

# Física Moderna I

## Aula 06 - Tipos de Decaimentos - Parte 1

Jefferson Rodrigues de Oliveira

2024

### Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Energia da Reação Nuclear</b>	<b>1</b>
<b>4</b>	<b>Tipos de Decaimentos Naturais</b>	<b>2</b>
4.1	Decaimento $\alpha$ . . . . .	3
4.1.1	Principais Características . . . . .	3
4.1.2	Reação Nuclear . . . . .	5
4.1.3	Processo de Tunelamento . . . . .	7
4.2	Decaimento $\beta^-$ . . . . .	9
4.2.1	Características do Decaimento Beta Menos . . . . .	9
4.2.2	Reação Nuclear . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Exercícios</b>	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>Respostas</b>	<b>13</b>
<b>8</b>	<b>Referências</b>	<b>14</b>

## 1 Introdução

A **energia das reações nucleares** é um dos conceitos fundamentais da Física Moderna, sendo responsável por explicar processos tanto **naturais** quanto **artificiais**, como o decaimento radioativo e as reações em reatores nucleares. Por meio do estudo da energia liberada ou absorvida em reações nucleares, podemos compreender melhor fenômenos de instabilidade atômica e suas aplicações tecnológicas, desde a geração de energia até o tratamento de doenças. Esta aula abordará os diferentes tipos de reações nucleares, com destaque para as reações dos decaimentos alpha ( $\alpha$ ) e beta menos ( $\beta^-$ ).

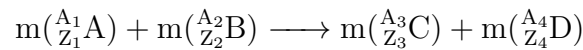
## 2 Objetivos

- Compreender o conceito de energia liberada ou absorvida em reações nucleares.
- Compreender o decaimento alfa e sua importância na estabilidade nuclear.
- Aplicar o conceito de energia de reação nuclear em cálculos simples.
- Introduzir o fenômeno do tunelamento quântico relacionado ao decaimento alfa.
- Compreender o decaimento beta menos.

## 3 Energia da Reação Nuclear

A **energia da reação nuclear** ( $Q$ ) refere-se à **quantidade de energia liberada ou absorvida durante uma reação nuclear**. Esse processo ocorre quando os núcleos atômicos sofrem transformações, como fusão, fissão, ou decaimento radioativo. A energia envolvida nas reações nucleares é **muito maior** do que nas reações químicas, pois está relacionada à **força que mantém os prótons e nêutrons unidos no núcleo**.

De uma geral, uma reação nuclear tem a seguinte forma:



Pela conservação da massa e carga, temos:

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4 \text{ e } Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$$

A massa nuclear pode descrito em termos da massa atômica da seguinte forma:

$$m({}_Z^AX) = M({}_Z^AX) - Zm_e$$

Substituindo a massa nuclear na equação do reação, todos as massa dos elétrons são canceladas, sobrando apenas as massas atômicas. Portanto, a equação da reação nuclear é expressa por:

$$\underbrace{M({}_{Z_1}^{A_1}A) + M({}_{Z_2}^{A_2}B)}_{\text{Massa dos reagentes}} \longrightarrow \underbrace{M({}_{Z_3}^{A_3}C) + M({}_{Z_4}^{A_4}D)}_{\text{Massa dos produtos}}$$

A energia da reação nuclear é calculada pela diferença de massa entre os reagentes e os produtos nucleares multiplicado pela velocidade da luz ao quadrado:

$$Q = \Delta M c^2$$

Em que  $\Delta M$  é a diferença entre as massas dos reagentes com as massas dos produtos nucleares. Assim:

$$Q = [M({}_{Z_1}^{A_1}A) + M({}_{Z_2}^{A_2}A) - M({}_{Z_3}^{A_3}A) - M({}_{Z_4}^{A_4}A)] c^2$$

As **reações exoenergéticas** (ou exoérgicas) são aquelas que **liberam energia** para o ambiente. Isso significa que a **energia dos reagentes é maior que a dos produtos** ( $Q > 0$ ), e essa diferença de energia é liberada na forma de radiação, calor, ou energia cinética.

As **reações endoenergéticas** (ou endoérgicas) são aquelas que **absorvem energia** do ambiente. Isso significa que a **energia dos reagentes é menor que a dos produtos** ( $Q < 0$ ), e, para que a reação ocorra, é necessário fornecer energia ao sistema como ocorrem em reações nucleares artificiais.

