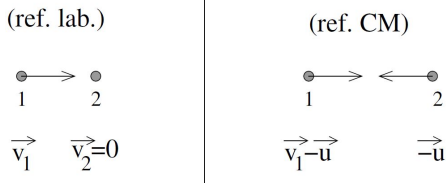


Figura: Colisão entre 2 partículas no referencial de laboratório (à esquerda) e do centro de massa (à direita).

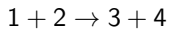
De onde, demonstra-se que (exercício 3):

$$p_c = \frac{m_2 p_1}{m_1 + m_2} \quad (2)$$

$$K_c = \frac{m_2 K_1}{m_1 + m_2} \quad (3)$$

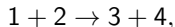
Cinemática das reações - valor Q

Assim, para uma reação genérica:



Cinemática das reações - valor Q

Assim, para uma reação genérica:

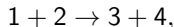


temos, no referencial de laboratório ($K_2 = 0$):

- No caso exotérmico: $Q > 0 \Rightarrow K_3 + K_4 > K_1$, indicando que a reação sempre ocorre, mesmo que $K_1 \rightarrow 0$;

Cinemática das reações - valor Q

Assim, para uma reação genérica:

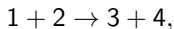


temos, no referencial de laboratório ($K_2 = 0$):

- 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.

Cinemática das reações - valor Q

Assim, para uma reação genérica:



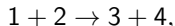
temos, no referencial de laboratório ($K_2 = 0$):

- 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. No exercício 3, pede-se para demonstrar que:

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

Cinemática das reações - valor Q

Assim, para uma reação genérica:



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. No exercício 3, pede-se para demonstrar que:

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

O decaimento α é espontâneo \rightarrow excedente de energia cinética.

O decaimento α

Seja o decaimento α :

$$(Z, A) \rightarrow (Z - 2, A - 4) + (2, 4),$$

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

O decaimento α

Seja o decaimento α :

$$(Z, A) \rightarrow (Z - 2, A - 4) + (2, 4),$$

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

Supondo o núcleo pai inicialmente em repouso

O decaimento α

Seja o decaimento α :

$$(Z, A) \rightarrow (Z - 2, A - 4) + (2, 4),$$

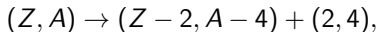
onde $\alpha = (2, 4) = {}_2^4\text{He}$.

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

$$Q_\alpha = K_{(Z-2, A-4)} + K_\alpha$$

O decaimento α

Seja o decaimento α :



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

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

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

O decaimento α

Seja o decaimento α :

$$(Z, A) \rightarrow (Z - 2, A - 4) + (2, 4),$$

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*

O decaimento α

Seja o decaimento α :

$$(Z, A) \rightarrow (Z - 2, A - 4) + (2, 4),$$

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

O decaimento α

Seja o decaimento α :

$$(Z, A) \rightarrow (Z - 2, A - 4) + (2, 4),$$

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

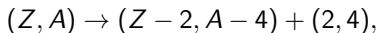
Supondo o núcleo pai inicialmente em repouso, o valor Q do decaimento é:

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

que é a *energia disponível* — na forma de energia cinética —, compartilhada pelo núcleo filho e a partícula α .

O decaimento α

Seja o decaimento α :



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 α . Se $Q_\alpha > 0$, o decaimento é energeticamente possível.

O decaimento β

Seja o decaimento β :



O decaimento β

Seja o decaimento β :



o valor Q do decaimento é:

$$Q_{\beta} = K_e + K_{\nu}$$

O decaimento β

Seja o decaimento β :



o valor Q do decaimento é:

$$Q_{\beta} = K_e + K_{\nu} = [m({}^{210}\text{Bi}) - m({}^{210}\text{Po})]c^2$$

O decaimento β

Seja o decaimento β :



o valor Q do decaimento é:

$$\begin{aligned} Q_{\beta} &= K_e + K_{\nu} = [m({}^{210}\text{Bi}) - m({}^{210}\text{Po})]c^2 = \\ &= (209,984095 - 209,982848)uc^2 \end{aligned}$$

O decaimento β

Seja o decaimento β :



o valor Q do decaimento é:

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

O decaimento β

Seja o decaimento β :



o valor Q do decaimento é:

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

O decaimento β

Seja o decaimento β :



o valor Q do decaimento é:

$$Q_{\beta} = K_e + K_{\nu} = [m({}^{210}\text{Bi}) - m({}^{210}\text{Po})]c^2 =$$

$$= (209,984095 - 209,982848)(931,5 \text{ MeV}/c^2)c^2 = 1,161 \text{ MeV},$$

que é a energia cinética disponível.

