

# Física Moderna I

## Aula 07 - Tipos de Decaimentos - Parte 2

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>Decaimento <math>\beta^+</math></b>	<b>1</b>
3.1	Reação Nuclear . . . . .	3
<b>4</b>	<b>Captura Eletrônica (CE)</b>	<b>4</b>
4.1	Reação Nuclear . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Séries de Decaimento</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>Radiação Gama (<math>\gamma</math>) e Diagramas de Decaimentos</b>	<b>12</b>
6.1	Comprimento de onda . . . . .	14
<b>7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>15</b>
<b>8</b>	<b>Exercícios</b>	<b>16</b>
<b>9</b>	<b>Respostas</b>	<b>17</b>
<b>10</b>	<b>Referências</b>	<b>18</b>

## 1 Introdução

O decaimento radioativo é um fenômeno natural no qual um núcleo atômico instável libera energia ao se transformar em um núcleo mais estável. Esse processo ocorre por meio de diferentes tipos de decaimentos, sendo eles o decaimento beta positivo ( $\beta^+$ ), a captura eletrônica e o decaimento alfa e beta menos nas séries de decaimento naturais. Entender os mecanismos e as características desses processos é essencial para o estudo da física nuclear e suas aplicações, como na medicina, geologia e astrofísica.

Nesta aula, exploraremos o decaimento beta positivo e a captura eletrônica, descrevendo como eles ocorrem e seus efeitos no núcleo atômico.

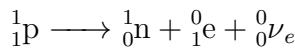
Também abordaremos as séries de decaimento naturais, discutindo sua importância na estabilidade nuclear e nas aplicações práticas.

## 2 Objetivos

- Compreender o processo de decaimento beta positivo ( $\beta^+$ ) e a captura eletrônica, incluindo a transformação de partículas subatômicas e as partículas emitidas.
- Identificar as características das partículas emitidas e as mudanças no núcleo atômico decorrentes desses processos de decaimento.
- Analisar as séries de decaimento naturais, incluindo suas sequências de transformações nucleares e as partículas associadas. Aplicar o conhecimento adquirido em exemplos práticos, como a datação de rochas e o uso de isótopos radioativos em diagnóstico médico.

## 3 Decaimento $\beta^+$

O decaimento beta positivo ( $\beta^+$ ), também conhecido como emissão de pósitron, é um tipo de decaimento radioativo no qual **um próton dentro do núcleo de um átomo se transforma em um nêutron, emitindo uma partícula beta positiva (um pósitron) e um neutrino**. Esse processo ocorre em núcleos ricos em prótons, onde há um excesso de prótons em relação aos nêutrons, tornando o núcleo instável.

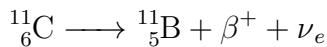


### Como ocorre o Decaimento Beta Mais?

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

### Exemplo de Decaimento Beta Mais: Carbono-11

Um exemplo comum de decaimento beta mais é o do carbono-11 ( ${}^11_6\text{C}$ ), que se transforma em boro-11 ( ${}^11_5\text{B}$ ):



- O carbono-11 tem 6 prótons e 5 nêutrons.

- Após o decaimento beta mais, um dos prótons se transforma em um nêutron, e o núcleo resultante, boro-11, tem 5 prótons e 6 nêutrons, mantendo a mesma massa atômica (11).

### **Características do Decaimento Beta Mais**

1. Transformação de Partículas Subatômicas:
  - No decaimento beta mais, um próton no núcleo se transforma em um nêutron. Isso diminui o número de prótons no núcleo, resultando na transformação do átomo em um novo elemento químico.
2. Emissão de Pósitron:
  - O decaimento beta mais resulta na emissão de um pósitron, que é uma partícula carregada positivamente com uma massa muito pequena. Esse pósitron é a partícula beta positiva que sai do núcleo com uma alta velocidade.
3. Emissão de Neutrino:
  - Junto com o pósitron, o núcleo emite um neutrino. O neutrino 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 diminui em 1 após o decaimento beta mais, o que significa que o núcleo se transforma em um novo elemento com número atômico menor.
  - No exemplo anterior, o carbono-11 ( $Z = 6$ ) se transforma em boro-11 ( $Z = 5$ ).
5. Conservação do Número de Massa:
  - O número de massa do núcleo permanece o mesmo, pois o próton convertido em nêutron continua no núcleo. Apenas o número de prótons e nêutrons muda.
6. Energia Liberada:
  - O decaimento beta mais é exoenergético, liberando energia. A energia liberada é distribuída entre o pósitron e o neutrino, principalmente como energia cinética.
7. Força Nuclear Fraca:
  - O decaimento beta mais é mediado pela força nuclear fraca, que permite a conversão de um quark up (u) em um quark down (d) dentro do próton, resultando na sua transformação em nêutron.
8. Espectro Contínuo de Energia:
  - A energia do pósitron emitido no decaimento beta mais não é fixa, mas sim distribuída em um espectro contínuo, pois parte da energia

é levada pelo neutrino. A soma das energias do pósitron e do neutrino deve sempre corresponder à energia total disponível no decaimento.