## 4 Tipos de Decaimentos Naturais

Os decaimentos radioativos naturais são processos espontâneos em que núcleos atômicos instáveis se transformam em núcleos mais estáveis, emitindo radiação na forma de partículas ou energia. Esses processos ocorrem naturalmente em elementos radioativos, como o urânio e o carbono-14, e são classificados em três tipos principais: decaimento alfa, no qual o núcleo emite partículas alfa (núcleo de hélio); decaimento beta, onde há a emissão de elétrons ou pósitrons; e a emissão de radiação gama, que libera energia sem alterar o número de prótons ou nêutrons no núcleo.

Os decaimentos naturais, como o decaimento alfa e o decaimento beta, são **reações exoenergéticas**, ou seja, **liberam energia**. Isso ocorre porque, durante esses processos, o núcleo que decai se transforma em um núcleo mais estável, com uma menor energia total. A diferença de energia entre o núcleo original e o núcleo resultante é liberada em forma de energia cinética das partículas emitidas (alfa ou beta) e radiação gama, quando presente.

Estudar esses decaimentos é essencial para entender fenômenos de instabilidade nuclear e suas aplicações em diversas áreas da ciência e tecnologia.

### 4.1 Decaimento $\alpha$

O decaimento alfa ( $\alpha$ ) é um tipo de decaimento radioativo em que um núcleo instável emite uma partícula alfa, composta por **dois prótons e dois nêutrons**, equivalente a um núcleo de hélio-4 ( ${}^4_2\text{He}$ ). Esse processo ocorre em núcleos grandes e pesados que possuem excesso de prótons e nêutrons, o que os torna instáveis.

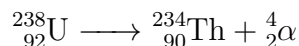
#### Como ocorre o Decaimento Alfa?

- **Núcleo Instável:** O decaimento alfa acontece em núcleos de elementos pesados, como o urânio e o rádio, onde a força de repulsão eletrostática entre os prótons é muito grande, superando a força nuclear forte que mantém o núcleo coeso.
- **Emissão da Partícula Alfa:** O núcleo instável emite uma partícula alfa, que consiste em dois prótons e dois nêutrons. Essa emissão reduz o número atômico do elemento em 2 e o número de massa em 4.

- **Núcleo Remanescente:** Após a emissão da partícula alfa, o núcleo restante tem dois prótons a menos e quatro unidades de massa a menos, transformando-se em um novo elemento químico.

#### Exemplo de Decaimento Alfa: Urânio-238

Um exemplo clássico de decaimento alfa é o do urânio-238 ( $^{238}_{92}\text{U}$ ), que se transforma em tório-234 ( $^{234}_{90}\text{Th}$ ) após a emissão de uma partícula alfa:

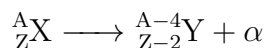


O urânio-238 possui 92 prótons e 146 nêutrons. Após o decaimento alfa, o núcleo remanescente, tório-234, possui 90 prótons e 144 nêutrons, com uma redução de 4 unidades na massa atômica.

#### 4.1.1 Principais Características

A seguir estão as principais características do decaimento alfa:

1. Emissão de Partícula Alfa:
  - A partícula alfa ( $\alpha$ ) é composta por 2 prótons e 2 nêutrons, o que equivale a um núcleo de hélio-4 ( $^4_2\text{He}$ ).
  - Devido a essa composição, a partícula alfa tem carga positiva (+2), pois contém 2 prótons.
2. Núcleos Pesados:
  - O decaimento alfa ocorre principalmente em núcleos de elementos pesados, como urânio, rádio, tório e polônio.
  - Esses núcleos possuem um número elevado de prótons e nêutrons, o que os torna instáveis.
3. Mudança na Composição do Núcleo:
  - Quando um núcleo emite uma partícula alfa, ele perde 2 prótons e 2 nêutrons, resultando na formação de um novo elemento, mais leve, conhecido como núcleo filho.
  - Por exemplo, no decaimento do urânio-238 ( $^{238}_{92}\text{U}$ ), ele se transforma em tório-234 ( $^{234}_{90}\text{Th}$ ) após a emissão de uma partícula alfa.
4. Redução do Número de Prótons e Nêutrons:
  - O número atômico do núcleo original (o número de prótons) diminui em 2 e o número de massa (a soma de prótons e nêutrons) diminui em 4 após a emissão da partícula alfa.



