

CURSO INTENSIVO 2022

ITA - 2022

Radioatividade

Prof. Thiago





Sumário

APRESENTAÇÃO DA AULA	4
RADIOATIVIDADE NAS PROVAS DO ITA	4
1. ESTRUTURA DO NÚCLEO	4
1.1. Raio Nuclear	4
1.2. Composição de Prótons e Nêutrons	6
1.3. Forças Nucleares	6
2. ESTABILIDADE NUCLEAR	7
2.1. Razão N/P	7
2.2. Defeito de Massa	8
2.2.1. Cálculo da Velocidade da luz MeV/u	10
2.3. Ilhas de Estabilidade	11
3. EQUAÇÕES NUCLEARES	11
3.1. Conservação da Carga	12
3.2. Conservação do Número de Massa	12
4. DECAIMENTOS RADIOATIVOS	13
4.1. Emissão de Partículas Alfa	15
4.2. Emissão de Partículas Beta	16
4.3. Isomerização	16
4.4. Emissão de Pósitrons	18
4.5. Captura K	18
4.6. Séries Radioativas	19
5. CINÉTICA DAS EMISSÕES RADIOATIVAS	25
5.1. Constante de Decaimento	25
5.2. Tempo de Meia-Vida	26
5.2.1. Relação entre o Tempo de Meia-Vida e a Constante de Decaimento	27
5.2.2. Interpretações do Tempo de Meia-Vida	27



5.2.3. Equação de Decaimento em Função do Tempo de Meia-Vida	29
5.3. Dose de Radiação Letal ao Ser Humano	29
5.4. Demonstrações das Equações	29
6. FISSÃO E FUSÃO NUCLEAR	35
6.1. Fissão Nuclear	35
6.1.1. Reação em Cadeia	36
6.1.2. Nuclídeos Formados	37
6.1.3. Velocidade dos Nêutrons	37
6.1.4. Enriquecimento do Urânio	38
6.2. Fusão Nuclear	39
6. LISTA DE QUESTÕES PROPOSTAS	41
6.1. Gabarito	48
7. LISTA DE QUESTÕES COMENTADAS	49

Apresentação da Aula

Os processos radioativos podem ser naturais ou artificiais. Embora a palavra “radiação” seja muito associada a contaminação e a transmutações genéticas provocadas pela exposição à energia associadas a esses processos, a Radioatividade tem inúmeras aplicações práticas. Por exemplo, tratamentos médicos, como o raio-X, e a produção de energia por meio dos processos de Fissão Nuclear.

Radioatividade nas Provas do ITA

Nos últimos, a Radioatividade tem sido cobrada com muita intensidade nas provas do ITA. Praticamente todos os anos, temos visto pelo menos uma questão.

Esse assunto não serve de base para outros. No entanto, esse conteúdo é relativamente fácil, portanto, é um tema de bom custo-benefício.

1. Estrutura do Núcleo

Ainda se conhece pouco a respeito do núcleo atômico. Muitas pesquisas recentes estão sendo realizadas, porém, você não precisa ficar saber dos mínimos detalhes que estão sendo revelados nos últimos anos.

1.1. Raio Nuclear

Um problema que pode ser elaborado por um examinador mais maldoso é a respeito da primeira estimativa para o raio de um núcleo. Esse cálculo foi realizado pela primeira vez por Rutherford no seu clássico experimento em que bombardeou uma folha de ouro com partículas alfa.

Rutherford estimou o raio do núcleo como sendo a distância mais próxima ao núcleo atingida por uma partícula alfa. Quando esta partícula é lançada frontalmente contra o núcleo, a interação elétrica faz que sua energia cinética seja transformada em energia potencial eletrostática. Nesse momento, a partícula para. Portanto, toda a sua energia cinética foi convertida em energia potencial.

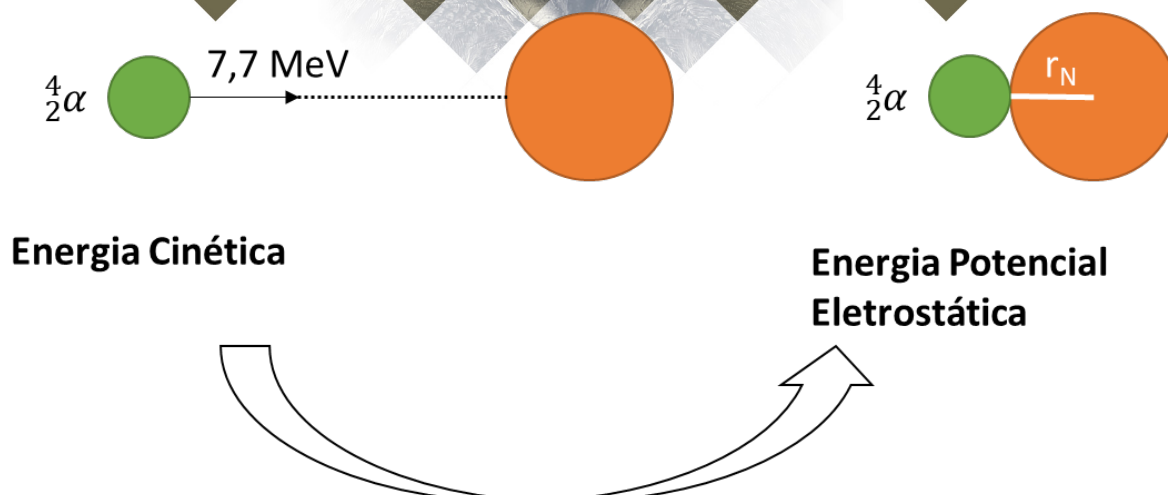


Figura 1: Aplicação da Conservação da Energia na Determinação das Distâncias Nucleares

A energia potencial eletrostática entre duas cargas é calculada pela expressão.

$$E_p = K \frac{q_1 q_2}{r}$$

Nessa expressão, K é a constante eletrostática do vácuo, $q_1 = Ze$ é a carga do núcleo, que é igual ao produto do número atômico pela carga eletrônica fundamental; $q_2 = 2e$ é a carga da partícula alfa, que possui dois prótons; $r = r_N$ é o raio do núcleo que se deseja calcular.

$$E_p = K \frac{(Ze) \cdot (2e)}{r_N} = \frac{2KZe^2}{r_N}$$

Pela Conservação da Energia, devemos ter que essa energia potencial deve ser igual à energia cinética original da partícula alfa, que foi medida como 7,7 MeV.

$$E_c = 7,7 \text{ MeV} = 7,7 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

Aplicando a igualdade entre a energia cinética inicial da partícula e sua energia potencial eletrostática quando ela colide com o núcleo, temos:

$$E_c = \frac{2KZe^2}{r_N} \therefore r_n = \frac{2KZe^2}{E_c}$$

Agora, basta substituir os valores conhecidos. No Experimento de Rutherford, o átomo utilizado foi o ouro ($Z = 79$).

$$r_n = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 79 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{1,2 \cdot 10^{-12}} = \frac{2 \cdot 9 \cdot 79 \cdot (1,6)^2}{1,2} \cdot 10^{9-2 \cdot 19+12} \cong 3000 \cdot 10^{-17} = 3 \cdot 10^{-14} \text{ m} = 30 \text{ fm}$$

O raio do núcleo do ouro-197 é de aproximadamente 30 fm.

1.2. Composição de Prótons e Nêutrons

Os prótons e nêutrons são chamados em conjuntos de **nucleons**. Eles não são indivisíveis, mas sim, são formados por quarks **up** e **down**.

Tabela 1: Quarks Componentes dos Prótons e Nêutrons

Quark	Carga
Up	$+2/3$
Down	$-1/3$

O próton é formado por dois quarks up e um quark down, sendo referenciado como **uud**. Já o nêutron é formado por um quark up e dois quarks down, sendo referenciado como **udd**.

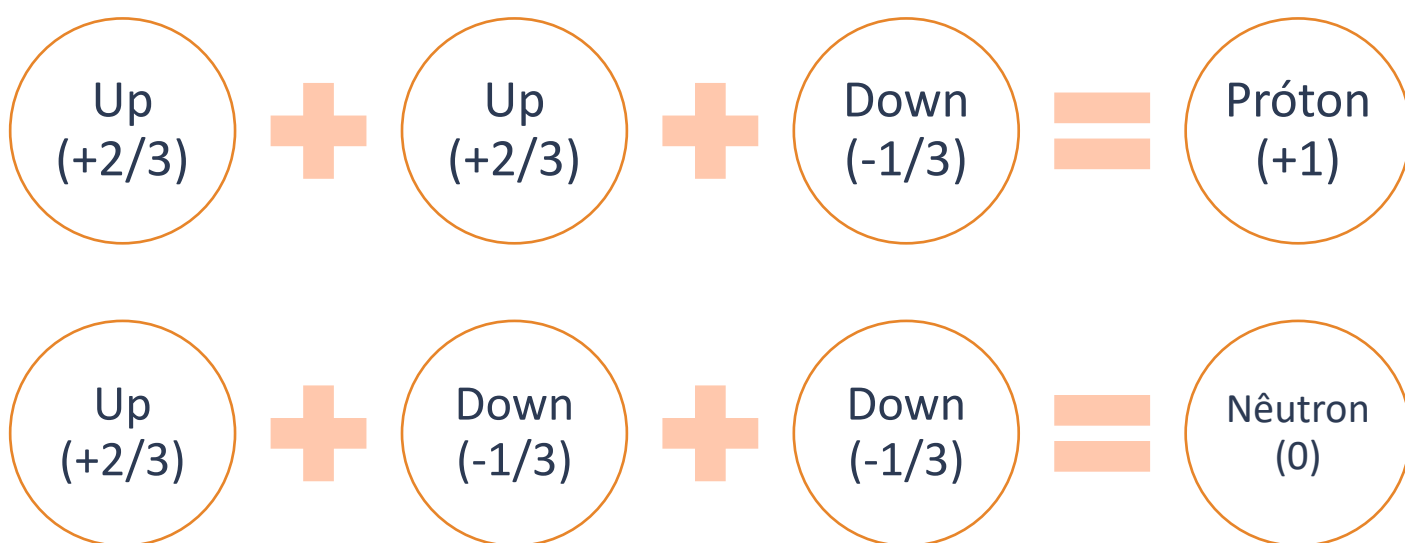


Figura 2: Composição dos Prótons e Nêutrons

Os quarks são unidos pela conhecida **Força Nuclear Forte**. É interessante o fato de que os quarks correspondem a menos de 1% da massa dos nucleons. O restante da massa deles se deve ao campo criado pela força nuclear forte.

1.3. Forças Nucleares

Os prótons são todos de carga positiva. Sendo assim, em qualquer núcleo que tenha dois ou mais prótons, haverá repulsão eletrostática entre essas partículas. No entanto, o núcleo permanece estável devido a existência de forças nucleares atrativas.

Uma das teorias a respeito das forças nucleares é uma analogia com as ligações químicas. Dois átomos se ligam formando uma ligação química quando compartilham elétrons. Analogamente, os nucleons podem se ligar por meio do compartilhamento de uma partícula. Nesse caso, a partícula é conhecida como méson- π (ou múon), que possui três versões com cargas diferentes: π^+ , π^- e π^0 .

O méson, quando compartilhado entre dois nucleons, provoca uma transmutação entre eles.

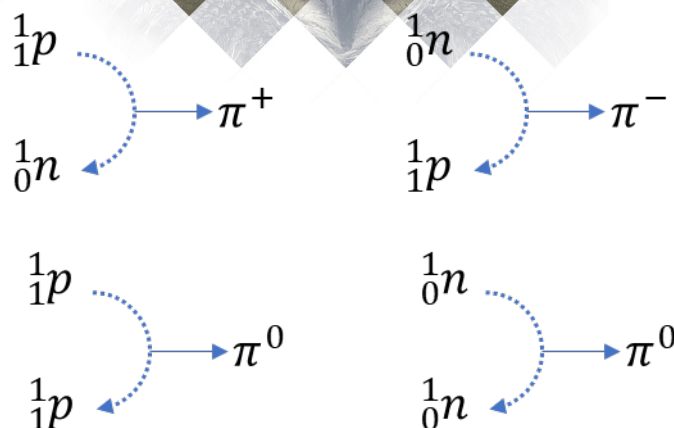


Figura 3: Mésons envolvidos na transmutação entre núcleos atômicos

Dessa forma, uma interação entre dois prótons ou entre dois nêutrons envolve o compartilhamento de um par de mésons π^0 .