## 9. Aplicações do Decaimento Beta Mais:

- Tomografia por Emissão de Pósitrons (PET): Isótopos que sofrem decaimento beta mais, como o flúor-18 ( $^{18}_9\text{F}$ ), são usados em exames de PET para visualizar processos metabólicos em tecidos vivos, sendo muito útil no diagnóstico de câncer.
- Estudos em Física Nuclear: O decaimento beta mais permite estudos sobre as propriedades dos núcleos e é importante para testar teorias fundamentais da física, como a conservação de energia e as interações subatômicas.

### 3.1 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 mais:

1. No cálculo da energia da reação envolvendo o decaimento beta mais (pósitron), devemos desconsiderar o dobro da massa do elétron.

$$m(^0_1\beta^+) \longrightarrow 2 m_e$$

2. Para saber se, de fato, um decaimento beta mais pode ocorrer, a diferença da massa atômica do nuclídeo pai e do filho, tem que ser maior que o dobro da massa do elétron.

$$M(^A_Z\text{X}) - M(^{A+1}_{Z+1}\text{Y}) > 2m_e$$

#### Exemplo 1

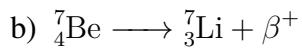
De acordo com as reações a seguir, verifique se ocorre ou não ocorre a emissão de partícula beta mais (pósitron).

- $^{15}_8\text{O} \longrightarrow ^{15}_7\text{N} + \beta^+$
- $^7_4\text{Be} \longrightarrow ^7_3\text{Li} + \beta^+$
- $^{15}_8\text{O} \longrightarrow ^{15}_7\text{N} + \beta^+$

$$M(^{15}_8\text{O}) - M(^{15}_7\text{N}) > 2m_e$$

$$\begin{aligned} 15,003066 u - 15,000109 u &> 2 \cdot 0,000549 u \\ 0,002957 u &> 0,001098 u \end{aligned}$$

**VERDADEIRO**, ocorre decaimento beta mais no oxigênio-15.

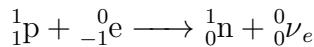


$$\begin{aligned} M({}^7_4\text{Be}) - M({}^7_3\text{Li}) &> 2m_e \\ 7,016929 u - 7,016004 u &> 2 \cdot 0,000549 u \\ 0,000925 u &> 0,001098 u \end{aligned}$$

**FALSO**, não ocorre decaimento beta mais no berílio-7.

## 4 Captura Eletrônica (CE)

A captura eletrônica é um tipo de decaimento radioativo no qual **um próton dentro do núcleo captura um elétron de uma camada interna do átomo, geralmente da camada K, transformando-se em um nêutron e emitindo um neutrino**. Esse processo ocorre em núcleos ricos em prótons, onde há um excesso de prótons em relação aos nêutrons, o que torna o núcleo instável.

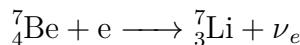


### Como ocorre a Captura Eletrônica?

- Núcleo instável: Em átomos com excesso de prótons, um próton no núcleo se torna instável e captura um elétron da camada mais próxima ao núcleo (geralmente da camada K) para se transformar em um nêutron.
- Transformação de próton em nêutron: O próton captura o elétron, o que resulta na sua conversão em um nêutron e na emissão de:
  - Um neutrino ( $\nu_e$ ), uma partícula extremamente leve e sem carga elétrica, que carrega parte da energia do decaimento e é emitida para conservar energia e momento.
- Rearranjo eletrônico: A captura de um elétron de uma camada interna deixa uma lacuna (ou “vaga”) nessa camada. Os elétrons de camadas mais externas “caem” para preencher essa vaga, resultando na emissão de **raios-X característicos ou de elétrons Auger**.

### Exemplo de Captura Eletrônica: Berílio-7

Um exemplo comum de captura eletrônica é o berílio-7 ( ${}^7_4\text{Be}$ ), que se transforma em lítio-7 ( ${}^7_3\text{Li}$ ):



- O berílio-7 tem 4 prótons e 3 nêutrons.
- Após a captura eletrônica, um dos prótons se transforma em um nêutron, e o núcleo resultante, lítio-7, tem 3 prótons e 4 nêutrons, mantendo a mesma massa atômica (7).

### Características da Captura Eletrônica

1. Transformação de Partículas Subatômicas:

- Na captura eletrônica, um próton no núcleo se transforma em um nêutron ao capturar um elétron de uma camada interna. Isso resulta em uma diminuição no número de prótons do núcleo, transformando o átomo em um novo elemento químico com número atômico menor.

## 2. Emissão de Neutrino:

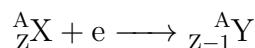
- Após a captura do elétron, o núcleo emite um neutrino ( $\nu_e$ ), que é uma partícula de massa muito pequena e sem carga elétrica. Esse neutrino é emitido com alta energia e se afasta do núcleo, sendo quase impossível de detectar diretamente.

