

# Radioatividade

Ludmila Ferreira



## 1 Introdução

Ao iniciar seus estudos em Radioatividade, você deve saber que esta parte da matéria tem diversas aplicações nos dias atuais, dentre as quais destacam-se: a radiologia, a datação de fósseis, a produção de energia nuclear e a fabricação de armas nucleares. Sabendo disso, fica mais fácil criar entusiasmo pela matéria. Envolvido pelo entusiasmo, em 1895, Wilhelm Conrad Roentgen fez a radiografia da mão de sua esposa fazendo incidir raios X através desta.

No ano seguinte, Henri Becquerel percebeu que uma amostra de óxido de urânio havia manchado algumas placas fotográficas que estavam cobertas com um material opaco e guardadas em uma gaveta. Por isso e pela sua dedicação

nesta área, os cientistas atribuem a Henri Becquerel a descoberta da radioatividade. Anos mais tarde, em 1898, o casal Curie (Marie e Pierre) descobriram e nomearam os elementos Rádio e Polônio, dois elementos radioativos.

Por volta de 1900, Rutheford e Vilard estudaram, separadamente, o efeito do campo elétrico sobre emissões as quais foram chamadas:  $\alpha$  (alfa),  $\beta$  (beta) e  $\gamma$  (gama).

## 2 As emissões

### 2.1 Alfa

Simbolizada da forma:  ${}^4_2\alpha$ , tal partícula é a referência para o poder de penetração (que mede o quão penetrante é uma partícula); é a que possui o maior poder de ionização (que mede, relativamente a gama, o quão ionizante uma partícula é) e é a que possui a menor velocidade relativa a gama.

### 2.2 Beta

Simbolizada da forma:  ${}^0_{-1}\beta$ , tal partícula é 100 vezes mais penetrante que a partícula alfa; possui um poder de ionização 10 vezes maior que o da radiação gama e uma velocidade de 90% da velocidade de gama.

### 2.3 Gama

Simbolizada da forma:  ${}^0_0\gamma$ , trata-se de uma onda eletromagnética, possui o maior poder de penetração, é a referência na escala de poder de ionização e sua velocidade é igual a velocidade da luz ( $c$ ).

Outras radiações são importantes para o nosso estudo em radioatividade:

### 2.4 Nêutron

Representado por:  ${}^1_0n$ , possui cerca de 10% da velocidade da luz e é altamente penetrante.

## 2.5 Pósitron

Conhecido por ser a antipartícula do elétron, o pósitron é representado por:  ${}^0_{+1}\beta$ , possui cerca de 90% da velocidade da luz e é moderadamente penetrante.

Já que falei sobre antipartícula, vamos entender melhor sobre isso e falar sobre a aniquilação do par. Uma antipartícula é uma partícula que possui a mesma massa e spin que uma partícula elementar, porém com carga, campo eletromagnético e momento angular com sinais contrários. Quando uma partícula e uma antipartícula colidem entre si, elas se aniquilam, gerando, assim, radiação gama.

## 2.6 Próton

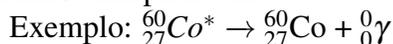
Representado por:  ${}^1_1p$ , possui cerca de 10% da velocidade da luz e baixo poder de penetração.

# 3 Reações Nucleares

Reações nucleares são reações que expressam a mudança da composição nuclear. Os núcleos são compostos por prótons e nêutrons, que, juntos, são chamados de **núcleons**. Quando um núcleo tem um número atômico e um número de massa definidos, passa a ser chamado de **nuclídeo**.

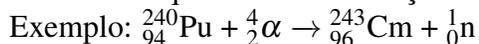
Existem dois tipos de reações nucleares, as que ocorrem de maneira natural e as que ocorrem artificialmente. Como vemos a seguir:

**Reação Natural:** Ocorre segundo um decaimento radioativo, onde o nuclídeo pai se converte em no nuclídeo filho, que possui um arranjo nuclear diferente, liberando uma partícula.