Onde:

- A é o número de massa do núcleo original.
  - Z é o número atômico do núcleo original.
  - X é o elemento original.
  - Y é o elemento resultante após o decaimento.
5. Energia Liberada:
    - O decaimento alfa é um processo exoenergético, o que significa que ele libera energia.

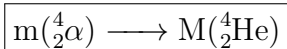
- A quantidade de energia liberada varia de acordo com o núcleo, mas geralmente está na faixa de 4 a 9 MeV (milhões de elétron-volts).
  - A energia liberada é transportada principalmente pela partícula alfa sob a forma de energia cinética, com uma fração muito menor sendo emitida como radiação gama, se houver.
6. Penetração e Interação com a Matéria
- As partículas alfa têm alta massa (comparada a outras partículas emitidas em decaimentos radioativos, como elétrons) e baixa velocidade relativa. Isso faz com que tenham um poder de penetração baixo.
  - Elas podem ser facilmente bloqueadas por uma folha de papel, alguns centímetros de ar, ou a pele humana. No entanto, se forem inaladas ou ingeridas, as partículas alfa podem causar sérios danos aos tecidos biológicos, devido à sua alta energia.
7. Vida Média e Meia-Vida
- O decaimento alfa está relacionado à meia-vida do núcleo radioativo, que é o tempo necessário para que metade de uma amostra de átomos radioativos decaia.
  - Elementos que sofrem decaimento alfa geralmente possuem uma meia-vida longa, que pode variar de milhares a bilhões de anos.
8. Exemplo de Reação de Decaimento Alfa
- Um exemplo típico é o decaimento do urânio-238:  ${}^{238}_{92}\text{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\alpha$ .
  - Neste caso, o rádio-226 se transforma em radônio-222 e emite uma partícula alfa, liberando energia.
9. Força Nuclear Fraca e Tunelamento Quântico
- A força nuclear forte mantém os prótons e nêutrons unidos no núcleo, mas a partícula alfa, que está relativamente fortemente ligada, é capaz de escapar devido a esse efeito quântico.
  - O decaimento alfa é influenciado pelo fenômeno de tunelamento quântico, onde a partícula alfa consegue “atravessar” a barreira de potencial nuclear e escapar do núcleo, mesmo que não tenha energia suficiente para superar essa barreira de maneira clássica.
10. Estabilidade Nuclear
- O decaimento alfa é um processo que aumenta a estabilidade do núcleo.
  - Núcleos muito grandes, como os de elementos pesados, têm muita energia e sofrem decaimento para atingir um estado mais estável.
11. Aplicações
- Medicina: Alguns isótopos emissores de partículas alfa são usados no tratamento de câncer, devido à sua capacidade de destruir células cancerígenas.
  - Energia nuclear: A energia liberada no decaimento alfa contribui para o funcionamento de reatores nucleares e dispositivos de energia como marcapassos e sondas espaciais.

#### 4.1.2 Reação Nuclear

Utilizando a equação da reação nuclear e o fato que os decaimentos são reações exoenergéticas ( $Q > 0$ ), podemos chegar a duas conclusões para o

decaimento alfa:

1. No cálculo da energia da reação envolvendo a partícula alfa, trocas-se a massa da partícula pela massa atômica do hélio.



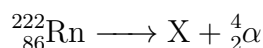
2. Para saber se, de fato, um decaimento alfa de uma reação pode ocorrer, a diferença entre a massa atômica do nuclídeo pai com a do nuclídeo filho deve ser maior que a massa do hélio.

$$M({}_Z^AX) - M({}_{Z-2}^{A-4}Y) > M({}_2^4\text{He})$$

**Obs.:** Um nuclídeo pai é o núcleo atômico original que sofre decaimento radioativo, enquanto o nuclídeo filho é o núcleo resultante após esse processo de decaimento. Durante o decaimento, o nuclídeo pai pode emitir partículas como alfa, beta ou gama, mudando sua composição nuclear e se transformando em um nuclídeo diferente, que é o nuclídeo filho.

### Exemplo 1:

De acordo com a seguinte reação nuclear:



Determine:

- a) O nuclídeo “X”, resultante de decaimento alfa do radônio-222 com seus respectivos valores de massa e número atômico.

$$A = 222 - 4 \rightarrow 218$$

$$Z = 86 - 2 \rightarrow 84$$

Portanto, o nuclídeo “X” é o  ${}_{84}^{218}\text{Po}$ .