Por outro lado, uma interação entre um próton e um nêutron envolve o compartilhamento de um par de mésons de cargas opostas π^+ e π^- .

O compartilhamento de múons por prótons e nêutrons dá origem à força nuclear fraca, que também é uma das forças fundamentais da natureza.

2. Estabilidade Nuclear

Entre dois prótons, existe sempre a força de repulsão de natureza eletrostática que tende a partir o núcleo. Essas forças são compensadas pelas forças nucleares de atração moderadas pelos nêutrons.

Como as forças nucleares têm um alcance muito curto, os núcleos muito grandes tendem a ser estáveis. Não se conhecem elementos estáveis com o número atômico superior ao do urânio ($Z = 92$). Todos os elementos com $Z > 92$ são artificiais, instáveis, conhecidos como **transurânicos**.

Existem também dois elementos artificiais com $Z < 92$: tecnécio ($Z = 43$) e promécio ($Z = 61$). Eles são conhecidos como **elementos cisurânicos**.

2.1. Razão N/P

O núcleo do hidrogênio leve (prótio ou hidrogênio-1) é o único núcleo formado por apenas um único nucleon ${}^1_1\text{H}$. Esse átomo é formado apenas por um próton e por um elétron. Sendo assim, não existe repulsão nuclear. E, por isso, esse núcleo é bastante estável. A título de curiosidade, o elemento hidrogênio corresponde a cerca de 88% de todos os átomos do Universo.

Nos elementos de baixo número atômico (até $Z = 20$, ou seja, cálcio), os isótopos mais estáveis dos elementos seguem as regras gerais:

- Quando o número atômico é par, o número de nêutrons é igual ao número de prótons, sendo o berílio e o argônio as únicas exceções (não creio que você precisa decorá-los);

- Quando o número atômico é ímpar, o número de nêutrons é uma unidade superior ao número de prótons, sendo o hidrogênio e o nitrogênio as únicas exceções.

A Tabela 2 é uma versão especial da Tabela Periódica em que apresentamos os isótopos mais estáveis dos 20 primeiros elementos, com seus respectivos números de prótons e de nêutrons.

Tabela 2: Isótopos mais estáveis dos Elementos de menor Número Atômico

[illegible]

Dessa maneira, os isótopos mais estáveis dos primeiros elementos da Tabela Periódica apresentam a razão N/P igual a aproximadamente 1. À medida que o número atômico do elemento cresce, a razão N/P começa a ficar significativamente mais alta.

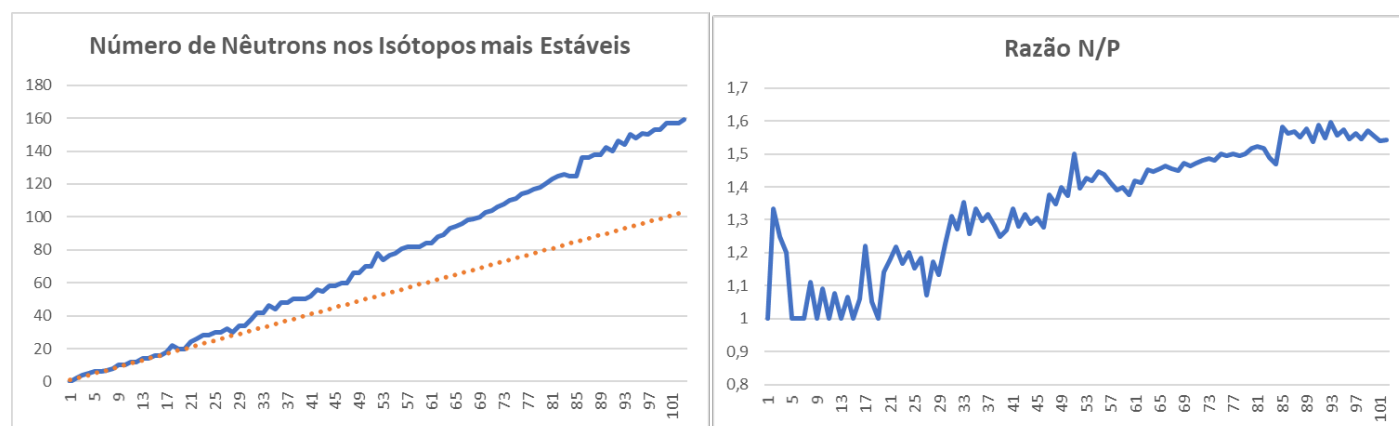


Figura 4: Relações entre Número de Prótons e Número de Nêutrons nos Isótopos mais estáveis de cada elemento

2.2. Defeito de Massa

Albert Einstein publicou em 1905 um artigo revolucionário “A inércia de um corpo depende da sua quantidade de energia?” em que propôs que a equivalência entre massa e energia como um princípio geral da Física.

Einstein propôs que a massa e a energia seriam conversíveis entre si. Dessa maneira, a massa poderia ser aniquilada resultando em energia ou produzida a partir da reunião de fótons. A relação entre essas duas grandezas é regida por uma das equações mais famosas da história.

$$E = mc^2 = \text{massa} \times (\text{velocidade da luz})^2$$

Apesar de muito simples, essa equação trata de fenômenos de altíssima complexidade.

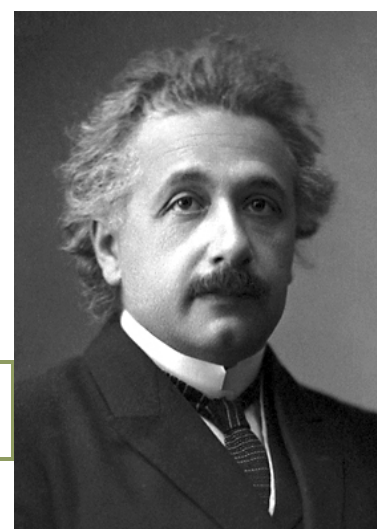


Figura 5: Albert Einstein
(fonte: [2])

Para fazer as contas com essa equação, é conveniente conhecer o valor da velocidade da luz nas unidades adequadas. Demonstramos esse valor na próxima subseção.

$$c^2 = 931,5 \text{ MeV}/u$$

Uma das mais sérias consequências desse princípio é que a massa de um núcleo estável, exceto o núcleo do hidrogênio-1, é sempre inferior às massas somadas dos prótons e nêutrons que o constituem.

Como exemplo, temos o núcleo do hélio-4. As massas dos prótons e nêutrons isolados é tabelada.

$$m_p = 1,007825 \text{ u}$$

$$m_N = 1,008665 \text{ u}$$

Já a massa medida para o núcleo de hélio-4 é de 4,002603 u.

A massa total dos 2 prótons e 2 nêutrons que constituem o núcleo do hélio-4 pode ser calculada simplesmente somando tudo.

$$m' = 2 \cdot 1,007825 + 2 \cdot 1,008665 = 2,015650 + 2,017330 = 4,032980 \text{ u}$$

Perceba, portanto, que, ao ser formado o núcleo do átomo de hélio, ocorre uma redução de massa que pode ser calculada pela diferença entre as somas das massas dos prótons e nêutrons e a massa total do núcleo.

$$\Delta m = m' - m = 4,032980 - 4,002603 = 0,030377 \text{ u}$$

Portanto, ao ser formado o núcleo de hélio-4, ocorre uma perda de 0,030377 u. A energia liberada correspondente a essa perda é:

$$E = \Delta m c^2 = 0,030377 \cdot 931,5 \cong 28,3 \text{ MeV}$$

Dessa maneira, são liberados 28,3 MeV na formação do hélio-4. Essa energia é denominada **energia de ligação nuclear**.

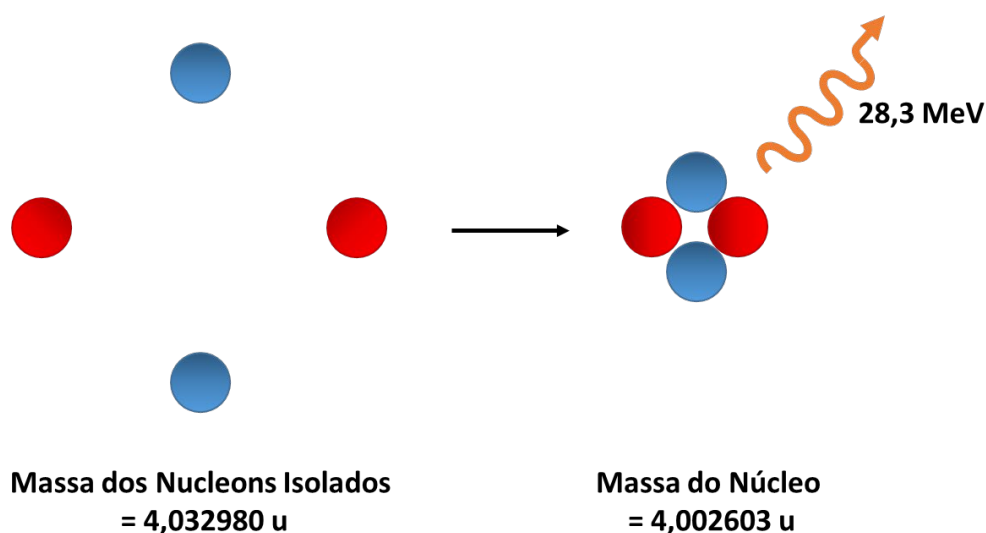




Figura 6: Formação do Núcleo de Hélio e Energia de Ligação Envolvida



Como a energia de ligação nuclear é de ordem de grandeza de cerca de 1 milhão de vezes maior que as energias envolvidas nos fenômenos da eletrosfera, como ligações químicas, forças intermoleculares, ionizações, afinidades eletrônicas, **os processos da eletrosfera não interferem no núcleo.**

Dessa forma, a radioatividade não é afetada pelos fenômenos da eletrosfera, como ligações químicas, o composto formado, o estado sólido ou a temperatura da amostra.

2.2.1. Cálculo da Velocidade da luz MeV/u

Essa subseção é recomendada apenas para alunos avançados que já possuem domínio de temas mais avançados da Física e da Química. A velocidade da luz é de $3 \cdot 10^8$ m/s nas unidades do Sistema Internacional.

$$c^2 = (2,998 \cdot 10^8)^2 = 8,998 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = 8,998 \cdot 10^{16} \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

A unidade de massa pode ser convertida em gramas, lembrando-nos que $1 \text{ kg} = 10^3 \text{ g}$.

$$c^2 = 8,998 \cdot 10^{16} \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 8,998 \cdot 10^{16} \frac{\text{J}}{10^3 \text{ g}} = 8,998 \cdot 10^{13} \text{ J/g}$$

Agora, podemos usar a definição da unidade de massa atômica e do número de Avogadro.

$$1 \text{ u} = 1 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \therefore 1 \text{ g} = 1 \text{ u} \cdot 1 \text{ mol} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ u}$$

Basta, portanto, substituir:

$$c^2 = \frac{8,998 \cdot 10^{13} \text{ J}}{\text{g}} = \frac{8,998 \cdot 10^{13} \text{ J}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ u}} = 1,493 \cdot 10^{-10} \text{ J/u}$$

Por fim, devemos converter a unidade de energia de Joules para eV. A conversão é feita com a carga elementar.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \therefore 1 \text{ J} = \frac{1 \text{ eV}}{1,6 \cdot 10^{-19}}$$

Agora, basta fazer a conversão de Joule em elétron-volt na conta c^2 .

$$c^2 = \frac{1,5 \cdot 10^{-10} J}{u} = \frac{1,493 \cdot 10^{-10} \cdot 1 eV}{1,602 \cdot 10^{-19} u} = 0,9319 \cdot 10^9 \frac{eV}{u} = \frac{931,9 \cdot 10^6 eV}{u} = 931,9 MeV/u$$

2.3. Ilhas de Estabilidade

A ideia da ilha de estabilidade foi proposta originalmente por Glenn T. Seaborg. Os níveis de energia do núcleo também seriam quantizados e existiria uma certa configuração de camadas que tornaria o núcleo particularmente estável.

- Os núcleos que tivessem esse tipo de configuração seriam as chamadas **ilhas de estabilidade**.