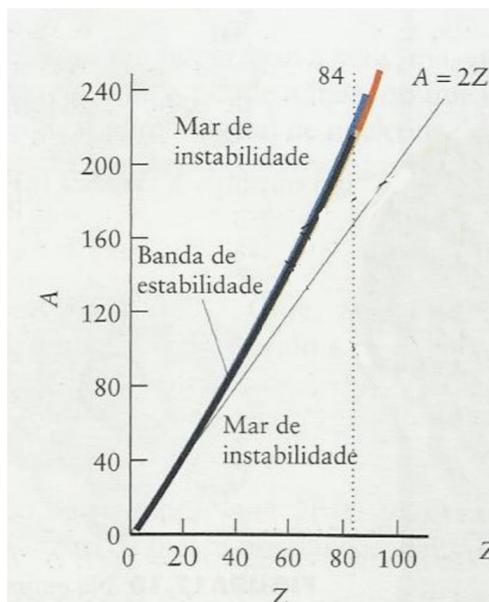
**Observação:** O asterisco representado no símbolo do nuclídeo de Co à esquerda simboliza que esse núcleo se encontra num estado de energia mais alto, com a emissão da radiação

**Reação Artificial:** Ocorre ao bombardear-se partículas em nuclídeos que geram outros os quais emitem radiação.



Já que existem elementos que participam de reações nucleares espontaneamente e outros não, será que poderíamos prever aqueles que decaem e aqueles

que devem ser bombardeados? A resposta é sim. Os cientistas realizaram diversos experimentos e conseguiram construir um gráfico que estabelece uma faixa de estabilidade dos núclídeos. Veja a representação abaixo:



Os elementos situados acima dessa faixa tendem a decair emitindo nêutrons ou partículas beta. Já aqueles que se localizam abaixo dessa faixa (ou seja, aqueles que seguem a relação  $A < 2Z$ ) tendem a emitir pósitrons, a emitir partículas alfa ou a realizarem a **captura eletrônica**. Na captura eletrônica, o núcleo engole um elétron. Veja um exemplo:  ${}^7_4\text{Be} + {}^0_{-1}\text{e} \rightarrow {}^7_3\text{Li}$ .

Ainda há uma terceira classificação que se refere aos elementos com número atômico acima de 84. Tais núcleos tendem a emitir partículas  $\alpha$ ,  $\beta$  e radiação  $\gamma$  até formarem núcleos estáveis. Estabelecem-se as **séries radioativas**, que são sequências de núclídeos.

Há quatro séries radioativas importantes para o nosso estudo:

→Tório: Essa série inicia-se com o decaimento do  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  e vai até o  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ . Para classificar um núcleo como componente desta série, deve-se dividir seu número de massa por 4 e esperar por um resto igual a zero.

→Neptúnio: Essa série, apesar de ser chamada de série do neptúnio, começa com o isótopo artificial  ${}^{241}_{94}\text{Pu}$ , que decai para o  ${}^{237}_{93}\text{Np}$  e termina com o  ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ . O nome deve-se ao fato de que o Neptúnio-237 é o núcleo de maior tempo de meia-vida presente na série. Para classificar um núcleo como componente desta série, deve-se dividir seu número de massa por 4 e esperar por um resto igual a um.

→Urânio: Essa série inicia-se com o decaimento do  ${}_{92}^{238}\text{U}$  e vai até o  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ . Para classificar um núcleo como componente dessa série, deve-se dividir seu número de massa por 4 e esperar por um resto igual a dois.

→Actínio: Essa série, apesar de ser chamada de série do Actínio, inicia-se com o decaimento do  ${}_{92}^{235}\text{U}$  e vai até o  ${}_{82}^{207}\text{Pb}$ . O nome deve-se ao fato de pesquisadores, no passado, acreditarem que o actínio faria parte da série. Para classificar um núcleo como componente dessa série, deve-se dividir seu número de massa por 4 e esperar por um resto igual a três.