- b) A energia desta reação nuclear (verifique que a reação é exoenergética).

$$Q = [M({}_{86}^{222}\text{Rn}) - M({}_{84}^{218}\text{Po}) - M({}_2^4\text{He})] c^2$$

$$Q = [222,017570 \text{ u} - 218,008966 \text{ u} - 4,002603 \text{ u}] \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}}$$

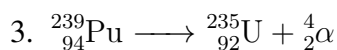
$$Q = 5,590 \text{ MeV}$$

Como  $Q > 0$ , a reação nuclear realmente é **exoenergética**.

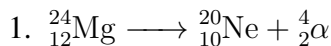
### Exemplo 2:

Dos três decaimentos alfa a seguir, indique a única que de fato pode ocorrer naturalmente, ou seja, de forma espontânea.

1.  ${}_{12}^{24}\text{Mg} \longrightarrow {}_{10}^{20}\text{Ne} + {}_2^4\alpha$
2.  ${}_{40}^{90}\text{Zr} \longrightarrow {}_{38}^{86}\text{Sr} + {}_2^4\alpha$

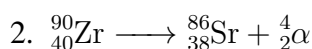


Aqui há duas formas de verificar se realmente há um decaimento alfa. Ou calcula a energia da reação e verifica que o valor é positivo, ou analisa a diferença de massa atômica entre o nuclídeo pai com o filho para saber se realmente é maior que a massa atômica do hélio. Faremos da segunda forma que é mais prática.



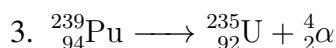
$$\begin{aligned} M({}_{12}^{24}\text{Mg}) - M({}_{10}^{20}\text{Ne}) &> M({}_2^4\text{He}) \\ 23,985042 \, u - 19,992440 \, u &> 4,002603 \, u \\ 3,992602 \, u &> 4,002603 \, u \end{aligned}$$

**FALSO**, não ocorre decaimento alfa no magnésio-24.



$$\begin{aligned} M({}_{40}^{90}\text{Zr}) - M({}_{38}^{86}\text{Sr}) &> M({}_2^4\text{He}) \\ 89,904702 \, u - 85,909265 \, u &> 4,002603 \, u \\ 3,995437 \, u &> 4,002603 \, u \end{aligned}$$

**FALSO**, não ocorre decaimento alfa no zircônio-40.



$$\begin{aligned} M({}_{94}^{239}\text{Pu}) - M({}_{92}^{235}\text{U}) &> M({}_2^4\text{He}) \\ 239,052158 \, u - 235,043924 \, u &> 4,002603 \, u \\ 4,008234 \, u &> 4,002603 \, u \end{aligned}$$

**VERDADEIRO**, ocorre decaimento alfa no plutônio-40.

#### 4.1.3 Processo de Tunelamento

O **tunelamento quântico** é um fenômeno essencial para explicar o decaimento alfa de núcleos instáveis, como os isótopos de urânio-232 e urânio-234. No decaimento alfa, o núcleo instável emite uma partícula alfa (dois prótons e dois nêutrons), mas para que essa partícula escape do núcleo, ela precisa superar a barreira de potencial formada pela força de atração nuclear entre os núcleons e a repulsão eletrostática entre os prótons.

Apesar de a partícula alfa não ter energia suficiente para superar diretamente essa barreira de potencial, a mecânica quântica permite que ela “tunele” através da barreira. Esse processo ocorre porque, em nível quântico, as partículas têm uma probabilidade de atravessar barreiras energéticas, mesmo quando não possuem energia clássica suficiente. Esse é o efeito de tunelamento, que acontece devido à **natureza probabilística da função de onda quântica**.

Urânio-232 e Urânio-234, ambos passam por decaimento alfa. Cada um desses isótopos tem um núcleo altamente instável e emite uma partícula alfa, levando à formação de núcleos mais estáveis. No caso do urânio-232, o núcleo resulta no tório-228, enquanto o urânio-234 resulta no tório-230.

#### Energia da Reação

A energia da reação no decaimento alfa é a diferença entre a energia total do núcleo pai e a soma das energias dos produtos, como o núcleo-filho e a partícula alfa. Essa energia é geralmente liberada na forma de energia cinética da partícula alfa e do núcleo-filho. No caso dos isótopos de urânio, a energia típica liberada durante o decaimento alfa está na faixa de 4 a 6 MeV.