## 3. Mudança no Número Atômico:

- O número de prótons no núcleo diminui em 1, o que significa que o átomo se transforma em um elemento com número atômico menor.
- No exemplo anterior, o berílio-7 ( $Z = 4$ ) se transforma em lítio-7 ( $Z = 3$ ).

## 4. Conservação do Número de Massa:

- O número de massa do núcleo permanece o mesmo, pois o próton convertido em nêutron permanece no núcleo, mudando apenas o equilíbrio de prótons e nêutrons.



## 5. Raios-X Característicos:

- Quando um elétron de uma camada interna é capturado pelo núcleo, uma lacuna é criada nessa camada. Os elétrons das camadas mais externas caem para preencher essa lacuna, liberando a diferença de energia entre os níveis na forma de **raios-X característicos**. Esses raios-X têm energias específicas que dependem da diferença de energia entre as camadas eletrônicas e do elemento em questão.

## 6. Elétrons Auger:

- Em vez de emitir um raio-X, a energia liberada pela transição de um elétron para uma camada mais interna pode ser transferida para outro elétron da camada externa, que é então ejetado do átomo. Esse elétron ejetado é conhecido como **elétron Auger**. O processo Auger é mais comum em elementos leves e resulta na ionização do átomo.

## 7. Energia Liberada:

- A captura eletrônica é geralmente exoenergética, liberando energia. A energia total do decaimento é distribuída entre o neutrino e, quando ocorre, os raios-X característicos ou os elétrons Auger.

## 8. Força Nuclear Fraca:

- Assim como no decaimento beta, a captura eletrônica é mediada pela força nuclear fraca, que permite a conversão de um quark up

(u) em um quark down (d) dentro do próton, transformando-o em um nêutron.

## 9. Aplicações da Captura Eletrônica:

- Astrofísica: A captura eletrônica é um processo importante nas reações nucleares que ocorrem em estrelas, contribuindo para a formação de elementos mais pesados e influenciando a evolução estelar.
- Espectroscopia de Raios-X: A emissão de raios-X característicos auxilia na identificação e análise dos elementos em uma amostra, sendo amplamente utilizada em química analítica, geologia e materiais.
- Estudos em Física Nuclear: A captura eletrônica é uma ferramenta importante para o estudo das propriedades nucleares e das interações fundamentais, ajudando a testar o modelo padrão e a conservação de energia em processos subatômicos.

## 4.1 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 a captura eletrônica:

1. No cálculo da energia da reação envolvendo a captura eletrônica, devemos desconsiderar sua massa, ou seja, ela não entra no computo da energia da reação.

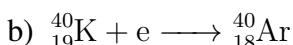
$$m({}_{-1}^0e) \longrightarrow -$$

2. Para saber se, de fato, uma captura eletrônica pode ocorrer, a massa atômica do nuclídeo pai deve ser maior que a do filho.

$$M({}_{Z}^AX) > M({}_{Z-1}^AY)$$

### Exemplo 2

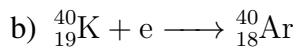
De acordo com as reações a seguir, verifique se ocorre ou não ocorre a emissão de partícula beta mais (pósitron).



$$M({}_{20}^{40}\text{Ca}) > M({}_{19}^{40}\text{K})$$

$$39,962591 u > 39,963999 u$$

**FALSO**, não ocorre captura eletrônica do cálcio-40.



$$\begin{aligned} M({}_{19}^{40}\text{K}) &> M({}_{18}^{40}\text{Ar}) \\ 39,963999\text{ }u &> 39,962383\text{ }u \end{aligned}$$

**VERDADEIRO**, ocorre decaimento beta mais no potássio-40.

## 5 Séries de Decaimento

A série de decaimentos alfa e beta menos é um processo de decaimento radioativo no qual um núcleo instável passa por uma sequência de decaimentos alfa e beta até atingir uma configuração estável. Esse tipo de série ocorre porque o decaimento de um núcleo nem sempre resulta em um núcleo estável; em vez disso, ele pode levar a outro núcleo instável que também se desintegra, seguindo uma sequência de transformações.

Característica	Decaimento Alfa	Decaimento Beta Menos
Partícula Emitida	Partícula alfa ( ${}^4_2\text{He}$ )	Elétron ( $\beta^-$ ) e antineutrino ( $\bar{\nu}_e$ )
Mudança no Número Atômico	Diminui em 2	Aumenta em 1
Mudança no Número de Massa	Diminui em 4	Inalterado
Estabilidade do Núcleo	Tende a estabilizar núcleos grandes	Tende a equilibrar nêutrons e prótons
Energia e Ionização	Alta ionização em partículas alfa	Espectro contínuo de energia
Fenômenos Associados	Emissão de raios-X e elétrons Auger	Emissão de antineutrino
Aplicações	Datação, medicina nuclear, física	Datação, análise de materiais

As séries de decaimentos naturais, também conhecidas como **famílias de decaimento radioativo**, são grupos de núcleos instáveis que se transformam uns nos outros através de uma sequência de decaimentos alfa e beta, até atingirem um núcleo estável. Existem **quatro famílias de decaimento principais**, cada uma originada de um isótopo de um elemento pesado e caracterizada por uma sequência única de emissões de partículas que eventualmente leva à estabilidade. Essas séries são:

1. Série do urânio-238 (Família  $4n + 2$ ):

- Inicia-se com o urânio-238 ( ${}^{238}\text{U}$ ), um dos elementos radioativos mais abundantes na crosta terrestre.
- A série segue uma sequência de decaimentos alfa e beta, passando por elementos como tório-234 ( ${}^{234}\text{Th}$ ), protactínio-234 ( ${}^{234}\text{Pa}$ ), e rádio-226 ( ${}^{226}\text{Ra}$ ).
- Após várias etapas, a série termina em um núcleo estável, o chumbo-206 ( ${}^{206}\text{Pb}$ ).

- Esse processo leva bilhões de anos e é importante em geocronologia, pois o tempo de meia-vida longo do urânio-238 permite estimar a idade de rochas e minerais.

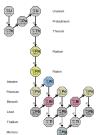


Figura 1: Série do urânio-238

## 2. Série do tório-232 (Família 4n):

- A série começa com o tório-232 ( $^{232}\text{Th}$ ), que é relativamente abundante em rochas e minerais e possui um longo tempo de meia-vida.
  - A sequência de decaimentos inclui etapas através do rádio-228 ( $^{228}\text{Ra}$ ), actínio-228 ( $^{228}\text{Ac}$ ), e outros isótopos até alcançar o chumbo-208 ( $^{208}\text{Pb}$ ), que é estável.
  - Esse decaimento é importante tanto na geologia quanto na física nuclear, pois o tório-232 é uma possível fonte de energia nuclear em reatores de tório.

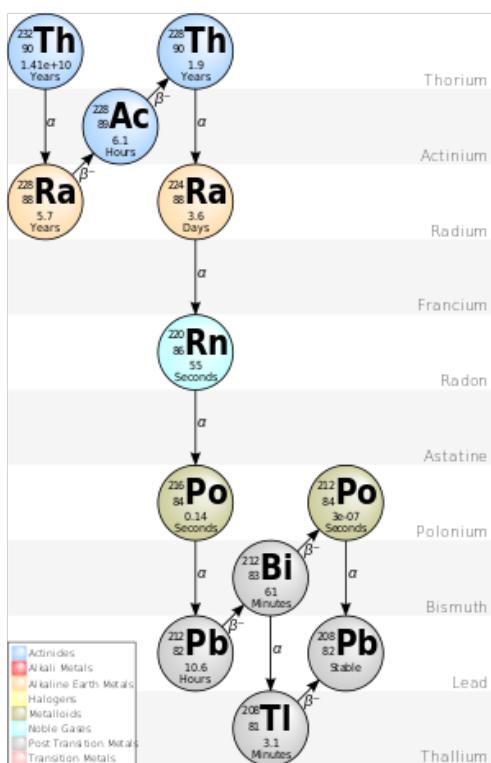


Figura 2: Série do tório-232

### 3. Série do actínio-235 (Família 4n + 3):

- Originada pelo actínio-235 ( $^{235}\text{U}$ ), esta série é também conhecida como série do actínio, uma vez que o actínio é um intermediário importante no processo.
  - A série inclui decaimentos que passam por tório-231 ( $^{231}\text{Th}$ ), protactínio-231 ( $^{231}\text{Pa}$ ), e bismuto-211 ( $^{211}\text{Bi}$ ).
  - Ela termina no chumbo-207 ( $^{207}\text{Pb}$ ), um núcleo estável.
  - O urânio-235, com uma meia-vida mais curta do que o urânio-238,

tem sido amplamente utilizado em datação de rochas, além de ser um importante combustível nuclear em reatores.