O decaimento β

Seja o decaimento β :



o valor Q do decaimento é:

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

que é a energia cinética disponível, compartilhada pela partícula β e o neutrino (desprezando-se a energia cinética do núcleo filho).

O decaimento β

Seja o decaimento β :



o valor Q do decaimento é:

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

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

O decaimento β

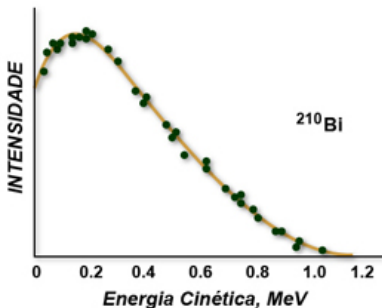


Figura: Decaimentos β do ^{210}Bi : espectro energético contínuo e com um valor de energia cinética máxima.

O decaimento β

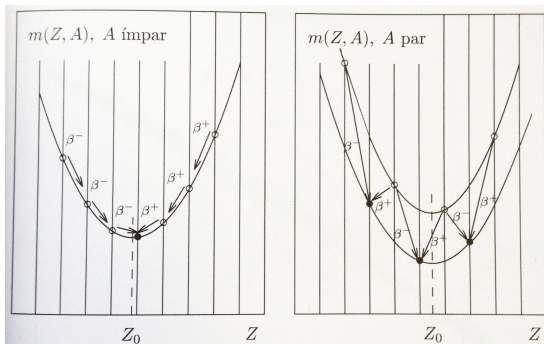


Figura: Parábolas de massa para A fixo (núcleos estáveis estão indicados por círculos cheios e os instáveis por círculos vazios).

Dentre uma amostra de isóbaros, as massas dos seus núcleos se distribuem em *parábolas de massa* (ou *curva de estabilidade de isóbaros*).

O decaimento β

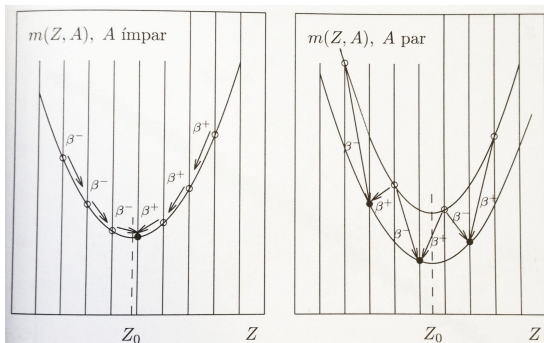


Figura: Parábolas de massa para A fixo (núcleos estáveis estão indicados por círculos cheios e os instáveis por círculos vazios).

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 β^- (aumentando Z), ou por β^+ e captura eletrônica ϵ (diminuindo Z).

O decaimento β

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

O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :



O decaimento β

Sejam $m(Z, A)$ a massa do núcleo e $M(Z, A)$ a massa atômica.
Para o decaimento β^- :



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

O decaimento β

Sejam $m(Z, A)$ a massa do núcleo e $M(Z, A)$ a massa atômica.
Para o decaimento β^- :

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$
$$Q_{\beta^-} = \{m(Z, A) - [m(Z + 1, A) + m_e]\}c^2 =$$
$$= \{m(Z, A) + Zm_e - [m(Z + 1, A) + Zm_e + m_e]\}c^2$$

O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :



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

O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :



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

O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :



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

Para o decaimento β^+ :



O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :



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

Para o decaimento β^+ :



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

O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :



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

Para o decaimento β^+ :



$$\begin{aligned} Q_{\beta^+} &= \{m(Z, A) - [m(Z - 1, A) + m_e]\}c^2 = \\ &= \{m(Z, A) + Zm_e - [m(Z - 1, A) + Zm_e + m_e]\}c^2 \end{aligned}$$

O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :



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

Para o decaimento β^+ :



$$\begin{aligned} Q_{\beta^+} &= \{m(Z, A) - [m(Z - 1, A) + m_e]\}c^2 = \\ &= \{m(Z, A) + Zm_e - [m(Z - 1, A) + Zm_e + m_e]\}c^2 = \\ &= \{m(Z, A) + Zm_e - [m(Z - 1, A) + (Z - 1)m_e + 2m_e]\}c^2 \end{aligned}$$

O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :



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

Para o decaimento β^+ :



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

O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :



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

Para o decaimento β^+ :



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

O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :



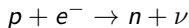
$$Q_{\beta^-} = \{m(Z, A) - [m(Z + 1, A) + m_e]\}c^2 \approx [M(Z, A) - M(Z + 1, A)]c^2;$$

Para o decaimento β^+ :



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

Para a captura eletrônica:



O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :



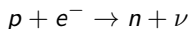
$$Q_{\beta^-} = \{m(Z, A) - [m(Z + 1, A) + m_e]\}c^2 \approx [M(Z, A) - M(Z + 1, A)]c^2;$$

Para o decaimento β^+ :



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

Para a captura eletrônica:



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

O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :



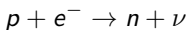
$$Q_{\beta^-} = \{m(Z, A) - [m(Z + 1, A) + m_e]\}c^2 \approx [M(Z, A) - M(Z + 1, A)]c^2;$$

Para o decaimento β^+ :



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

Para a captura eletrônica:



$$\begin{aligned} Q_\epsilon &= [m(Z, A) + m_e - m(Z - 1, A)]c^2 = \\ &= \{m(Z, A) + Zm_e - [m(Z - 1, A) + Zm_e - m_e]\}c^2 \end{aligned}$$

O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :



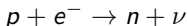
$$Q_{\beta^-} = \{m(Z, A) - [m(Z + 1, A) + m_e]\}c^2 \approx [M(Z, A) - M(Z + 1, A)]c^2;$$

Para o decaimento β^+ :



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

Para a captura eletrônica:



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

O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

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

Para o decaimento β^+ :

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu$$

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

Para a captura eletrônica:

$$p + e^- \rightarrow n + \nu$$

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

O decaimento β

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

Para o decaimento β^- :

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

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

Para o decaimento β^+ :

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu$$

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

Para a captura eletrônica:

$$p + e^- \rightarrow n + \nu$$

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

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

O decaimento β

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

O decaimento β

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

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

O decaimento β

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

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

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

O decaimento β

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

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

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

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

O decaimento β

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

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

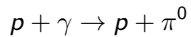
$$M_{Z,A} > M_{Z-1,A} \Rightarrow \varepsilon \text{ pode ocorrer;}$$

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

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

A fotoprodução de píons

Seja a reação:



A fotoprodução de píons

Seja a reação:

$$p + \gamma \rightarrow p + \pi^0$$
$$K_p^i + m_p c^2 + E_\gamma = K_p^f + m_p c^2 + K_\pi^f + m_\pi c^2$$

A fotoprodução de píons

Seja a reação:

$$p + \gamma \rightarrow p + \pi^0$$
$$K_p^i + \cancel{m_p c^2} + E_\gamma = K_p^f + \cancel{m_p c^2} + K_\pi^f + m_\pi c^2$$

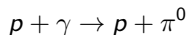
A fotoprodução de píons

Seja a reação:

$$p + \gamma \rightarrow p + \pi^0$$
$$K_p^i + \cancel{m_p c^2} + E_\gamma = K_p^f + \cancel{m_p c^2} + K_\pi^f + m_\pi c^2 \Rightarrow$$
$$\Delta K_p = K_p^i - K_p^f = K_\pi^f + m_\pi c^2 - E_\gamma$$

A fotoprodução de píons

Seja a reação:

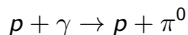


$$K_p^i + \cancel{m_p c^2} + E_\gamma = K_p^f + \cancel{m_p c^2} + K_\pi^f + m_\pi c^2 \Rightarrow$$

$$\Delta K_p = K_p^i - K_p^f = K_\pi^f + m_\pi c^2 - E_\gamma \geq m_\pi c^2 - E_\gamma$$

A fotoprodução de píons

Seja a reação:

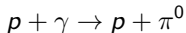


$$K_p^i + \cancel{m_p c^2} + E_\gamma = K_p^f + \cancel{m_p c^2} + K_\pi^f + m_\pi c^2 \Rightarrow$$

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

A fotoprodução de píons

Seja a reação:



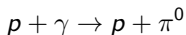
$$K_p^i + \cancel{m_p c^2} + E_\gamma = K_p^f + \cancel{m_p c^2} + K_\pi^f + m_\pi c^2 \Rightarrow$$

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

mas outros fótons de energias mais baixas podem dar origem ao processo desde que o próton seja rápido o suficiente.