Essa hipótese é coerente com alguns fatos experimentais que são conhecidos:

- Existe uma quantidade muito maior de núcleos com números de prótons e nêutrons pares estáveis;

Tabela 3: Quantidade de Núcleos Estáveis Conhecidos

	Número de Prótons Par	Número de Prótons Ímpar
Número de Nêutrons Par	164	50
Número de Nêutrons Ímpar	55	4

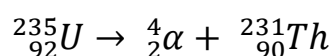
- Núcleos contendo 2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126 prótons ou nêutrons são especialmente estáveis. Por exemplo, o núcleo $^{208}_{82}Pb$ é o isótopo de maior número atômico estável conhecido, e ele possui exatamente 82 prótons e 126 nêutrons ($208 - 82 = 126$).

É interessante observar que o isótopo mais estável a natureza é o $^{56}_{26}Fe$ que possui 26 prótons e 30 nêutrons, portanto, foge aos números mágicos propostos atualmente.

Um importante teste para essa hipótese será quando o elemento de número atômico 126 for sintetizado. Será que é possível obter um isótopo estável desse elemento?

3. Equações Nucleares

Um processo radioativo é aquele em que ocorrem transformações nos núcleos dos átomos. Assim, o átomo de um elemento se transforma em um átomo de outro. São representados por meio de Equações Nucleares.

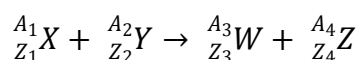


Nessa equação, o átomo de urânio decai, se transformando em um átomo de tório (Th) e liberando uma partícula alfa.



3.1. Conservação da Carga

Considere um processo radioativo qualquer.



Como a carga elétrica não pode ser criada nem destruída, a soma dos números atômicos inicial deve ser igual à soma dos números atômicos finais.

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$$

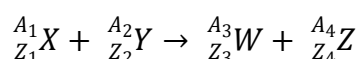
É importante observar que, no caso dos processos radioativos, a carga não é exclusiva dos prótons. Algumas outras partículas subatômicas também apresentam carga, em especial, os pósitrons e os elétrons.

Tabela 4: Partículas Carregadas

Representação	Partícula	Breve Descrição
${}_{+1}^1p$	Próton	Partícula com carga positiva e com massa
${}_{+1}^0\beta$	Pósitron	Partícula com carga positiva e massa desprezível
${}_{-1}^0\beta$	Elétron	Partícula com carga negativa e massa desprezível

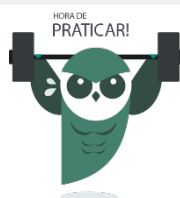
3.2. Conservação do Número de Massa

Nos processos radioativos, a massa não se conserva. A variação de massa se traduz em liberação de energia, por força da Equação de Einstein. Por outro lado, o número de massa total se conserva. Se temos um processo radioativo qualquer:



Podemos escrever a equação de conservação do número de massa.

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4$$



1. (TFC – 2019 – Inédita)

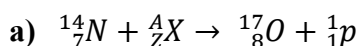
Complete as seguintes equações nucleares:



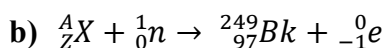


Comentários

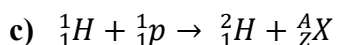
Para resolver esse problema, devemos aplicar as leis das equações nucleares. Vamos completa-las com um núcleo incógnita ${}_Z^AX^A$.



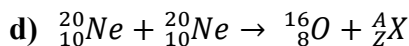
$$\begin{aligned} 7 + Z &= 8 + 1 \therefore Z = 2 \\ 14 + A &= 17 + 1 \therefore A = 4 \\ ? &= {}_2^4\text{He} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} Z + 0 &= 97 - 1 \therefore Z = 96 \\ A + 1 &= 249 \therefore A = 248 \\ ? &= {}_{96}^{248}\text{Cm} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} 1 + 1 &= 1 + Z \therefore Z = 1 \\ 1 + 1 &= 2 + A \therefore A = 0 \\ ? &= {}_{+1}^0e \text{ (pósitron)} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} 10 + 10 &= 8 + Z \therefore Z = 12 \\ 20 + 20 &= 16 + A \therefore A = 24 \\ ? &= {}_{12}^{24}\text{Mg} \end{aligned}$$

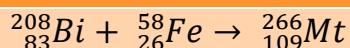
Gabarito: a) ${}_2\text{He}^4$; b) ${}_{96}\text{Cm}^{248}$; c) ${}_{+1}\text{e}^0$; d) ${}_{12}\text{Mg}^{24}$

4. Decaimentos Radioativos

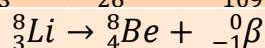
O decaimento radioativo é o processo **espontâneo**, por meio do qual a estrutura de um núcleo se altera, com a emissão de partículas, que serão estudadas nessa seção. Os decaimentos são exotérmicos e possuem um único reagente.



É uma transmutação artificial



É decaimento



O primeiro processo não é um decaimento, porque o núcleo de bismuto foi bombardeado com núcleos de ferro-58. Logo, o processo foi provocado, não foi espontâneo. Trata-se de uma transmutação artificial.

O segundo processo é um decaimento, porque o isótopo lítio-8 espontaneamente emitiu partículas beta, transformando-se em outro núcleo.

A energia liberada nos processos radioativos é emitida na forma de raios gama. Esses raios correspondem aos menores comprimentos de onda no espectro eletromagnético. Portanto, de acordo com a Equação de Planck, que diz que a energia é inversamente proporcional ao comprimento de onda, elas possuem os fótons de maior energia.

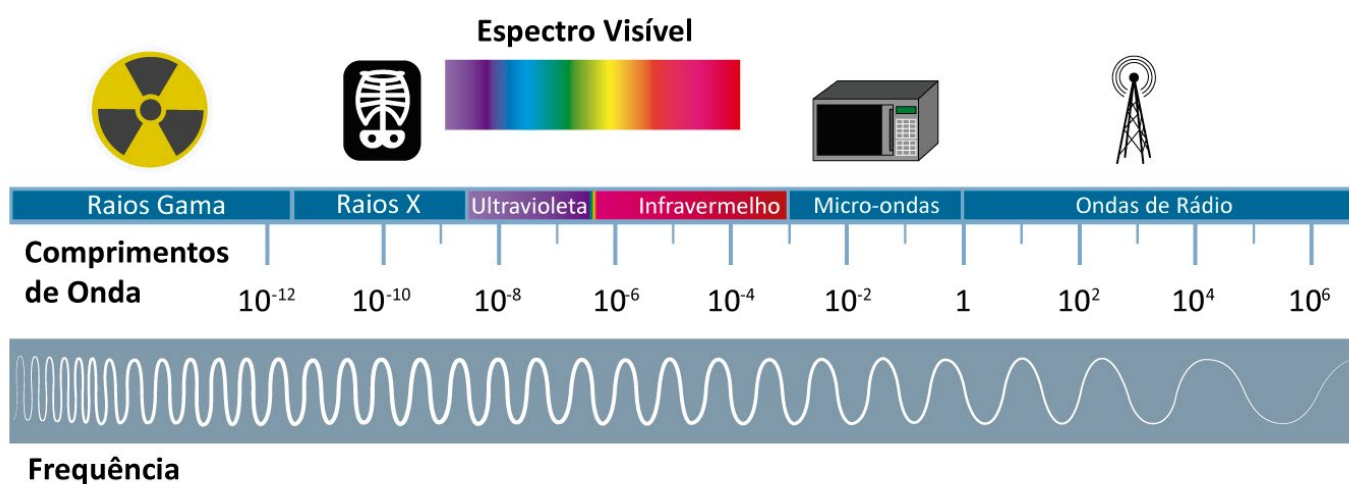


Figura 7: Espectro Eletromagnético (fonte: [2])

Portanto, ainda que haja a emissão de outras partículas, os decaimentos radioativos quase sempre liberam raios gama.



Os raios X, que encontram muitas aplicações na Medicina, são partículas de comprimento de onda muito superior aos raios gama, da ordem de 10 picômetros a 10 nanômetros.

Essas radiações menos energéticas, em especial os chamados “raios X moles”, que são os menos energéticos, com comprimento de onda superior a 100 picômetros, são produzidas a partir de **transformações na eletrosfera**.

Portanto, os raios gama são produzidos a partir de transformações nucleares e os raios X a partir de transformações da eletrosfera.

Eletrosfera

Raios-X

Núcleo

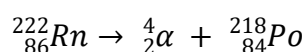
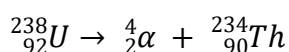
**Raios
Gama**

4.1. Emissão de Partículas Alfa

As partículas alfa são as partículas radioativas mais conhecidas. Elas foram primeiramente teorizadas por Frederick Soddy, que elaborou as famosas Leis de Soddy da Radioatividade.

Primeira Lei de Soddy: “Quando um radioisótopo emite uma partícula alfa (α), ele se transforma em outro elemento com número atômico inferior em duas unidades e número de massa inferior em quatro unidades.”

Vejamos alguns exemplos da Lei de Soddy.



4.2. Emissão de Partículas Beta

As partículas beta também foram teorizadas primeiramente por Frederick Soddy e estão expressões na Segunda Lei de Soddy.

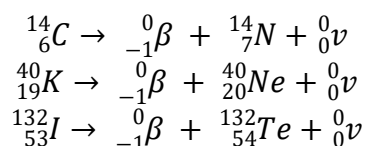
Segunda Lei de Soddy: "Quando um radioisótopo emite uma partícula beta (β), ele se transforma em outro elemento com número atômico superior em uma unidade e com o mesmo número de massa."

A emissão de partículas beta diminui o valor da relação N/P, portanto, só acontece com isótopos que apresentam uma elevada quantidade de nêutrons em relação ao número de prótons.

Além disso, a emissão de partículas beta é acompanhada pela emissão de um neutrino.



Figura 8: Frederick Soddy (fonte: [6])



Há muito pouco a se falar a respeito dos neutrinos e antineutrinos que acompanham as partículas beta. Eles são extremamente leves (algumas centenas de vezes mais leves que os elétrons) e extremamente abundantes (são as segundas partículas mais abundantes do Universo, perdendo apenas para o fóton).

Já, a respeito da própria partícula beta negativa, ela nada mais é do que um elétron, que possui número de massa nulo e carga negativa. Porém, no âmbito da Radioatividade, prefere-se falar em partícula beta, representada por ${}^0_{-1}\beta$, do que em elétron, que é representado por e^- . Essa preferência é apenas uma forma de escrever melhor as equações nucleares.

4.3. Isomerização

Dois núcleos isômeros são aqueles formados pela mesma quantidade de prótons e nêutrons, porém, possuem energias diferentes.

Não se sabe ao certo o que faz que dois núcleos formados pela mesma quantidade de partículas sejam diferentes, mas a hipótese das camadas nucleares traz uma luz para essa explicação desse fenômeno. Por analogia, considere a eletrosfera de um átomo de hélio, que é estável, em seu estado excitado.

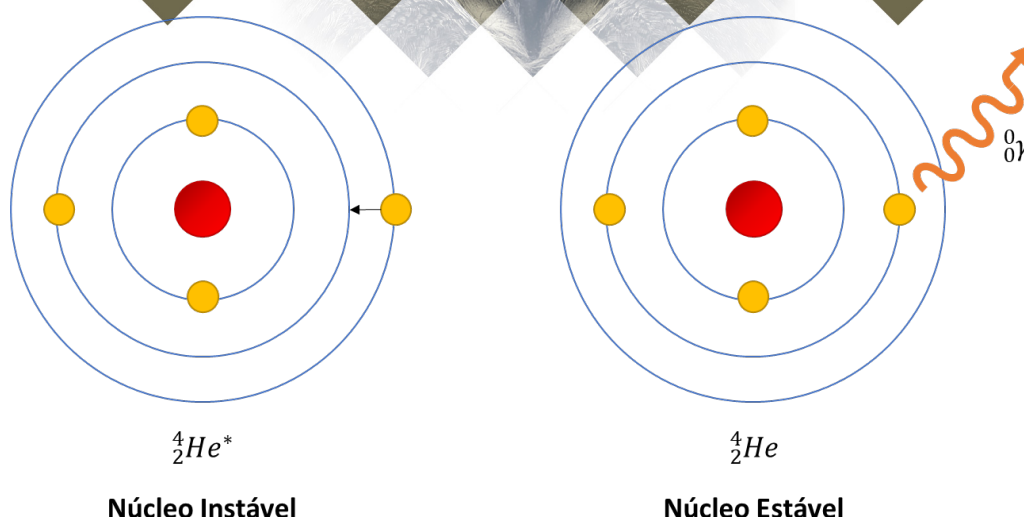
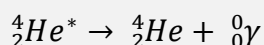


Figura 9: Transformação de um Núcleo Instável em outro Estável pela Emissão de uma Partícula Gama

Nesse processo, não há alteração no número atômico nem no número de massa do isótopo, porém, houve liberação de energia, já que o núcleo passou de um estado excitado para o estado fundamental. Essa energia é liberada na forma de uma partícula gama.