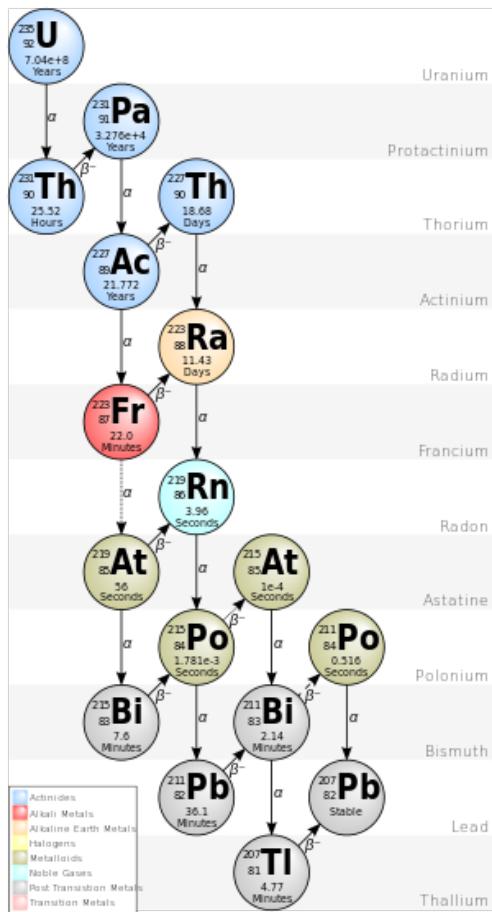


Figura 3: Série do actínio-235

#### 4. Série do neptúnio-237 (Família $4n + 1$ ):

- Diferentemente das outras séries, a série do neptúnio não é naturalmente encontrada na natureza na mesma abundância, pois o neptúnio-237 ( $^{237}\text{Np}$ ) possui um tempo de meia-vida menor e se decompõe rapidamente.
- Esta série foi identificada em laboratório e não ocorre naturalmente em quantidades significativas na Terra, pois seus elementos precursores decaíram desde a formação do planeta.
- A série de decaimento do neptúnio-237 termina no bismuto-209 ( $^{209}\text{Bi}$ ), que é estável.
- Ainda que rara na natureza, essa série é relevante na pesquisa nuclear e no estudo de elementos transurânicos, especialmente em reatores e processos de fissão nuclear.

Cada série de decaimento segue um padrão específico, determinado pela conservação do número de massa ao longo das etapas de decaimento. O número de massa dos núcleos em cada série é múltiplo de um valor fixo, associado ao tipo de série ( $4n$ ,  $4n+1$ ,  $4n+2$ ,  $4n+3$ ). Esse padrão indica que apenas certos tipos de decaimentos são permitidos para que o núcleo se move ao longo da série até atingir um estado estável.

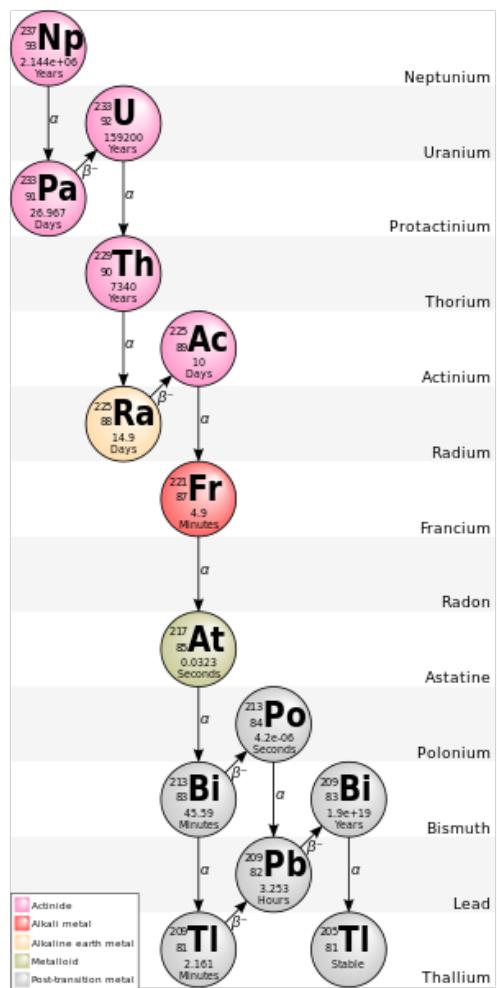


Figura 4: Série do neptúnio-237

Série de Decaimento	Núcleo Pai	Tipo Principal de Decaimento	Produto Estável Final	Número de Massa (4n ± x)	Exemplos de Isótopos Intermediários
Série do Urânio-238	$^{238}\text{U}$	Alfa	$^{206}\text{Pb}$	$4n + 2$	$^{234}\text{Th}$ , $^{230}\text{Th}$ , $^{226}\text{Ra}$
Série do Tório-232	$^{232}\text{Th}$	Alfa	$^{208}\text{Pb}$	$4n$	$^{228}\text{Ra}$ , $^{224}\text{Ra}$ , $^{220}\text{Rn}$
Série do Actínio-235	$^{235}\text{U}$	Alfa e Beta Menos	$^{207}\text{Pb}$	$4n + 3$	$^{231}\text{Th}$ , $^{227}\text{Ac}$ , $^{223}\text{Ra}$
Série do Neptúnio-237	$^{237}\text{Np}$	Alfa e Beta Menos	$^{209}\text{Bi}$	$4n + 1$	$^{233}\text{Pa}$ , $^{229}\text{Th}$ , $^{225}\text{Ac}$

Para determinar a classificação da série de um nuclídeo, divida seu número de massa por quatro e observe o resto da divisão. A família será determinada conforme o valor do resto:

Resto 0: pertence à família do tório. Resto 1: pertence à família do neptúnio. Resto 2: pertence à família do urânio. Resto 3: pertence à família do actínio.