### Largura do Potencial e Meia-Vida

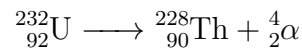
A largura da barreira de potencial está diretamente relacionada à meia-vida do isótopo que está decaindo. A barreira de potencial pode ser visualizada como a distância que a partícula alfa precisa percorrer para escapar do núcleo. Se essa barreira for muito larga, o tunelamento quântico é menos provável, resultando em uma meia-vida mais longa, pois a partícula alfa leva mais tempo para escapar. No caso de isótopos como do urânio-232 e urânio-234, suas meias-vidas são determinadas pela altura e largura da barreira de potencial.

No urânio-234, que tem uma meia-vida de cerca de 245 mil anos, a largura da barreira de potencial é significativa, tornando o processo de tunelamento menos frequente, resultando em uma meia-vida longa. Já no caso do urânio-232, com meia-vida de 68,9 anos, a barreira é um pouco menor, facilitando um tunelamento mais rápido e, conseqüentemente, uma meia-vida mais curta.

### Exemplo 3:

No decaimento alfa dos núcleos de urânio-232 e urânio-234. Determine:

- a) A reação nuclear e a energia da reação do urânio-232.

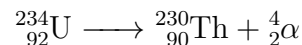


$$Q = [M({}_{92}^{232}\text{U}) - M({}_{90}^{228}\text{Th}) - M({}_2^4\text{He})] c^2$$

$$Q = [232,037129 \text{ u} - 228,028715 \text{ u} - 4,002603 \text{ u}] \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}}$$

$$Q = 5,413 \text{ MeV}$$

- b) A reação nuclear e a energia da reação do urânio-234.



$$Q = [M({}_{92}^{234}\text{U}) - M({}_{90}^{230}\text{Th}) - M({}_2^4\text{He})] c^2$$

$$Q = [234,040947 \text{ u} - 230,033128 \text{ u} - 4,002603 \text{ u}] \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}}$$

$$Q = 4,859 \text{ MeV}$$

- c) A energia potencial coulombiana máxima, em MeV.

$$U = \frac{Z_1 Z_2}{R_0(\sqrt[3]{A_1} + \sqrt[3]{A_2})} \cdot \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}$$

$$U = \frac{2 \cdot 90}{1,2(\sqrt[3]{4} + \sqrt[3]{228}) \text{ fm}} \cdot 1,440 \text{ MeV fm}$$

$$U = 28 \text{ MeV}$$



Obs.: Nas duas reações nucleares, o valor máximo da energia potencial máxima são, praticamente, iguais.

d) Um esboço do gráfico no processo de tunelamento.

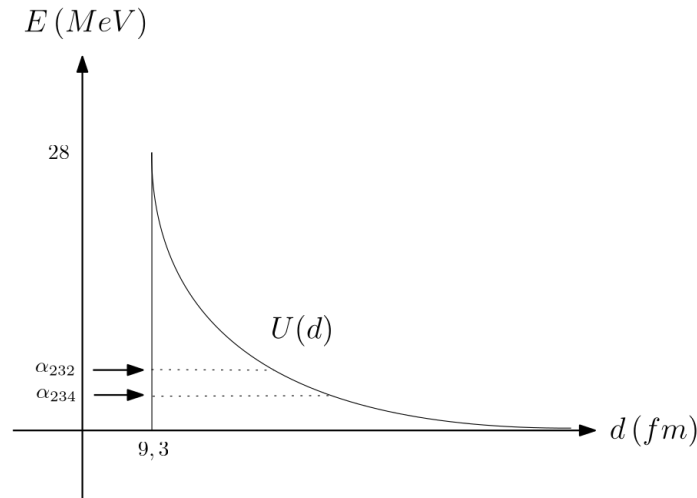
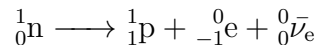


Figura 1: Gráfico do tunelamento urânio-232 e urânio-234

## 4.2 Decaimento $\beta^-$

O decaimento beta menos (beta  $-$ ) é um tipo de decaimento radioativo no qual **um nêutron dentro do núcleo de um átomo se transforma em um próton, emitindo uma partícula beta negativa (um elétron) e um antineutrino**. Esse processo ocorre em núcleos ricos em nêutrons, onde há um excesso de nêutrons em relação aos prótons, tornando o núcleo instável.