A Figura 10 resume o poder de penetração das partículas estudadas e também inclui os nêutrons. Quando liberados, os nêutrons são partículas de altíssima penetração, porém, não causam muita preocupação, pois eles não interagem com elétrons, somente com núcleos.

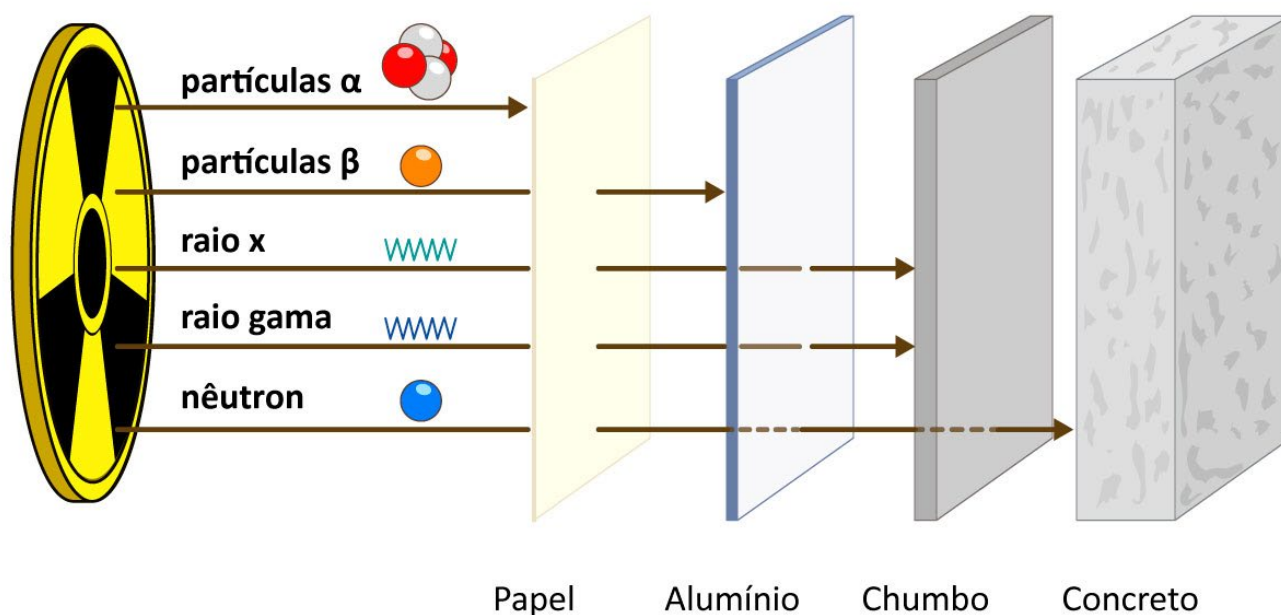


Figura 10: Tipos de Radiação e Poder de Penetração (fonte: [4])

Outro ponto a se comentar sobre os raios gama é que eles não possuem carga nem massa, por isso, não interagem com campos elétricos ou magnéticos.

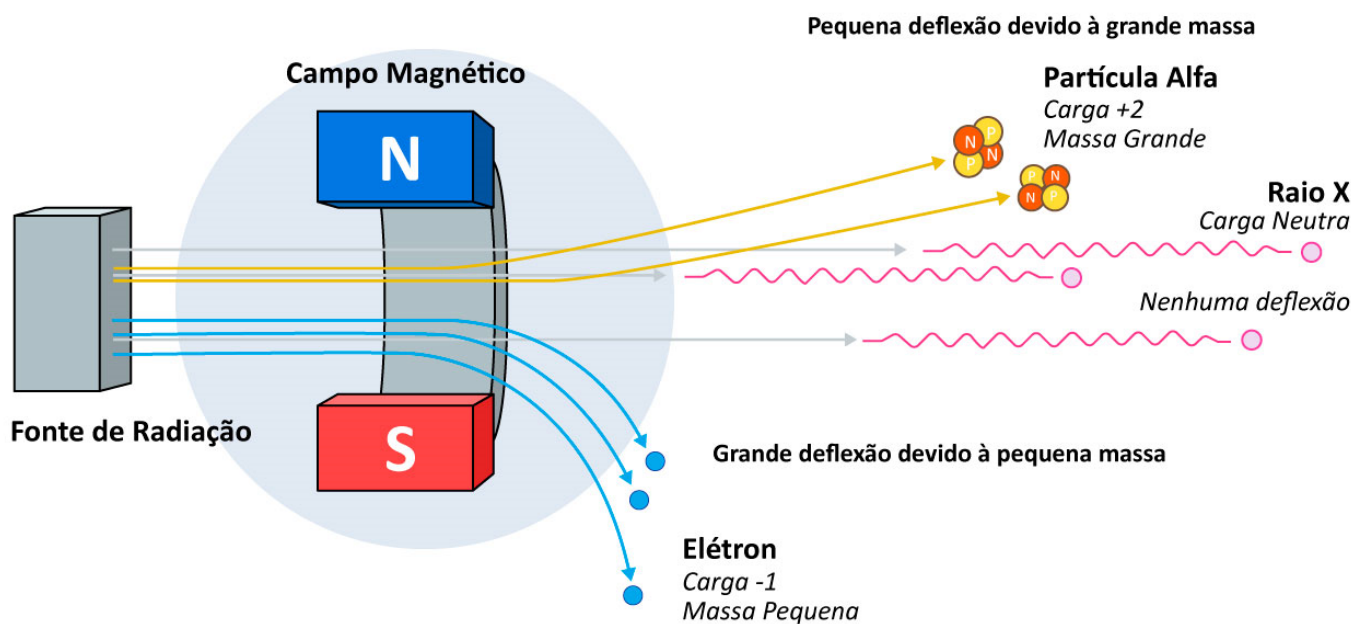


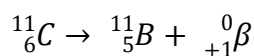
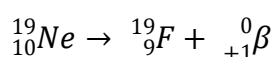
Figura 11: Partículas Subatômicas sob a Ação de um Campo Magnético

4.4. Emissão de Pósitrons

O pósitron é conhecido também como partícula beta positiva, representado por ${}^0_{+1}\beta$.

Podemos dizer, simplificadamente, que um próton se converte em um nêutron e emite um pósitron pelo equilíbrio das cargas.

A emissão de pósitrons diminui o número atômico de um núcleo, sem alterar o seu número de massa. Sendo assim, ela aumenta a razão N/P, portanto, acontece com núcleos que possuem poucos nêutrons. Vejamos alguns exemplos de núcleos emissores de prótons.



Uma das principais aplicações dos pósitrons é na tomografia por emissão de pósitrons (PET). Nessa técnica, injeta-se no paciente glicose ligada a um elemento radioativo, como o flúor radioativo. As regiões que metabolizam a glicose em excesso, tais como tumores ou regiões do cérebro em intensa atividade serão detectadas.

4.5. Captura K

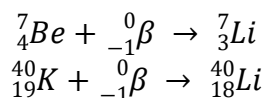
O núcleo pode capturar um elétron da camada mais internas da eletrosfera (a camada K ou nível 1 de energia) e, assim, converter um próton em um nêutron.

O efeito da Captura K é o mesmo da emissão de pósitrons. Sinteticamente, elas podem ser resumidas como:

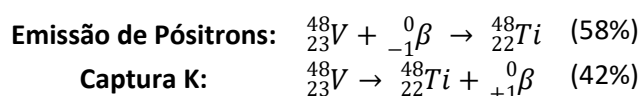


Ao converter o próton em um nêutron, a Captura K também aumenta a relação N/P, portanto, acontece em núcleos deficientes em nêutrons.

Vejamos alguns exemplos:



Algumas transformações podem acontecer tanto pela emissão de pósitrons como pela captura K. Por exemplo, a conversão de vanádio-48 em titânio-48. Segundo dados de J. D. Lee



Após a captura K, os elétrons das camadas acima vão passar para o nível fundamental, o que provoca a emissão de raios-X. Sendo assim, é bastante comum que a captura K seja acompanhada pela emissão de raios-X.

4.6. Séries Radioativas

Uma série radioativa é o conjunto de decaimentos sucessivos por um radioisótopo. O mais comum é que seja um isótopo de número atômico muito elevado que decai até chegar a um isótopo estável do chumbo (Z = 82), que são o chumbo-206, chumbo-207 e chumbo-208.

Sendo assim, em uma série radioativa, **o número de massa sempre decai de um fator de quatro unidades**. Portanto, a redução de número de massa **deve ser sempre um múltiplo de 4** (0, 4, 8, 12, 16...).

Marcamos em vermelho o radioisótopo característico da série e em azul o isótopo estável em que a série termina. Eu não considero que você precise realmente saber qual elemento característico nem o nome de cada série.

- **Série do Tório (4n):** inicia-se com o ${}_{90}\text{Th}^{232}$. Como 232 dividido por 4 é igual a 58 e deixa resto 0, essa série termina no isótopo ${}_{82}\text{Pb}^{208}$. Essa série é chamada **4n**, porque todos os isótopos a ela pertencentes possuem números de massa múltiplos de 4.

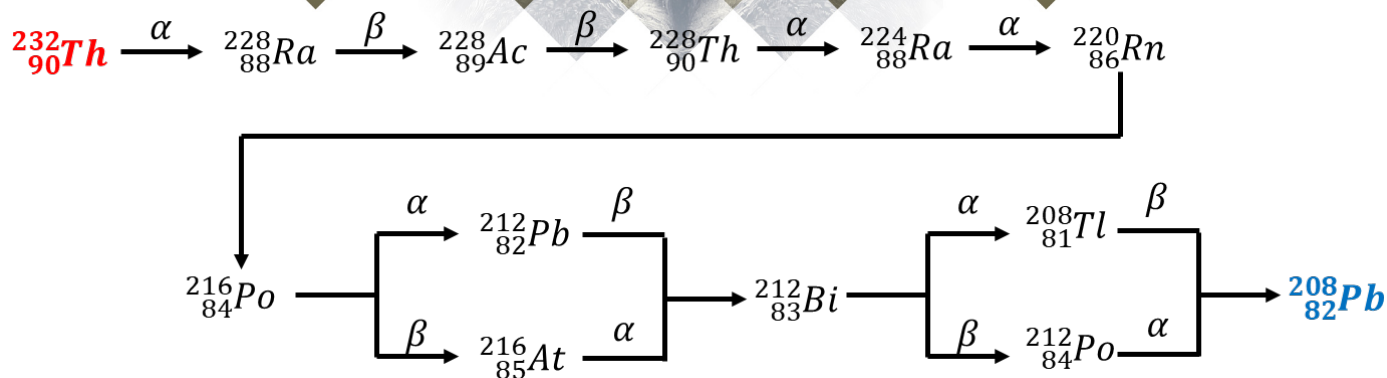


Figura 12: Série do Tório

- **Série do Neptúncio ($4n + 1$):** essa é uma série artificial, que foi descoberta após a síntese dos primeiros elementos transurânicos artificiais. É marcada pela presença do $^{237}_{93}\text{Np}$. Como 237 dividido por 4 é igual a 59 e deixa resto 1, essa série termina não pode terminar em um isótopo do chumbo, mas sim termina no bismuto-209 ($^{209}_{83}\text{Bi}$). Essa série é chamada **$4n + 2$** , porque todos os isótopos a ela pertencentes possuem números de massa que deixam resto 2 na divisão por 4.