## 4 Cinética Radioativa

A cinética radioativa trata do estudo da velocidade de desintegração do material e de seus correlatos. Vejamos algumas definições e unidades importantes em nosso estudo de radioatividade.

### 4.1 Atividade

Essa grandeza mede o número de desintegrações por unidade de tempo. No passado, a unidade de medida relacionada a atividade era o curie(Ci) que equivale a  $3,7 \cdot 10^{10}$  desintegrações por segundo. Atualmente, pelo Sistema Internacional de Unidades(SI), a unidade de medida associada a atividade é o bequerel(Bq) que quantifica uma desintegração por segundo. O fator de conversão entre Bq e Ci é dado por:  $1 \text{ Bq} = 2,702 \cdot 10^{-11}$ .

Percebe-se, então, que atividade é uma grandeza associada a velocidade de desintegração do material. Sabe-se que as reações nucleares obedecem às equações de cinética de 1ª ordem. Portanto:  $A = \frac{-dN}{dt} = k \cdot N$

Daí,

$[N] = [N_0] \cdot e^{-kt}$ ; onde  $N_0$  é a quantidade do material antes do início do decaimento e  $N$  é a quantidade restante após a desintegração.

#### 4.1.1 Tempo de meia-vida

Representa o tempo necessário para a massa da amostra cair pela metade.

Segue a equação, já vista, do tempo de meia-vida de reações de primeira ordem:

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\kappa}$$

### 4.1.2 Constante Radioativa

Representa a fração de átomos que se desintegram por unidade de tempo. Veja um exemplo:

$$\kappa({}^{250}_{100}\text{Fm}) = 210 \text{ s}^{-1}$$

### 4.1.3 Tempo de vida média

Define-se como vida-média de um radioisótopo, a média aritmética do tempo de vida de todos os átomos de uma dada massa deste isótopo. Logo, a vida-media é o tempo médio que um isótopo instável leva para sofrer decaimento. Temos:

$$V_m = \frac{1}{\kappa}$$

$$\text{Do exemplo anterior: } V_m({}^{250}_{100}\text{Fm}) = \frac{1}{210} \text{ s}$$

## 4.2 Exposição

Essa grandeza mede a carga (proveniente da ionização do ar atravessado pela radiação) por unidade de massa (de ar atravessado). No passado, a unidade utilizada era o roentgen (R). Porém, hoje, a unidade é definida como C/kg pelo SI. A conversão de roentgen para a unidade estabelecida pelo SI é dada por  $1\text{R} = 2,58 \cdot 10^{-4}$ .

## 4.3 Dose Absorvida

Essa grandeza mede a energia absorvida (pelo tecido) por unidade de massa. Antigamente, a unidade adotada era o rad (sigla, em inglês, para radiation absorbed dose). Pelo SI, em trabalhos científicos, usa-se o gray (Gy), que é equivalente a 1 J/Kg. A conversão de rad para gray é dada por:  $1\text{Gy} = 100 \text{ rad}$ .

## 4.4 Dose Equivalente

Essa grandeza mede a energia absorvida (pelo tecido) por unidade de massa para cada tipo de radiação. A dose equivalente é um produto entre a dose absorvida e um fator de qualidade, que explicita o efeito nocivo no tecido biológico em análise. Veja a tabela abaixo com alguns desses fatores de efetividade biológica para cada tipo de radiação absorvida:

Radiação	Fator de eficiência
Raios X e $\gamma$	1
Partículas $\beta$	1
Partículas $\alpha$	20

No sistema antigo, a unidade associada a essa grandeza era o rem(sigla, em inglês, para roentgen equivalent man). No SI, a unidade de medida é o sievert(Sv). A conversão entre sievert e rem dá-se da seguinte forma: 1 Sv = 100 rem.

## 5 Fissão e Fusão Nuclear

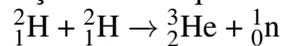
### 5.1 Fissão Nuclear

Há núcleos pesados que decaem(ou sofrem bombardeamento) gerando outros dois núcleos e certa radiação. Atribuímos a tal processo o nome de fissão nuclear, o mesmo processo que ocorre no interior de bombas atômicas. Vejamos um exemplo:  ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{52}^{135}\text{Te} + {}_{40}^{100}\text{Zr} + {}_0^1\text{n}$

Chama-se **massa crítica** a massa mínima(de um dado material que sofre fissão) para garantir a sustentação da reação nuclear em cadeia.