A fotoprodução de píons

Seja a reação:



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

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

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).

A fotoprodução de píons

(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 $E_\gamma = 6 \times 10^{-4} \text{ eV}$).

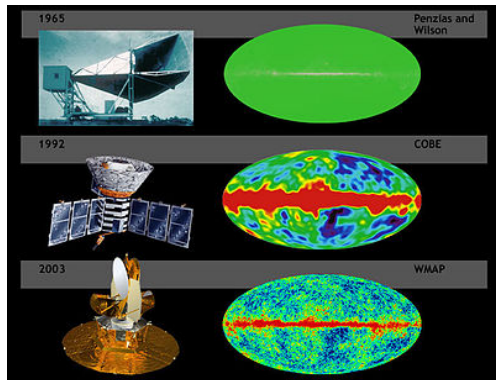


Figura: Medidas da radiação cósmica de fundo, remanescente do Big Bang.

A fotoprodução de píons

(1966) Greisen e, independentemente, Zatsepin e Kuz'min calcularam que um próton com $E = 4 \times 10^{19}$ 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).

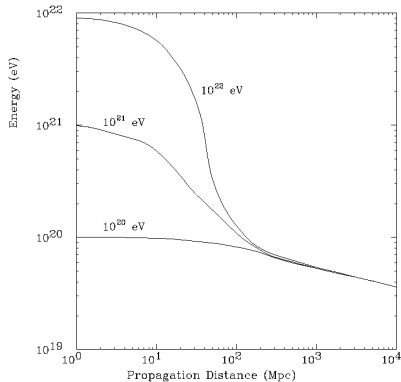


Figura: O corte GZK.

A fotoprodução de píons

(2008) O Observatório Pierre Auger publica, pela primeira vez, uma supressão no espectro de raios cósmicos com $E > 4 \times 10^{19}$ eV.

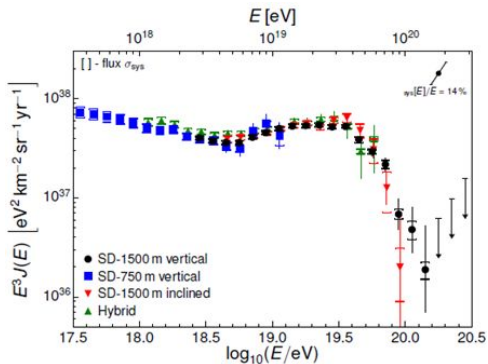


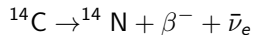
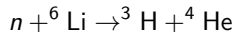
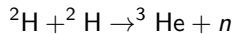
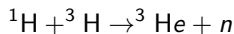
Figura: Supressão no fluxo de raios cósmicos de ultra-alta energia, medidas do Observatório Pierre Auger (2015).

1 Reações nucleares

2 Exercícios

Exercícios

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



Exercícios

- 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.

Exercícios

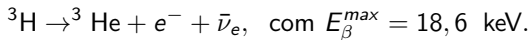
- 9 Para uma colisão entre 2 partículas, de massas m_1 e m_2 e velocidades $\vec{v}_1 \neq 0$ e $\vec{v}_2 = 0$ (no referencial de laboratório). (a) Demonstre que o momento $p_c = m_2 u$, onde u é a velocidade do centro de massa, e a energia cinética total $K_c = K'_1 + K'_2$, ambos no referencial centro de massa, são dados pelas equações 2 e 3, respectivamente; (b) Determine o limiar de energia da partícula 1 no referencial do centro de massa, ou seja, o valor mínimo de K_1 , em função de Q .

Exercícios

- 4 ^{34}Cl decai em ^{34}S . Se a diferença de massa entre os núclídeos é de $5,52 \text{ MeV}/c^2$, qual é a máxima energia da partícula β ? Escreva a reação correspondente e determine se trata-se de um decaimento β^+ ou β^- .

Exercícios

- 5 O trítio decai por β^- através da equação:



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