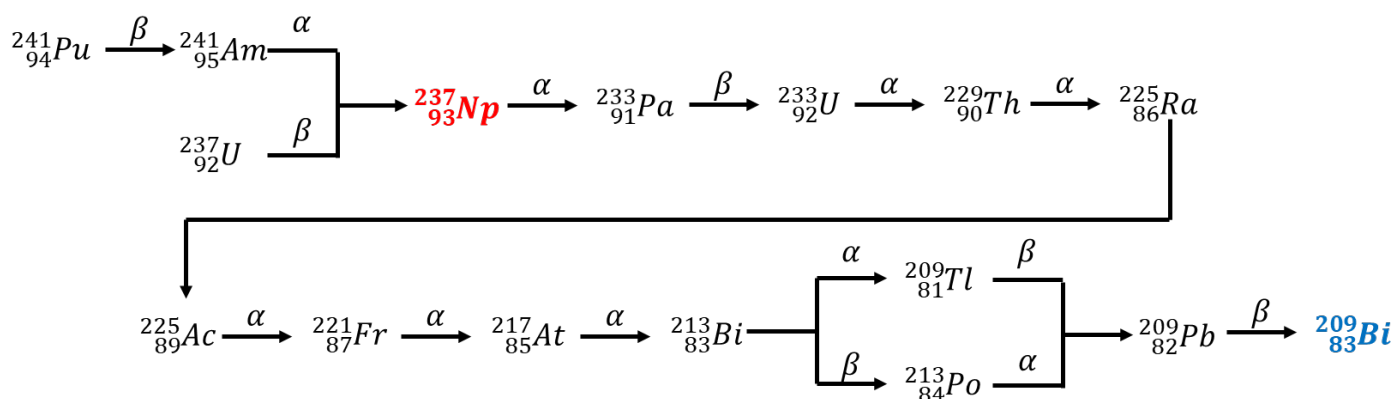


Figura 13: Série do Neptúncio

Um fato interessante sobre essa série é que ela produz o isótopo chumbo-209, que não é estável, porque apresenta excesso de nêutrons. Então, esse isótopo faz a última emissão da série, transformando-se em bismuto-209.

- **Série do Urânio ($4n + 2$):** inicia-se com o $^{238}_{92}\text{U}$. Como 238 dividido por 4 é igual a 59 e deixa resto 2, essa série termina no isótopo $^{206}_{82}\text{Pb}$. Essa série é chamada **$4n + 2$** , porque todos os isótopos a ela pertencentes possuem números de massa que deixam resto 2 na divisão por 4.

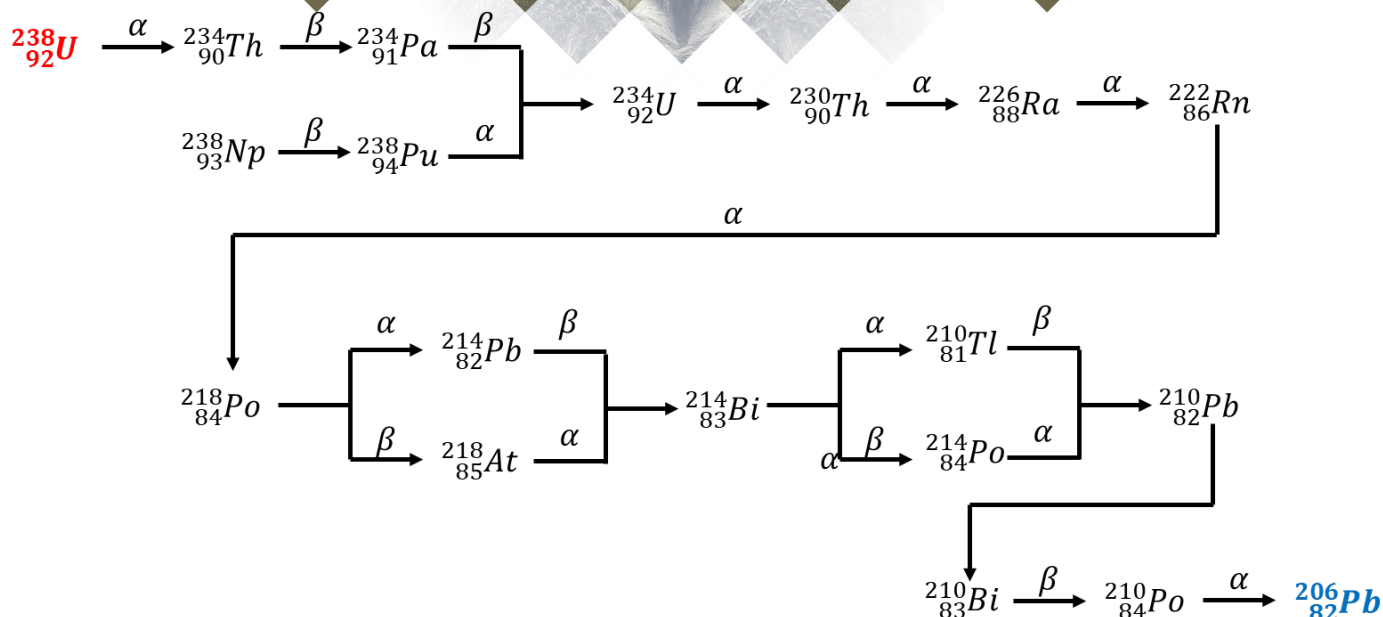


Figura 14: Série do Urânio

- **Série do Actínio ($4n + 3$):** essa série, na verdade, se inicia com o $^{239}_{92}\text{U}$ e seu elemento característico é o urânio-235. Porém, como já existe uma série com o nome de “Série de Urânio”, preferiu-se chamá-la de “Série de Actínio”. Mas há os que chamam essa série de “Série do Urânio-235”. Ambas as denominações devem ser consideradas corretas.

Como 239 dividido por 4 é igual a 59 e deixa resto 3, essa série termina no isótopo $^{207}_{82}\text{Pb}$. Essa série é chamada **$4n + 3$** , porque todos os isótopos a ela pertencentes possuem números de massa que deixam resto 3 na divisão por 4.

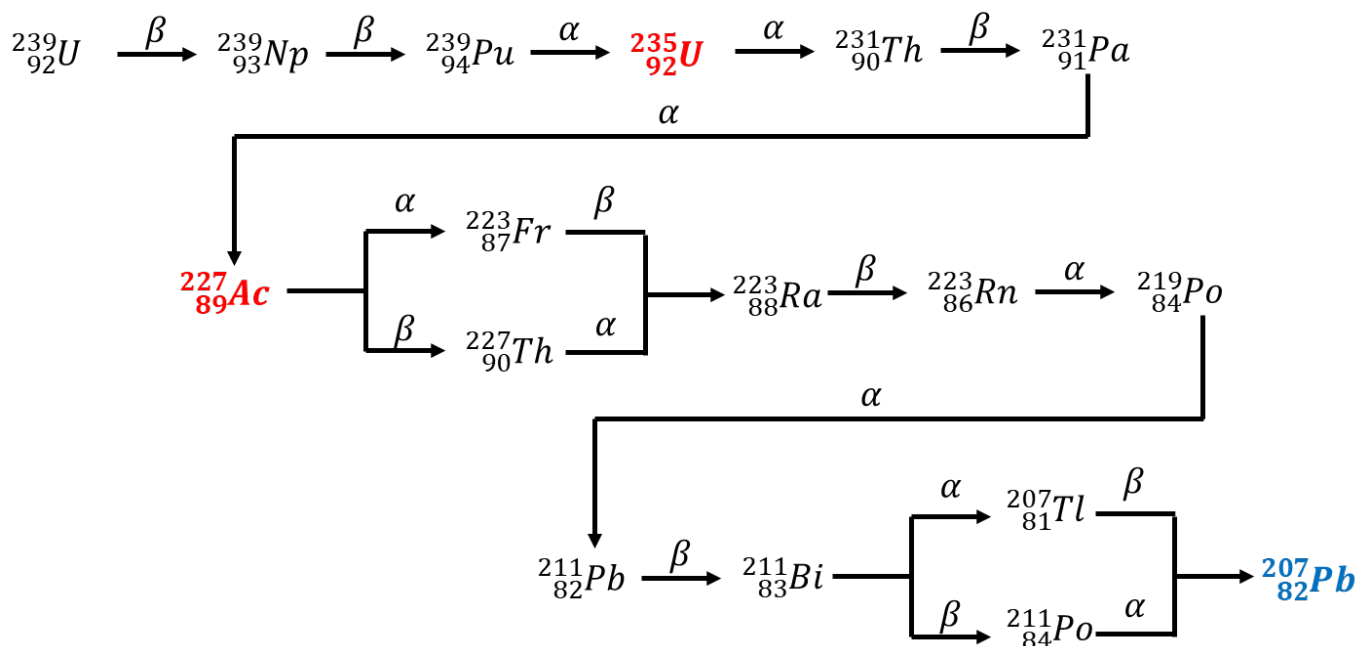


Figura 15: Série do Actínio

O que é mais importante de você saber é, dado um radioisótopo qualquer, determinar qual o isótopo estável em que terminará a sua série radioativa. Para isso, basta utiliza a regra do resto da divisão por 4.



2. (TFC – 2019 – Inédita)

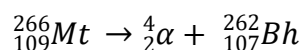
Os núcleos a seguir são radioativos e podem emitir partículas alfa, beta ou pósitrons. Determine qual o tipo de partícula emitido e o nuclídeo resultante. Esse nuclídeo deve ser estável ou ainda sofrerá novos decaimentos?



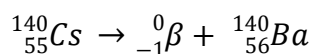
Comentários

Nessa questão, o aluno não precisa simplesmente fazer o trabalho braçal de determinar o núcleo resultante, mas também precisa entender qual tipo de partícula o núcleo deve emitir.

- a) O meitnério-266 é um núcleo muito grande, portanto, é necessária instável e sobre decaimento de partículas alfa a fim de reduzir seu número atômico. Essa sequência de decaimentos só se esgota no chumbo-208, que é a última ilha de estabilidade conhecida.

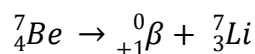


- b) O cézio-140 possui 55 prótons e 85 nêutrons, portanto, possui uma quantidade muito elevada de nêutrons, ou seja, uma relação N/P muito alta. O isótopo mais estável desse elemento é o cézio-133. Por conta disso, ele deve emitir partículas beta negativas (ou elétrons). Basicamente, a emissão de partículas beta transforma um nêutron em um próton, diminuindo a relação N/P.



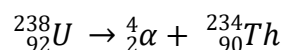
O bário-140 possui 56 prótons e 84 nêutrons, portanto, ainda possui uma relação N/P muito elevada.

- c) O núcleo de berílio-7, por sua vez, possui 4 prótons e 3 nêutrons, portanto, ele possui poucos nêutrons. Logo, deve emitir partículas beta positivas

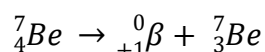




- d) O núcleo de urânio-238, assim como o meitnério-266, é muito grande e, por isso, deve emitir partículas alfa a fim de reduzir seu número atômico, ele emite partículas alfa. O núcleo sofre decaimento até chegar ao isótopo chumbo-208.



- e) O núcleo de berílio-7, por sua vez, possui 4 prótons e 3 nêutrons, portanto, ele possui poucos nêutrons. Logo, deve emitir partículas beta positivas ou pósitrons. Nessa emissão, basicamente, um próton é transformado em um nêutron, o que aumenta a relação N/P.



Gabarito: a) ${}_{107}\text{Bh}^{262}$; b) ${}_{56}\text{Ba}^{140}$; c) ${}_3\text{Li}^7$; d) ${}_{90}\text{Th}^{234}$; e) ${}_3\text{Be}^7$

3. (TFC – 2019 – Inédita)

Dados alguns isótopos radioativos, em qual núcleo estável termina a sua série radioativa?

a) ${}_{97}\text{Bk}^{247}$

b) ${}_{109}\text{Mt}^{266}$

c) ${}_{107}\text{Bh}^{265}$

Comentários

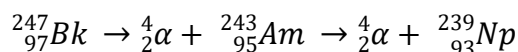
Nessa questão, você deve aplicar a regra do resto da divisão por 4 do número de massa.

$\begin{array}{r} 247 \\ (-244) \end{array} \begin{array}{ l} 4 \\ \hline 61 \end{array}$	$\begin{array}{r} 266 \\ (-264) \end{array} \begin{array}{ l} 4 \\ \hline 66 \end{array}$	$\begin{array}{r} 265 \\ (-264) \end{array} \begin{array}{ l} 4 \\ \hline 66 \end{array}$
= 3	= 2	= 1

Vamos nos lembrar dos restos das divisões dos números de massa dos isótopos estáveis do chumbo, que são 206, 207 e 208.