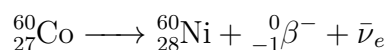


### Como ocorre o Decaimento Beta Menos?

- **Núcleo instável:** O decaimento beta menos acontece em núcleos que possuem excesso de nêutrons. Um nêutron é instável nesse ambiente e se transforma em um próton para equilibrar a razão próton/nêutron do núcleo.
- **Transformação de nêutron em próton:** Um nêutron dentro do núcleo se transforma em um próton, liberando:
  - Um elétron ( $e^-$ ), que é a partícula beta emitida.
  - Um antineutrino do elétron ( $\bar{\nu}_e$ ), uma partícula muito leve e sem carga, também emitida para conservar energia e momento.
- **Emissão de partículas:** O núcleo emite um elétron e um antineutrino. O núcleo resultante tem 1 próton a mais e 1 nêutron a menos, mas o número de massa permanece o mesmo.

### Exemplo de Decaimento Beta Menos: Cobalto-60

Um exemplo comum de decaimento beta menos é o do cobalto-60 ( ${}_{27}^{60}\text{Co}$ ), que se transforma em níquel-60 ( ${}_{28}^{60}\text{Ni}$ ):



- O cobalto-60 tem 27 prótons e 33 nêutrons.
- Após o decaimento beta menos, um dos nêutrons se transforma em um próton, e o núcleo resultante, níquel-60, tem 28 prótons e 32 nêutrons, mantendo a mesma massa atômica (60).

#### 4.2.1 Características do Decaimento Beta Menos

##### 1. Transformação de Partículas Subatômicas:

- No decaimento beta menos, um nêutron no núcleo se transforma em um próton. Isso aumenta o número de prótons no núcleo, o que resulta na transformação do átomo em um novo elemento químico.

##### 2. Emissão de Elétron:

- O decaimento beta menos resulta na emissão de um elétron, que é uma partícula carregada negativamente com uma massa muito pequena. Este elétron é a partícula beta negativa que sai do núcleo com uma alta velocidade.

##### 3. Emissão de Antineutrino:

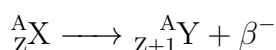
- Junto com o elétron, o núcleo emite um antineutrino. O antineutrino é uma partícula quase sem massa e sem carga elétrica, que interage muito fracamente com a matéria, sendo quase impossível de detectar diretamente.

##### 4. Mudança no Número Atômico:

- O número de prótons no núcleo aumenta em 1 após o decaimento beta menos, o que significa que o núcleo se transforma em um novo elemento com número atômico maior.
- No exemplo anterior, o cobalto-60 ( $Z = 27$ ) se transforma em níquel-60 ( $Z = 28$ ).

##### 5. Conservação do Número de Massa:

- O número de massa do núcleo permanece o mesmo, pois o nêutron convertido em próton continua no núcleo. Apenas o número de prótons e nêutrons muda.



##### 6. Energia Liberada

- O decaimento beta menos é exoenergético, liberando energia. A energia liberada é distribuída entre o elétron e o antineutrino, principalmente como energia cinética.

##### 7. Força Nuclear Fraca

- O decaimento beta menos é mediado pela força nuclear fraca, que permite a conversão de um quark down (d) em um quark up (u) dentro do nêutron, resultando na sua transformação em próton.

#### 8. Espectro Contínuo de Energia

- A energia do elétron emitido no decaimento beta menos não é fixa, mas sim distribuída em um espectro contínuo, porque parte da energia é levada pelo antineutrino. A soma das energias do elétron e do antineutrino deve sempre corresponder à energia total disponível no decaimento.

#### 9. Aplicações do Decaimento Beta Menos

- Datação por Carbono-14: O decaimento beta menos é utilizado em datação por carbono-14 para estimar a idade de fósseis e artefatos arqueológicos. O carbono-14 presente em materiais orgânicos decai com o tempo, e sua taxa de decaimento permite determinar a idade da amostra.
- Tratamento de Câncer: Certos isótopos que sofrem decaimento beta menos, como o iodo-131 ( $^{131}_{53}\text{I}$ ), são usados em tratamentos de câncer, especialmente no tratamento de câncer de tireoide. O elétron beta emitido durante o decaimento pode destruir células cancerígenas.
- Estudos em Física Nuclear: O decaimento beta menos é uma ferramenta importante para entender as propriedades dos núcleos e testar teorias fundamentais da física, como a conservação de energia e o modelo padrão das partículas.