### Exemplo 3

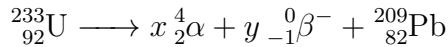
Classifique as séries do seguintes nuclídeos

- a)  $^{209}_{83}\text{Bi}$ .
- b)  $^{222}_{86}\text{Rn}$ .
- c)  $^{232}_{90}\text{Th}$ .
- d)  $^{233}_{92}\text{U}$ .
- e)  $^{209}_{83}\text{Bi}$ . Resto da divisão de 209 por 4 é 1. Portanto, o bismuto-209 pertence à série do neptúnio.
- f)  $^{222}_{86}\text{Rn}$ . Resto da divisão de 222 por 4 é 0. Portanto, o radônio-222 pertence à série do tório.
- g)  $^{231}_{90}\text{Th}$ . Resto da divisão de 231 por 4 é 3. Portanto, o tório-222 pertence à série do actínio.
- h)  $^{234}_{92}\text{U}$ . Resto da divisão de 234 por 4 é 2. Portanto, série do urânio.

### Exemplo 4

Determine de decaimentos alfa e beta menos devem ser realizados para que o urânio-233 decaia até o chumbo-209.

Para responder esta questão, podemos montar e resolver um sistema linear. Uma equação para a massa e outra para o número atômico.



I) Para o número de massa:

$$\begin{aligned} 233 &= 4x + 0y + 209 \\ x &= \frac{233 - 209}{4} \\ x &= 6 \end{aligned}$$

II) Para o número atômico:

$$\begin{aligned} 92 &= 2x - y + 82 \\ 92 &= 2 \cdot 6 - y + 82 \\ y &= 12 + 82 - 92 \\ y &= 2 \end{aligned}$$

Portanto, ocorreram 6 decaimentos alfa e 2 decaimentos beta menos.

## 6 Radiação Gama ( $\gamma$ ) e Diagramas de Decaimentos

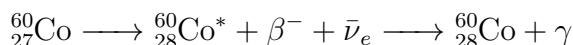
A **radiação gama** é um tipo de radiação eletromagnética emitida durante a transição de estados de energia em núcleos atômicos excitados. Diferente dos decaimentos alfa e beta, a radiação gama não altera o número de prótons nem o número de nêutrons no núcleo. Em vez disso, um núcleo já instável, após sofrer um decaimento alfa ou beta, pode se encontrar em um estado excitado. Ao liberar essa energia excedente, ele emite um fóton de alta energia, chamado fóton gama ( $\gamma$ ).

### Como ocorre a Radiação Gama?

- Núcleo Excitado: Após decaimentos alfa ou beta, o núcleo freqüentemente fica em um estado energético instável e excitado.
- Transição para Estado Fundamental: Para alcançar a estabilidade, o núcleo precisa liberar essa energia em excesso, o que ocorre pela emissão de radiação gama.
- Fóton Gama: A radiação gama consiste em fôtons de altíssima energia e frequência, e, diferentemente de partículas como os elétrons ou partículas alfa, esses fôtons não possuem carga nem massa.

### Exemplo de Emissão Gama

No decaimento do cobalto-60 ( $^{60}_{27}\text{Co}$ ), ele sofre um decaimento beta menos para se transformar em níquel-60 ( $^{60}_{28}\text{Ni}^*$ ), mas permanece excitado. Em seguida, ele emite um fóton gama ( $\gamma$ ) para estabilizar-se completamente.



1. Transição Excitada: O níquel-60 ( $^{60}_{28}\text{Ni}^*$ ) se encontra em um estado excitado após o decaimento beta.

- Emissão de Radiação Gama: Para retornar ao seu estado de menor energia, o núcleo de níquel emite radiação gama.

#### Características da Radiação Gama

- Alta Energia e Penetração: A radiação gama tem uma energia muito alta, e sua capacidade de penetração é significativamente maior do que a das partículas alfa e beta, exigindo blindagens densas como concreto ou chumbo para serem barradas.
- Emissão sem Mudança no Número Atômico ou Massa: Como a radiação gama não altera a constituição do núcleo, o número de prótons e o número de nêutrons permanecem inalterados.
- Uso em Imagens Médicas e Terapia: Devido à sua alta penetração, a radiação gama é amplamente utilizada em tratamentos de radioterapia e em exames de imagem, como a tomografia por emissão de pósitrons (PET).
- Interações Fracas com a Matéria: A radiação gama é menos ionizante comparada às partículas alfa e beta, pois não carrega carga elétrica e interage apenas por meio da força eletromagnética.

#### Diagramas de Decaimento

Os **diagramas de decaimento** são uma ferramenta essencial para representar o processo de desintegração de núcleos atômicos e as emissões associadas. Esses diagramas mostram as transições de um núcleo pai para estados excitados de núcleos filhos, indicando claramente os diferentes tipos de radiação emitida (alfa, beta ou gama) ao longo da série de decaimentos.

- Níveis de Energia: Cada linha representa um estado de energia específico do núcleo, com a energia mais alta posicionada acima.
- Emissões de Partículas: Flechas verticais ou inclinadas indicam o decaimento de um núcleo para outro nível de energia, associadas à emissão de partículas (alfa ou beta) ou radiação gama.
- Transições Gama: As transições associadas à emissão de fótons gama são geralmente indicadas por uma seta horizontal, indicando que não houve alteração no número de massa ou atômico, apenas uma queda no nível de energia do núcleo.