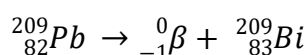
$\begin{array}{r} 206 \\ (-204) \end{array} \begin{array}{ l} 4 \\ \hline 51 \end{array}$	$\begin{array}{r} 207 \\ (-204) \end{array} \begin{array}{ l} 4 \\ \hline 51 \end{array}$	$\begin{array}{r} 208 \\ (-208) \end{array} \begin{array}{ l} 4 \\ \hline 52 \end{array}$
= 2	= 3	= 0

- a) O berquélio-247 deixou resto 3, portanto, pertence à série $4n + 3$, que termina no chumbo-207. É interessante observar que, bastam dois decaimentos alfas para que esse isótopo caia no neptúnio-239, que é o segundo da Série do Actínio, conforme desenhamos na Figura 15.



- b) O metinério-266 deixou resto 2, portanto, sua série radioativa termina no chumbo-206, que encerra a série $4n + 2$. Esse radioisótopo é bastante instável e decai muito rápido chegando na Série do Urânio em poucas horas.
- c) O Bóhrio-265 é um radioisótopo teórico que inventei somente para essa questão. Se produzido, decairia em frações de segundo. O fato é que, como deixou resto 1, ele não pode terminar a sua série em nenhum dos isótopos do chumbo, pois só existem três estáveis, cujos números de massa são 206, 207 e 208.

O Bóhrio atingirá o chumbo-209, pois 209 deixar resto 1.



Gabarito: a) chumbo-207; b) chumbo-206; c) bismuto-209

4. (TFC – Inédita)

Um tratamento para câncer utiliza radioisótopos que emitem radiações de alta energia, como a gama, ${}^0_0\gamma$, eficientes na destruição de células cancerosas que são mais susceptíveis à radiação, por se reproduzirem rapidamente. Entretanto, durante a terapia, é impossível evitar que células saudáveis também recebam parte da radiação.

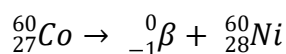
Isso ocasiona diversos efeitos colaterais, entre eles: náusea, fadiga e perda de cabelos. A fonte de radiação é projetada para o uso das radiações gama, já que as radiações alfa, ${}_2^4\alpha$, e beta, ${}_{-1}^0\beta$, são menos penetrantes nos tecidos e nas células. Um dos radionuclídeos usados na radioterapia é o cobalto, ${}_{27}\text{Co}^{60}$.

Com base nas informações e nos conhecimentos sobre radioatividade,

- a) Explique por que as radiações gama possuem maior poder de penetração em relação às radiações alfa e beta.
- b) Sabendo que o ${}_{27}\text{Co}^{60}$ sofre decaimento por meio de emissão de uma partícula beta, escreva a sua equação de decaimento e determine o nuclídeo resultante.

Comentários

O cobalto decai por partículas beta, o que aumenta o seu número atômico, seguindo a equação nuclear.



As partículas gama ${}^0_0\gamma$ possuem poder de penetração maior, porque elas não possuem massa nem carga elétrica. Elas são compostas somente de energia, o que faz que tenham maior poder de penetração e de causar danos ao corpo humano.

Gabarito: discursiva

5. Cinética das Emissões Radioativas

Os processos radioativos **possuem ordem de reação unitária**. Em Cinética Química, isso significa que a velocidade instantânea de decaimento (ou atividade) é proporcional ao número de mols presentes na amostra.

$$A = v = -\frac{dn}{dt} = kn$$

5.1. Constante de Decaimento

A constante de decaimento é o número medido em unidade inversa de tempo (s^{-1} , dia^{-1} etc.) que estabelece a relação entre a **atividade de uma amostra radioativa** e a **quantidade de núcleos nela presentes**. O principal ponto que você precisa saber sobre essa constante é que ela é invariante. Em outras palavras, **não é influenciada por fatores como:**

- **Temperatura:** a temperatura mede o grau de agitação térmica das partículas. Em faixas normais, ou seja, inferiores a milhões de graus Celsius, os átomos não atingem energia cinética suficiente para que seus núcleos comecem a colidir, de modo que as propriedades nucleares comecem a serem afetadas.

Em baixas temperaturas, as colisões entre dois átomos diferentes **ocorrem apenas na sua eletrosfera**.

- **Substância em que está o Radioisótopo:** as substâncias são formadas por ligações químicas, que são arranjos entre os elétrons. Portanto, a formação de substâncias é também simplesmente um fenômeno da eletrosfera. E, por isso, não interfere nas propriedades nucleares.
- **Estado Físico da Matéria:** o estado físico da matéria é determinado por suas interações intermoleculares, que também é um fenômeno da eletrosfera.

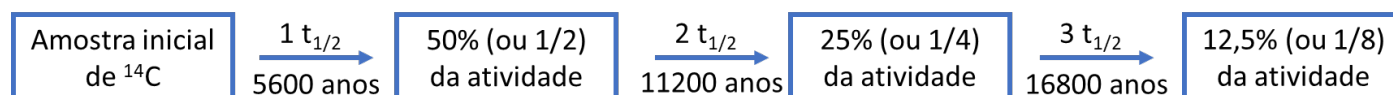
Dessa maneira, uma amostra urânio-238 apresenta **exatamente a mesma atividade** seja ela encontrada no minério UO_2 , que é sólido, ou seja ela encontrada no UF_6 , que é um composto gasoso.

Também pouco importa se essa amostra foi aquecida ou não. Nenhum desses fatores é capaz de afetar a constante de decaimento, portanto, não afetam a velocidade de decaimento.

5.2. Tempo de Meia-Vida

Um sinônimo para uma reação de ordem unitária muito conhecido é **decaimento exponencial**.

Nos processos radioativos, a massa ou o número de mols do radioisótopo decaem exponencialmente com o tempo. Isso significa que existe um **tempo de meia-vida constante**.



Podemos representar esse decaimento por meio de uma equação.

$$N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

$N(t)$ → Quantidade de Núcleos Final
 N_0 → Quantidade de Núcleos Inicial
 $t_{1/2}$ → Tempo de Meia-Vida

A quantidade de núcleos pode ser expressa em número de mols, mas muitas vezes é expressa diretamente em número de átomos. Você só precisa se lembrar que a taxa de conversão de número de átomos para número de mols é o Número de Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$).

É também possível escrever essa equação em função da constante de decaimento radioativo.

$$N(t) = N_0 \cdot (e)^{-kt}$$

$N(t)$ → Quantidade de Núcleos Final
 N_0 → Quantidade de Núcleos Inicial
 k → Constante de Decaimento

Podemos plotar o gráfico na Figura 16 correspondente à equação de decaimento exponencial.

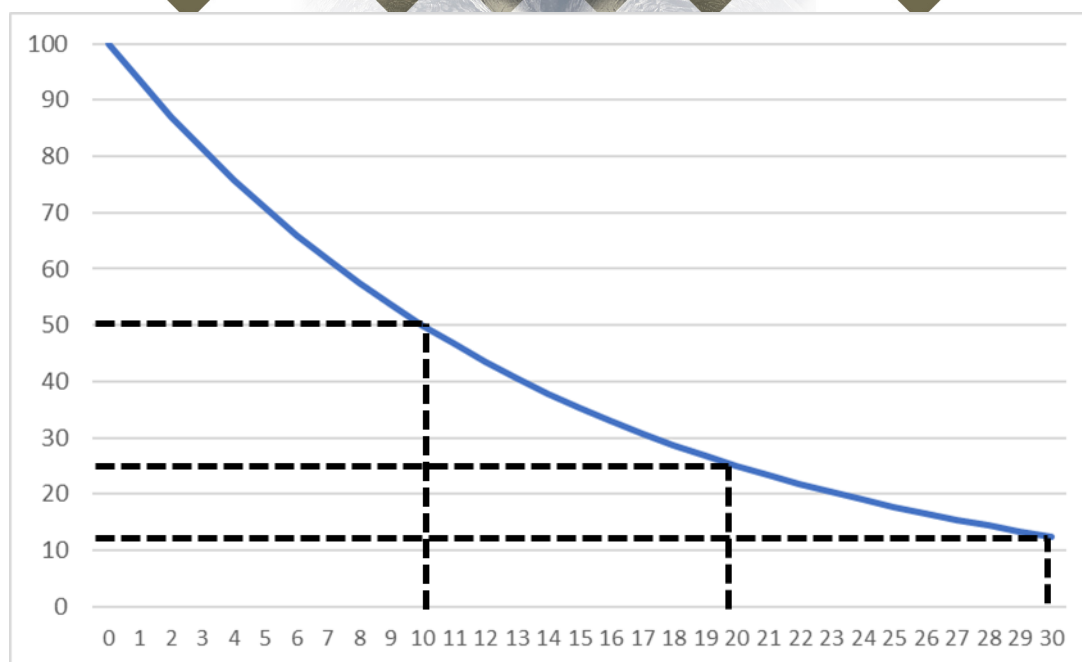


Figura 16: Amostra Radioativa depois de três tempos de meia-vida

5.2.1. Relação entre o Tempo de Meia-Vida e a Constante de Decaimento

O tempo de meia-vida é inversamente proporcional à constante de decaimento.

É bastante simples de entender o motivo. Quanto maior for a constante de decaimento, mais rápida será a desintegração radioativa do isótopo, portanto, menor será o tempo necessário para reduzir a sua massa à metade.

Essa relação de proporcionalidade inversa é expressa pela equação.

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \cong \frac{0,693}{k}$$

Na equação acima, o termo $\ln 2$, se você ainda não viu em Matemática, representa o logaritmo natural de 2. Esse logaritmo é tomado na base e , que é o número de Euler.

Com base nessa equação, podemos calcular a constante de decaimento do carbono-14.

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \therefore k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0,693}{5600} \cong 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ ano}^{-1}$$

5.2.2. Interpretações do Tempo de Meia-Vida

Em geral, costuma-se dizer que, passadas 10 meias-vidas, a atividade de um radioisótopo qualquer se torna muito baixa. A razão para isso é que ela se reduziu a $1/1024$ da atividade inicial, ou seja, menos de 0,1%.

Por isso, esse fator de 10 meias-vidas é bastante utilizado para estimar o tempo necessário para que um radioisótopo qualquer ofereça perigos ao ser humano.

NOVIDADE!



Com base nisso, apresentamos, a seguir, um conjunto de três radioisótopos. Qual deles você acredita que ofereçam um maior risco à população, caso venham a ser jogados na natureza?

- **Lítio-8:** 838 ms (milissegundos);
- **Césio-140:** 30 anos;
- **Urânio-238:** 4,5 bilhões de anos.

Pense bem na sua resposta.

O lítio-8 praticamente não oferece nenhum perigo ao ser humano. Se houver algum acidente com esse material, em pouco mais de 8 segundos, sua atividade se reduzirá a praticamente zero.

Por outro lado, no caso da atividade do urânio-238, devemos nos lembrar que a constante de decaimento é inversamente proporcional ao tempo de meia-vida. Portanto, devido ao seu elevadíssimo tempo de meia-vida, essa constante é praticamente nula, no caso do urânio-238.

A atividade radioativa é igual ao produto da constante de decaimento pelo número de átomos presentes na amostra. Como a constante é muito pequena, a própria atividade do isótopo será muito pequena.

A atividade de 1 g de urânio-238 é de 12 400 Bq, aproximadamente a mesma atividade da massa de $73 \cdot 10^{-9}$ g de ^{14}C .

Por outro lado, no caso do Césio, que tem meia-vida de 30 anos, tem-se o caso mais sério. Esse tempo de meia-vida não é tão curto para que a sua radioatividade se disperse rapidamente, como acontece na amostra de lítio-8; mas também não é tão longo a ponto que a sua atividade seja muito pequena.

O césio possui atividade apreciável, suficiente para provocar danos ao ser humano que seja exposto à sua radiação. Além disso, essa atividade somente se reduzirá a 0,1% do valor original depois de 300 anos.

Isso significa que, em caso de acidente com césio-140, a amostra liberada terá uma atividade radioativa considerável no período de 300 anos. É por isso que o lixo radioativo é considerado tão nocivo.

Sendo assim, os radioisótopos mais perigosos ao ser humano são aqueles que possuem tempo de meia-vida intermediários.

5.2.3. Equação de Decaimento em Função do Tempo de Meia-Vida

A equação de decaimento radioativo pode ser expressa em função do tempo de meia-vida da seguinte forma:

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

Na expressão acima:

- **N:** é o número de radioisótopos presentes ao final;
- **N₀:** é a quantidade inicial de radioisótopos;
- **t:** é o tempo passado desde o início do decaimento;
- **t_{1/2}:** é o tempo de meia-vida.