### 4.2.2 Reação Nuclear

Utilizando a equação da reação nuclear e o fato que os decaimentos são reações exoenergéticas ( $Q > 0$ ), podemos chegar a duas conclusões para o decaimento beta menos:

1. No cálculo da energia da reação envolvendo o decaimento beta menos (elétron), devemos desconsiderar sua massa, ou seja, ela não entra no computo da energia da reação.

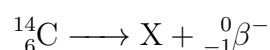
$$m(^0_{-1}\beta^-) \longrightarrow -$$

2. Para saber se, de fato, um decaimento beta menos pode ocorrer, a massa atômica do nuclídeo pai deve ser maior que a do filho.

$$M(^A_Z\text{X}) > M(^A_{Z+1}\text{Y})$$

#### Exemplo 4:

De acordo com a seguinte reação nuclear:



Determine:

- a) O nuclídeo “X”, resultante de decaimento beta menos do carbono-14, com seus respectivos valores de massa e número atômico.

$$A = 14$$

$$Z = 6 + 1 \rightarrow 7$$

Portanto, o nuclídeo “X” é o  ${}^{14}_7\text{N}$ .

- b) A energia desta reação nuclear (verifique que a reação é exoenergética).

$$Q = [M({}^{14}_6\text{C}) - M({}^{14}_7\text{N})] c^2$$

$$Q = [14,003242\text{ u} - 14,003074\text{ u}] \cdot 931,5 \frac{\text{MeV}}{\text{u}}$$

$$Q = 0,000168\text{ MeV}$$

Como  $Q > 0$ , a reação nuclear realmente é **exoenergética**.

### Exemplo 5:

Dos três decaimentos beta menos a seguir, indique a única que de fato pode ocorrer naturalmente, ou seja, de forma espontânea.

1.  ${}^{11}_5\text{B} \longrightarrow {}^{11}_6\text{C} + \beta^-$
2.  ${}^{22}_{10}\text{Ne} \longrightarrow {}^{22}_{11}\text{Na} + \beta^-$
3.  ${}^{32}_{15}\text{P} \longrightarrow {}^{32}_{16}\text{S} + \beta^-$

Aqui há duas formas de verificar se realmente há um decaimento alfa. Ou calcula a energia da reação e verifica que o valor é positivo, ou analisa se a massa atômica do nuclídeo pai é maior que a massa atômica do nuclídeo filho. Faremos da segunda forma que é mais prática.

1.  ${}^{11}_5\text{B} \longrightarrow {}^{11}_6\text{C} + \beta^-$

$$M({}^{11}_5\text{B}) > M({}^{11}_6\text{C})$$

$$11,009306\text{ u} > 11,011433\text{ u}$$

**FALSO**, não ocorre decaimento beta menos no boro-11.

2.  ${}^{22}_{10}\text{Ne} \longrightarrow {}^{22}_{11}\text{Na} + \beta^-$

$$M({}^{22}_{10}\text{Ne}) > M({}^{22}_{11}\text{Na})$$

$$21,991386\text{ u} > 21,994437\text{ u}$$

**FALSO**, não ocorre decaimento beta menos no neônio-10.

3.  ${}^{32}_{15}\text{P} \longrightarrow {}^{32}_{16}\text{S} + \beta^-$

$$M({}^{32}_{15}\text{P}) > M({}^{32}_{16}\text{S})$$

$$31,973907\text{ u} > 31,972071\text{ u}$$

**VERDADEIRO**, ocorre decaimento beta menos no fósforo-32.

## 5 Conclusão

A compreensão da energia envolvida nas reações nucleares e dos diferentes tipos de decaimento radioativo é fundamental para o estudo da física nuclear. As reações nucleares liberam quantidades significativas de energia, tanto em processos naturais, como no decaimento radioativo, quanto em processos induzidos, como a fissão e a fusão. O decaimento alfa, em particular, exemplifica a transformação de núcleos instáveis em núcleos mais estáveis, liberando energia na forma de radiação e partículas.

Estes conceitos possuem aplicações práticas em diversas áreas, desde a geração de energia nuclear até a medicina, onde técnicas de decaimento radioativo são utilizadas para tratamentos. Além disso, o estudo das forças que atuam dentro do núcleo, como a força nuclear forte e os fenômenos de tunelamento quântico, proporcionam uma compreensão mais profunda dos processos de instabilidade nuclear e da energia liberada. Por fim, ao entender como esses fenômenos ocorrem, torna-se possível explorar novas tecnologias e aplicações, contribuindo para o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de maneira segura e eficiente.