#### Exemplo de Diagrama de Decaimento para o Cobalto-60

Um diagrama de decaimento para o cobalto-60, por exemplo, pode mostrar as transições de estados excitados para estados de menor energia até atingir o estado fundamental, incluindo:

- Decaimento Beta Menos: Transição inicial de  $^{60}_{27}\text{Co}$  para  $^{60}_{28}\text{Ni}$ .
- Emissão Gama: O  $^{60}_{28}\text{Ni}$  emite um fóton gama para alcançar o estado fundamental.

Característica	Radiação Gama ( $\gamma$ )
Partícula Emitida	Fóton de alta energia ( $\gamma$ )
Mudança no Número Atômico	Inalterado
Mudança no Número de Massa	Inalterado

Característica	Radiação Gama ( $\gamma$ )
Estabilidade do Núcleo	Permite que núcleos em excitação voltem ao estado fundamental
Energia e Penetração	Alta energia, grande capacidade de penetração
Aplicações	Radioterapia, imagem médica, análise de materiais

## 6.1 Comprimento de onda

Em diversas situações, é necessário determinar o comprimento de onda associado ao fóton emitido durante a radiação gama. Para calcular isso, utilizamos a relação da energia de Planck, que descreve a relação entre energia e frequência de um fóton:

$$E = hf$$

onde  $E$  é a energia,  $h$  é a constante de Planck, e  $f$  é a frequência. Como a frequência está relacionada à velocidade da luz  $c$  e ao comprimento de onda  $\lambda$  pela equação  $f = c/\lambda$ , podemos substituir essa expressão na equação anterior:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Isolando o comprimento de onda, obtemos:

$$\lambda = \frac{hc}{E}$$

A constante  $hc$  é uma constante bastante utilizada em física de partículas e radiação. Sabemos que:

- $h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV s}$  e;
- $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Multiplicando essas duas constantes, obtemos o valor de:

$$hc = 1240 \text{ MeV fm}$$

Onde “MeV” (Megaelétron-volt) é a unidade de energia, e “fm” (femtômetro ou fermi) é a unidade de comprimento.

### Exemplo 4

Vamos agora calcular o comprimento de onda associado à emissão de radiação gama do isótopo níquel-60. O objetivo é determinar o comprimento de onda da radiação emitida, em  $fm$ , quando o núcleo do níquel-60 transita do primeiro estado excitado para o seu estado fundamental, como mostrado na figura.

Sabemos que a energia emitida neste processo é de  $1,3325 \text{ MeV}$ . Aplicando a fórmula para o comprimento de onda:

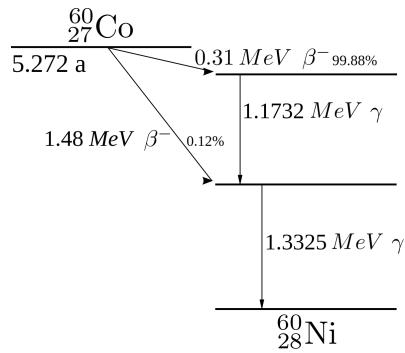


Figura 5: Diagrama dedecaimento do cobalto-60

$$\lambda = \frac{hc}{E}$$

$$\lambda = \frac{1240 \text{ MeV fm}}{1,3325 \text{ MeV}}$$

$$\lambda = 930,6 \text{ fm}$$

Portanto, o comprimento de onda associado à emissão de radiação gama do níquel-60 é 930,6 fm.

## 7 Conclusão

A compreensão dos processos de decaimento radioativo e das séries de decaimento é fundamental para a física moderna e diversas áreas aplicadas. O decaimento beta positivo e a captura eletrônica exemplificam como núcleos ricos em prótons se tornam estáveis, enquanto as séries de decaimento naturais ilustram as sequências que núcleos pesados percorrem até alcançar a estabilidade. O estudo desses fenômenos não só aprofunda nosso entendimento da estrutura nuclear, como também fornece as bases para aplicações práticas em ciência e tecnologia, como a datação de materiais e os avanços em diagnósticos médicos, evidenciando a importância da radioatividade no contexto científico e social.

## 8 Exercícios

1. Explique o processo de decaimento beta mais ( $\beta^+$ ) e descreva a transformação que ocorre no núcleo durante esse tipo de decaimento.
2. O que é a captura eletrônica e como ela se diferencia do decaimento beta mais ( $\beta^+$ ).
3. O que é radiação gama e qual é a sua relação com os estados excitados dos núcleos atômicos?
4. Explique o conceito de série de decaimentos radioativos e como ela é observada em isótopos instáveis.
5. Verifique, nas reações nucleares a seguir, se ocorre ou não ocorre de forma espontânea?

- a)  $^{24}_{12}\text{Mg} \longrightarrow ^{24}_{11}\text{Na} + \beta^+$ .  
 b)  $^{15}_{8}\text{O} \longrightarrow ^{15}_{7}\text{N} + \beta^+$ .  
 c)  $^{7}_{4}\text{Be} + \text{e} \longrightarrow ^{7}_{3}\text{Li}$ .  
 d)  $^{14}_{7}\text{N} + \text{e} \longrightarrow ^{14}_{6}\text{C}$ .