A razão $t/t_{1/2}$ pode ser expressão como a **quantidade de meias-vidas que já se passaram desde o início do decaimento radioativo**.

$$n = \frac{t}{t_{1/2}}$$

5.3. Dose de Radiação Letal ao Ser Humano

O que nos interessa avaliar em uma amostra radioativa é **o seu poder ionizante**, que depende não só da atividade radioativa, mas também do tipo de partícula e da velocidade que ela é emitida.

A primeira unidade que é bastante utilizada no cálculo da dose de radiação absorvida pelo corpo humano é o **gray** (Gy), que representa a quantidade de **energia de radiação ionizante** absorvida por **unidade de massa**. O gray, portanto, é uma razão de J/kg.

O interessante dessa unidade de medida é que ela leva em consideração quanto de energia de radiação é absorvida pelo corpo. Essa energia, que vem principalmente na forma de raios gama, é o que causa os maiores efeitos biológicos maléficos.

5.4. Demonstrações das Equações

Essa seção é recomendada apenas para alunos avançados que possuem conhecimentos de Cálculo Diferencial.

A definição de velocidade de desintegração é a derivada do número de átomos presentes na amostra radioativa.

$$v = -\frac{dn}{dt} = kn$$

Podemos arrumar a equação separando as duas variáveis, uma de cada lado.

$$\frac{dn}{n} = -kdt$$

Agora, podemos integrar os dois lados.

$$\int \frac{dn}{n} = -kt + c$$

Nessa integral, “c” é a constante de integração que vai ser futuramente determinada com base no número de átomos presentes na amostra inicial. A integral de $1/n$ é o logaritmo natural.

$$\ln[n] = -kt + c$$

Aplicando a exponencial de ambos os lados, temos:

$$n = Ce^{-kt}$$

Para $t = 0$, temos que:

$$n = n_0$$

Substituindo na expressão $n = Ce^{-kt}$

$$n_0 = C \cdot e^{-k \cdot 0} = C \therefore C = n_0$$

Agora, podemos substituir o valor encontrado para a constante de integração “C”.

$$n(t) = n_0 e^{-kt}$$

Já conseguimos provar a relação por meio da constante de decaimento “k”. Agora, podemos calcular o tempo de meia-vida, impondo que, para $t = t_{1/2}$, a amostra se reduziu à metade da amostra inicial, ou seja, $n(t) = n_0/2$.

$$\begin{aligned} n(t_{1/2}) &= n_0 \cdot e^{-kt_{1/2}} \\ \frac{n_0}{2} &= n_0 \cdot e^{-kt_{1/2}} \end{aligned}$$

Podemos simplificar n_0 em ambos os lados da equação.

$$\frac{1}{2} = e^{-kt_{1/2}}$$

Aplicando o logaritmo na base Euler, temos:

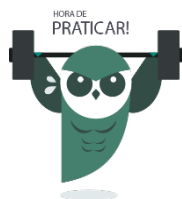
$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -kt_{1/2}$$

Aplicando as propriedades do logaritmo, temos:

$$-\ln(2) = -kt_{1/2}$$

$$\therefore t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k} \cong \frac{0,693}{k}$$

Sendo assim, estão provadas as equações que desejávamos.



5. (TFC – 2019 – Inédita)

Determine a meia-vida de:

a) Potássio-40, $k = 5,3 \cdot 10^{-10} \text{ anos}^{-1}$

b) Cobalto-60, $k = 0,132 \text{ anos}^{-1}$

c) Nobélio-255, $k = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

Comentários

Essa questão é bastante direta. Basta aplicar a expressão para o cálculo do tempo de meia-vida em função da constante de decaimento.

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k}$$

a)

$$t_{1/2} = \frac{0,69}{5,3 \cdot 10^{-10}} = 1,3 \cdot 10^9 \text{ anos}$$

b)

$$t_{1/2} = \frac{0,69}{0,132} = 5,23 \text{ anos}$$

c)

$$t_{1/2} = \frac{0,69}{3,85 \cdot 10^{-3}} = 179 \text{ s}$$

Gabarito: a) $1,3 \cdot 10^9$ anos; b) 5,32 anos; c) 179 s

6. (TFC – 2019 – Inédita)

A atividade de uma fonte de estrôncio-90 é $3,29 \cdot 10^8$ Bq. Sabendo que sua meia-vida é de 29 anos:

a) Qual será a sua atividade após 50 anos?

b) Determine a massa da amostra.

Dados: $\log 2 = 0,3$; $\log(3,29) = 0,517$; Número de Avogadro = $6 \cdot 10^{23}$.

Comentários

A atividade de uma amostra radioativa decai exponencialmente, de acordo com a equação:

a)

$$Atv(50) = Atv_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} = 3,29 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{50/29}$$

$$Atv(50) = 3,29 \cdot 10^8 \cdot \left(10^{-0,30 \cdot \frac{50}{29}}\right) = 3,29 \cdot 10^8 \cdot (10^{-0,517})$$

$$Atv(50) = 3,29 \cdot 10^8 \cdot \frac{1}{3,29} \cong 1 \cdot 10^8 \text{ Bq}$$

Perceba que, mesmo após o período de 50 anos, a atividade da amostra radioativa ainda se situa em cerca de 30% da amostra original.

b) Para calcular a massa da amostra, devemos, primeiramente obter a constante de decaimento, que é calculada diretamente a partir do tempo de meia-vida.

$$k = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} = \frac{0,693}{29 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = 7,6 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

Agora, devemos utilizar a relação entre atividade e número de núclídeos presentes na amostra.

$$Atv = kN$$

$$3,29 \cdot 10^8 = 7,6 \cdot 10^{-10} \cdot N \therefore N = \frac{3,29 \cdot 10^8}{7,6 \cdot 10^{-10}} = 0,43 \cdot 10^{8+10} = 4,3 \cdot 10^{17} \text{ núcleos}$$

Para calcular a massa em gramas presentes na fonte radioativa, devemos primeiramente calcular seu número de mols dividindo o resultado obtido anteriormente pelo Número de Avogadro.

$$n = \frac{4,3 \cdot 10^{17}}{6 \cdot 10^{23}} = 0,71 \cdot 10^{17-23} = 0,71 \cdot 10^{-6} \text{ mol}$$

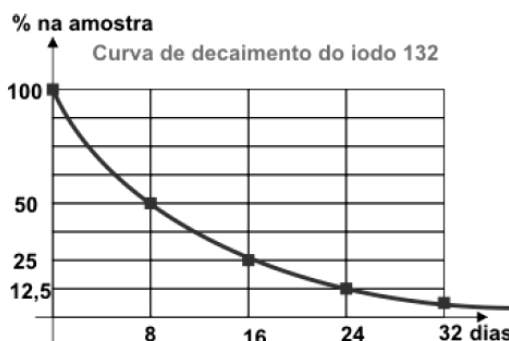
Agora, basta multiplicar pela massa molar do isótopo estrôncio-90, que é aproximadamente 90 g/mol.

$$m = 0,71.90.10^{-6} \cong 64.10^{-6}g = 64 \mu g$$

Gabarito: a) $1,3.10^9$ anos; b) 5,32 anos; c) 179 s

7. (TFC – Inédita)

O iodo-132 sofre decaimento com liberação de partículas beta. De acordo com observações laboratoriais, traçou-se a seguinte curva de decaimento para o radioisótopo.



A análise da curva de decaimento revela que o iodo:

- a) sofre decaimento com emissão de partículas de carga positiva.
- b) estabiliza-se a partir de trinta e dois dias.
- c) possui meia-vida de oito dias.
- d) o seu tempo de meia-vida depende da quantidade inicial de iodo-132 presente na amostra.
- e) o seu tempo de meia-vida é crescente com a temperatura.

Comentários

A curva de decaimento mostra a quantidade de iodo-132 presente pelo tempo. Portanto, traz informações sobre a cinética, o que inclui o tempo de meia-vida. Notamos que 8 dias após a emissão, restou 50% da amostra inicial, portanto, esse é o período de meia-vida. Logo, a letra C está correta.

Na curva de decaimento, não há nenhuma informação sobre as partículas liberadas. Porém, é de se esperar que ele emita partículas beta, pois possui muitos nêutrons – o único isótopo estável do iodo é o 127. Logo, a letra A está errada.

A radiação não para depois dos 32 dias. Ela continua. Enquanto houver iodo presente, ele continuará decaindo. Portanto, está errada a letra B.

As letras D e E trazem informações relevantes sobre o tempo de meia-vida. Devemos registrar que:

- O tempo de meia-vida não depende da quantidade inicial do radioisótopo. Ele é constante em todo o processo radioativo;
- O tempo de meia-vida não depende da temperatura.

Portanto, as letras D e E estão erradas.

Gabarito: C

8. (TFC – Inédita)

Um dos maiores acidentes com o isótopo ^{137}Cs aconteceu em setembro de 1987, na cidade de Goiânia, Goiás, quando um aparelho de radioterapia desativado foi desmontado em um ferro velho. O desastre fez centenas de vítimas, todas contaminadas através de radiações emitidas por uma cápsula que continha ^{137}Cs , sendo o maior acidente radioativo do Brasil e o maior ocorrido fora das usinas nucleares. O grande risco das emissões radioativas do cézio-137 é que, mesmo após vários anos, a atividade do material continua significativamente elevada. Considere que uma amostra radioativa tinha 32 g de ^{137}Cs e que o seu tempo de meia vida é 30 anos. Com base nessa informação, depois de quantos anos, teremos 1 g de ^{137}Cs ?

- a) 90
- b) 120
- c) 150
- d) 180
- e) 210

Comentários

O decaimento do cézio é exponencial, portanto, podemos

$$m = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

$$1 = 32 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

$$\frac{1}{32} = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

Vamos extrair a potência.

$$\frac{t}{t_{1/2}} = 5$$

Agora, basta calcular o tempo.

$$\therefore \frac{t}{t_{1/2}} = 5 \therefore t = 5 \cdot t_{1/2} = 5 \cdot 30 = 150 \text{ anos}$$

Gabarito: C

6. Fissão e Fusão Nuclear

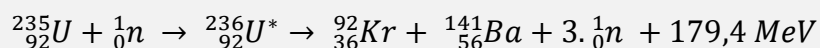
Os processos de fissão e fusão nuclear são os processos da natureza que envolvem a maior liberação de energia. São empregados nas usinas nucleares para a produção de energia.

Um ponto interessante para você ficar de olho é que o núcleo mais estável em termos de energia de ligação por nucleon é o ferro-56. Portanto, os núcleos menores que o ferro-56 tendem a se fundir, enquanto que os núcleos maiores que eles tendem a se partir – processo de fissão nuclear.

6.1. Fissão Nuclear

A fissão nuclear é o processo de fragmentação de um núcleo grande em núcleos menores. Quando espontâneo, é bastante exotérmico, ou seja, libera energia.

O processo de fissão nuclear mais conhecido é a **fissão do urânio-235**. Quando esse isótopo absorve um nêutron, ele se transforma no isótopo instável urânio-236, que possui energia suficiente para se partir.



No processo de fissão nuclear, **não ocorre a quebra pura e simples do átomo de urânio**, mas sim **a formação de outros núcleos**. Portanto, a fissão nuclear pode ser esquematizada.

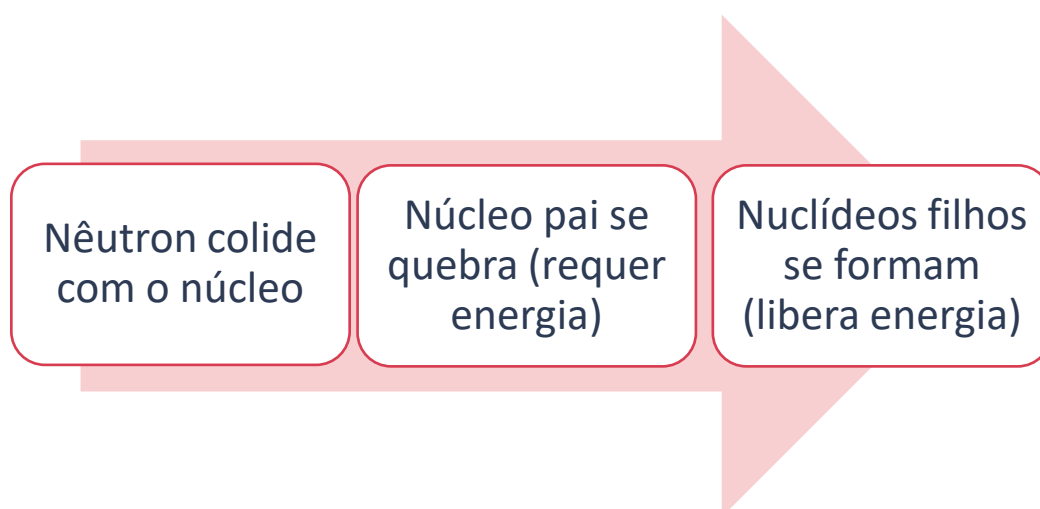


Figura 17: Esquematização da Fissão Nuclear

Agora, vamos nos aprofundar em alguns pontos a respeito desse interessante processo de transmutação nuclear.