## 6 Exercícios

1. O que acontece com o núcleo de um átomo quando ele sofre decaimento alfa? Explique como isso afeta o número atômico e o número de massa do elemento.
2. Durante o decaimento beta menos, como o número de prótons e nêutrons de um núcleo muda? Explique o que acontece no núcleo durante este processo.
3. Verifique se, nas reações a seguir, o decaimento X é realizado por emissão de partícula alpha ou  $\beta^-$ .
  - a)  ${}^{14}_6\text{C} \longrightarrow {}^{14}_7\text{N} + \text{X}$
  - b)  ${}^{209}_{83}\text{Bi} \longrightarrow {}^{205}_{81}\text{Tl} + \text{X}$
  - c)  ${}^{236}_{92}\text{U} \longrightarrow {}^{232}_{90}\text{Th} + \text{X}$
  - d)  ${}^{35}_{16}\text{S} \longrightarrow {}^{35}_{17}\text{Cl} + \text{X}$
4. Calcule a energia de reação de todas as reações nucleares da questão anterior.
5. Verifique se as reações a seguir de fato ocorrem de forma espontânea:
  - a)  ${}^{64}_{29}\text{Cu} \longrightarrow {}^{60}_{27}\text{Co} + \alpha$
  - b)  ${}^{211}_{82}\text{Pb} \longrightarrow {}^{211}_{83}\text{Bi} + \beta^-$
  - c)  ${}^{145}_{61}\text{Pm} \longrightarrow {}^{141}_{59}\text{Pr} + \alpha$
  - d)  ${}^{98}_{42}\text{Mo} \longrightarrow {}^{98}_{43}\text{Te} + \beta^-$
6. No decaimento alfa dos núcleos de tório-232 e tório-230. Determine:
  - a) A reação nuclear e a energia da reação do tório-232.
  - b) A reação nuclear e a energia da reação do tório-230.
  - c) A energia potencial coulombiana máxima, em  $\text{MeV}$ .
  - d) Um esboço do gráfico no processo de tunelamento.

## 7 Respostas

1. No decaimento alfa, o núcleo do átomo emite uma partícula alfa, que é composta por dois prótons e dois nêutrons (equivalente a um núcleo de hélio-4). Como resultado, o número atômico do átomo diminui em 2 (pois ele perde dois prótons) e o número de massa diminui em 4 (pois ele perde dois prótons e dois nêutrons). Isso transforma o elemento em outro com número atômico e massa menores. Por exemplo, o urânio-238 (com número atômico 92) decai para tório-234 (com número atômico 90).
2. No decaimento beta menos, um nêutron dentro do núcleo se transforma em um próton, emitindo um elétron (chamado de partícula beta) e um antineutrino. Como resultado, o número de nêutrons no núcleo diminui em 1, enquanto o número de prótons aumenta em 1. Isso faz com que o número atômico do elemento aumente em 1, transformando-o em outro elemento com um número atômico maior, mas o número de massa (prótons + nêutrons) permanece o mesmo. Um exemplo é o carbono-14 (6 prótons e 8 nêutrons) que se transforma em nitrogênio-14 (7 prótons e 7 nêutrons).
3.
  - a)  $\beta^-$ .
  - b)  $\alpha$ .
  - c)  $\alpha$ .
  - d)  $\beta^-$ .
4.
  - a)  $Q = 0,1564 \text{ MeV}$ .
  - b)  $Q = 3,138 \text{ MeV}$ .
  - c)  $Q = 4,573 \text{ MeV}$ .
  - d)  $Q = 0,1667 \text{ MeV}$ .
5.
  - a) Não ocorre.
  - b) Ocorre.
  - c) Ocorre.
  - d) Não ocorre.
6.
  - a)  ${}_{90}^{232}\text{Th} \longrightarrow {}_{88}^{228}\text{Ra} + \alpha, Q = 4,084 \text{ MeV}$ .
  - b)  ${}_{90}^{230}\text{Th} \longrightarrow {}_{88}^{226}\text{Ra} + \alpha, Q = 4,772 \text{ MeV}$ .
  - c)  $U = 28 \text{ MeV}$ .

## 8 Referências

- ALONSO, M.; FINN, E. J. Fundamentos de Física. São Paulo: Edgard Blücher, 1972.
- BEISER, A. Concepts of Modern Physics. 6. ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentals of Physics. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2013.
- TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. Física Moderna. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- ZUBER, K. Neutrino Physics. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.