6. Indique qual série (urânio, netúnio, tório ou actínio) o radionuclídeo a seguir pertence:

- a)  $^{223}_{87}\text{Fr}$ .  
 b)  $^{226}_{88}\text{Ra}$ .  
 c)  $^{233}_{92}\text{U}$ .  
 d)  $^{209}_{82}\text{Fr}$ .  
 e)  $^{228}_{89}\text{Ac}$ .  
 f)  $^{220}_{86}\text{Rn}$ .  
 g)  $^{215}_{84}\text{Po}$ .  
 h)  $^{210}_{83}\text{Bi}$ .

7. Determine a quantidade de decaimentos alfa e beta menos são necessários para que os radionuclídeos a seguir cheguem a estabilidade:

- a)  $^{232}_{90}\text{Th} \longrightarrow ^{208}_{82}\text{Pb}$ .  
 b)  $^{237}_{93}\text{Np} \longrightarrow ^{205}_{81}\text{Tl}$ .  
 c)  $^{238}_{92}\text{U} \longrightarrow ^{206}_{82}\text{Pb}$ .  
 d)  $^{235}_{92}\text{U} \longrightarrow ^{207}_{82}\text{Pb}$ .

8. Determine o comprimento de onda, em  $fm$ , emitido pela radiação gama proveniente da decaimento do  $^{137m}_{56}\text{Ba}$ .

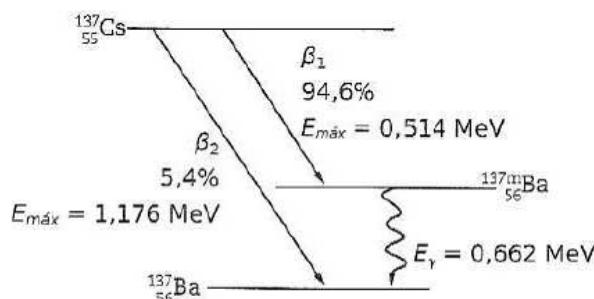


Figura 6: Diagrama de decaimento do césio

## 9 Respostas

- O decaimento beta mais ( $\beta^+$ ) é um tipo de transformação nuclear onde um próton dentro do núcleo se converte em um nêutron, liberando um pósitron ( $e^+$ ) e um neutrino do elétron ( $\nu_e$ ). Esse processo ocorre para núcleos com excesso de prótons.
- A captura eletrônica é um processo no qual um próton no núcleo captura um elétron da camada mais externa, geralmente da camada K, e se transforma em um nêutron. Esse processo também resulta na emissão de um neutrino ( $\nu_e$ ). A principal diferença entre a captura eletrônica e o decaimento beta mais ( $\beta^+$ ) é que, no caso da captura eletrônica, o elétron é “capturado” do redor do núcleo, enquanto no decaimento beta

mais, o próton se transforma espontaneamente em um nêutron dentro do núcleo, liberando um pósitron.

3. A radiação gama ( $\gamma$ ) é um tipo de radiação eletromagnética de alta energia, frequentemente emitida por núcleos atômicos em estado excitado. Quando um núcleo está em um nível de energia elevado, ele pode retornar ao seu estado fundamental, liberando a energia excedente na forma de fótons gama. Esses fótons possuem comprimentos de onda muito curtos e energias muito altas, sendo capazes de penetrar em materiais densos.
4. Uma série de decaimentos radioativos é uma sequência de decaimentos sucessivos que um núcleo instável sofre até atingir um núcleo estável. Cada decaimento resulta em um novo isótopo que também pode ser instável e, portanto, se submeter a outro tipo de decaimento.
- 5.

  - a) Não ocorre.
  - b) Ocorre.
  - c) Ocorre.
  - d) Não ocorre.

- 6.

  - a) actínio.
  - b) urânio.
  - c) netúnio.
  - d) netúnio.
  - e) tório.
  - f) tório.
  - g) actínio.
  - h) urânio.

- 7.

  - a)  $6\alpha$  e  $4\beta$ .
  - b)  $8\alpha$  e  $4\beta$ .
  - c)  $8\alpha$  e  $6\beta$ .
  - d)  $7\alpha$  e  $4\beta$ .

8.  $\lambda = 1,87 \cdot 10^3 \text{ fm}$ .

## 10 Referências

- BLAIZOT, J. P.; RIPKA, G. Quantum Theory of Finite Systems. MIT Press, 1986.
- FOWLER, W. A. The Origin of the Elements and the Solar Abundances. Reviews of Modern Physics, v. 56, n. 1, p. 149–179, 1984.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentals of Physics. 10. ed. Wiley, 2014.
- KRANE, K. S. Introductory Nuclear Physics. Wiley, 1988.
- WEINBERG, S. The Quantum Theory of Fields. Cambridge University Press, 1996.