### 5.2 Fusão Nuclear

No processo de fusão, diferentemente do processo de fissão, núcleos leves(com números de massa pequenos) se unem gerando núcleos maiores e nêutrons. Enquanto o processo de fissão nuclear ocorre em reatores nucleares, aqui, na Terra, o processo de fusão nuclear é quase inviável devido a necessidade de ocorrência em temperaturas muito altas(cerca de 1 milhão de graus Celsius). De fato, é o tipo de reação nuclear que ocorre, espontaneamente, no Sol, como vemos abaixo:



Onde:  ${}^2_1\text{H}$  é um dos isótopos do Hidrogênio, o deutério.

Bombas de Hidrogênio e bombas de nêutrons utilizam o mecanismo de fusão para o funcionamento.

## 6 Tendências quanto a fusão e fissão

Para sabermos quais núcleos tendem a sofrer fissão ou fusão, tomamos como base a relação entre o número de massa de um nuclídeo e a energia de ligação nuclear por núcleon. Tal energia é a energia liberada no processo de formação do núcleo partindo de um estado inicial onde cada núcleon estaria separado uns dos outros.

Veja um exemplo para o cálculo dessa energia:

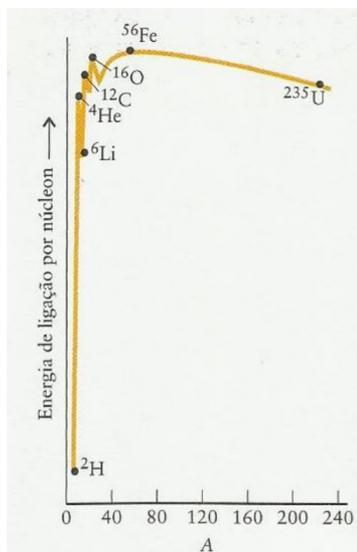
Calcularemos a energia (em Mega elétron-volts) do núcleo de trítio ( ${}^3_1\text{H}$ ). Sabendo que a massa atômica dessa espécie é de 3,01605u, que a massa de um próton é de 1,007278u, que a massa de um nêutron é de 1,008665u, que o número de Avogadro vale  $6,02 \cdot 10^{23}$ , que a velocidade da luz é de  $3,0 \cdot 10^8$  m/s e que a conversão entre elétron-volt e joule é:  $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  J.

Calculamos, inicialmente, a massa dos núcleons:  $m_{\text{nucleons}} = 2 \times 1,008665 + 1,007278 = 3,024608\text{u}$

Calculando a diferença entre a massa obtida pela soma das massas de cada núcleon e a massa do núcleo de Trítio, temos:  $\Delta m = 8,558 \cdot 10^{-3}$  u. Valendo-se da equação de Einstein da conversão massa-energia:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \rightarrow \Delta E = \frac{0,008558}{6,02 \cdot 10^{26}} \text{ Kg} \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 \rightarrow \Delta E = E_{\text{ligacao}} = 1,279435216 \cdot 10^{-12} \text{ J.}$$
 Dividindo o resultado encontrado por  $1,6 \cdot 10^{-13}$ , obtemos 7,9964701 MeV. Como queremos a energia por núcleon, divide-se o resultado por 3, logo:  $E_{\text{ligacao}}: 2,665490033$  MeV/núcleon.

Muitos núcleos foram observados e modelou-se a curva apresentada no gráfico abaixo:



Os núcleos, à esquerda do Ferro-56, tendem a sofrer fusão, enquanto os núcleos, à direita do Ferro-56, tendem a sofrer fissão. Ainda, pelo gráfico, percebe-se que o Ferro-56 é o núcleo de maior estabilidade.