6.1.1. Reação em Cadeia

Observe que a fissão de um núcleo de urânio libera, além dos núclídeos filhos – como são chamados os núcleos derivados –, alguns nêutrons. Esses nêutrons podem colidir com outros núcleos de urânio-235, provocando a sua fissão. E, assim, serão liberados novos nêutrons que vão colidir novos núcleos de urânio. O processo gerará um ciclo.

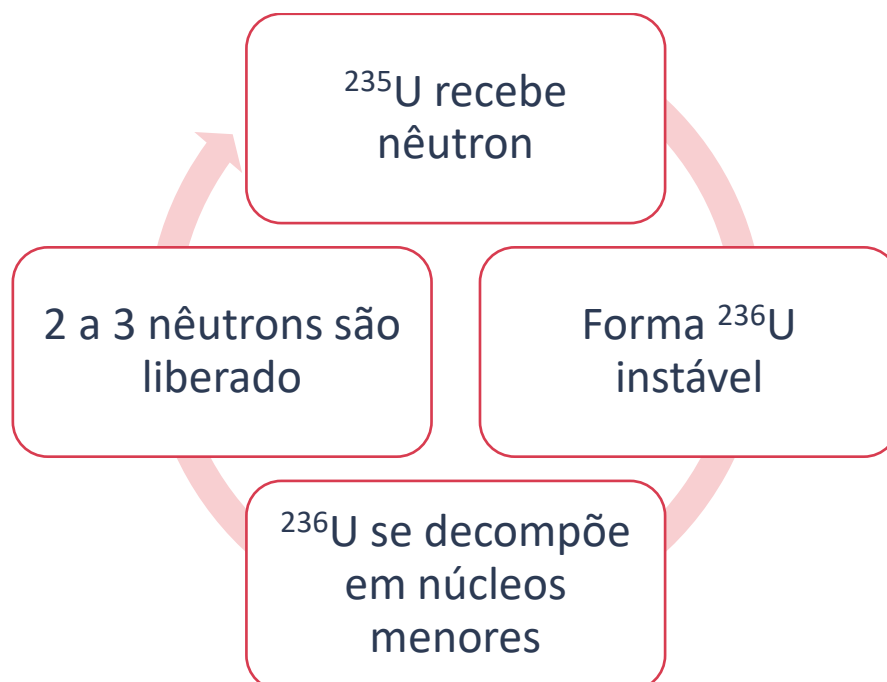


Figura 18: Fissão do ^{235}U é uma reação em cadeia

Um problema que pode acontecer nos processos de fissão nuclear é que, como o movimento dos núcleos é aleatório, **eles podem simplesmente escapar** sem colidir com outros núcleos de urânio.

Como já foi visto no Experimento de Rutherford, a grande maioria das partículas alfa atravessa o átomo sem colidir com o núcleo. Imagina o que acontece com os núcleos, que são ainda menores que elas.

Dessa maneira, é preciso haver **uma quantidade mínima do material fissionável** para que haja uma probabilidade grande de que os nêutrons gerados fiquem realmente aprisionados dentro da amostra. Essa quantidade mínima é denominada **massa crítica**.

A massa crítica depende não só do isótopo fissionável, mas também da forma geométrica em que ele está arranjado. É muito mais fácil o nêutron escapar de uma barra reta do que de uma esfera, pois, na barra, ele pode atravessar a espessura, que tem um comprimento bem inferior às demais dimensões.

A título de ilustração, trazemos as massas críticas dos principais isótopos fissionáveis quando eles se encontram na forma esférica.

Tabela 5: Massa Crítica dos Principais Isótopos Fissionáveis

Isótopo	Massa Crítica	Isótopo	Massa Crítica
Urânio-233	15 kg	Plutônio-242	100 kg
Urânio-235	50 kg	Americio-241	60 a 100 kg
Neptúnio-236	7 kg	Americio 242	9 a 18 kg
Neptúnio-237	60 kg	Americio 243	50 a 150 kg
Plutônio-238	9 kg	Califórnio-249	6 kg
Plutônio-239	10 kg	Califórnio-251	5 kg
Plutônio-240	40 kg		

6.1.2. Nuclídeos Formados

É muito difícil controlar os produtos da reação e afirmar quais serão os isótopos formados. A realidade é que basicamente qualquer isótopo relativamente estável de número atômico inferior pode ser formado.

Essa realidade **é um grande problema** nas fissões nucleares, porque não é possível ter controle sobre os produtos da fissão nuclear, podendo ser formados, inclusive, outros radioisótopos.

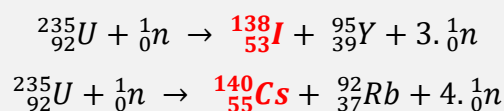
Os produtos principais da fissão do urânio-235 são, de fato, $^{92}_{36}\text{Kr} + ^{141}_{56}\text{Ba}$. Porém, esses isótopos não são preocupantes. Eles apresentam tempos de meia-vida muito curtos: o criptônio-92 apresenta 1,8 segundos, enquanto que o bário-142 apresenta 8,3 minutos. Além disso, o bário é um sólido com alto ponto de fusão, portanto, não se dispersa na atmosfera.

Isso significa que, em pouco mais de 18 segundos e 83 minutos, a radiação emitida por esses radioisótopos já é praticamente nula.

Os radioisótopos preocupantes são o célio-137 (30 anos) e o iodo-131 (8 dias).

O primeiro apresenta uma meia-vida média – sua radiação permanece no local em foi aplicada por mais de 100 anos em níveis acima do tolerável pelo ser humano. É perigoso também por ser volátil, com ponto de fusão de 28°C, o que significa que, apesar de ser sólido, ele pode se dispersar pela atmosfera.

Já o iodo-131, apesar de sua meia-vida relativamente curta, é facilmente absorvido pelo corpo humano, tendo em vista que o iodo faz parte do metabolismo da glândula tireóide.

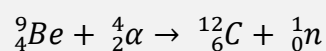


6.1.3. Velocidade dos Nêutrons

Para iniciar a fissão nuclear, é preciso ceder uma pequena quantidade inicial de nêutrons para a amostra de material radioativo. Portanto, é necessário ter uma fonte dessas partículas para iniciar o

processo de fissão nuclear, devendo necessariamente ser um material radioativo, tendo em vista que eles somente podem ser obtidos por meio de reações nucleares.

Com os conhecimentos modernos, podemos escrever o processo radioativo observado por Chadwick pela seguinte equação nuclear.



De maneira geral, as reações nucleares são bastante exotérmicas, por isso, os nêutrons emitidos costumam ser bastante rápidos, tendo energia superior a 2 MeV. São tão rápidos que escapam com facilidade do reator de fissão.

Portanto, nos reatores térmicos, é muito comum utilizar um **moderador** para desacelerar alguns nêutrons muito rápidos. A ideia é que se utiliza um isótopo, cujos núcleos possam ser atingidos pelos nêutrons, porém, esse isótopo deve ter baixa afinidade por essas partículas.

Os materiais mais utilizados como moderadores são a água pesada (D_2O), que é a molécula de água formada por dois átomos de deutério, em vez de hidrogênio leve, e o carbono grafite, que é formado principalmente por átomos ${}^{12}\text{C}$, isótopo que é bastante estável.

6.1.4. Enriquecimento do Urânio

O urânio é obtido na natureza principalmente na forma de dióxido de urânio UO_2 , que é um sólido que contém 99,3% do isótopo ${}^{238}\text{U}$ e apenas 0,7% em massa do isótopo ${}^{235}\text{U}$, que é físsil.

Em geral, nos reatores de fissão nuclear, precisa-se utilizar um teor de cerca de 3% do isótopo ${}^{235}\text{U}$, por isso, o urânio natural precisa ser enriquecido.

Trata-se de um processo bastante caro, pois as diferenças entre ${}^{235}\text{UO}_2$ e ${}^{238}\text{UO}_2$ são muito pequenas. Porém, nesse momento, podemos nos lembrar sobre as propriedades dos isótopos.

Isótopos

Propriedades Químicas

Exatamente Iguais

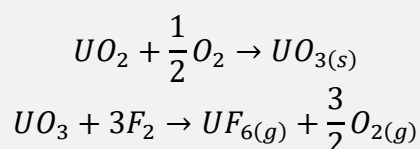
Propriedades Físicas

Há ligeiras diferenças relacionadas à diferença de massa

Figura 19: Diferenças entre Propriedades Físicas e Químicas dos Isótopos

Como existe uma pequena variação de massa (cerca de 1%), os dois isótopos apresentarão propriedades físicas ligeiramente diferentes em seus compostos, como a densidade. Por isso, um dos métodos mais utilizados para explorar essa sutileza é a **centrifugação**. Porém, esse método não pode ser aplicado no UO_2 , já que esse minério é sólido.

O que se faz normalmente é converter o urânio em gasoso por meio de algumas reações químicas.

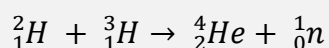


O hexafluoreto de urânio é submetido à centrífuga. Como as diferenças de massa entre os dois isótopos de urânio a serem separados são muito pequenas, o processo é extremamente lento e caro. Por isso, somente para fins militares é que se costuma obter purezas superiores do isótopo ^{235}U .

6.2. Fusão Nuclear

Os núcleos menores podem se combinar para formar núcleos maiores. Como vimos, a energia de ligação por nucleon dos elementos mais leves é pequena e vai crescendo com o aumento da quantidade de prótons e nêutrons até o núcleo de ferro-56.

A reação de fusão nuclear mais simples e conhecida envolve os dois isótopos hidrogênio: deutério e trítio, liberando o estável núcleo de hélio-4 segundo a equação.



Chama a atenção que, ao contrário do processo de fissão nuclear, os produtos formados não representam riscos radioativos. Por conta disso, a **fusão nuclear é considerada uma fonte limpa de energia**, o que faz que seja estudada em laboratórios do mundo inteiro.

Vale ressaltar, ainda, que o hidrogênio é muito mais abundante na Terra do que o urânio, portanto, o combustível seria praticamente ilimitado.

A grande dificuldade para iniciar essa reação é vencer a forte repulsão entre os núcleos de dois átomos de hidrogênio, quando aproximados.

Os métodos mais comuns de promover essa aproximação são:

- **Acelerador de Partículas:** nesse equipamento, os materiais são rotacionados em velocidades extremamente rápidas, o que permite maior incidência de colisão entre núcleos.
- **Temperaturas Altíssimas:** em temperaturas superiores a um milhão de graus Celsius, forma-se um plasma gasoso. O plasma, considerado o quarto estado da matéria, é formado por íons gasosos envoltos por uma matriz de elétrons livres. Como os átomos tiveram seus elétrons retirados, as colisões se darão entre seus núcleos.

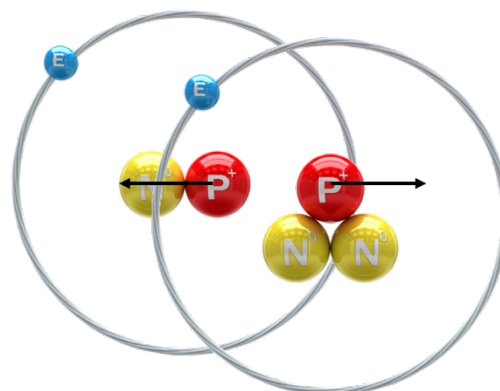


Figura 20: Repulsão Eletrostática entre dois prótons

NOVIDADE!



Devido às alturas temperaturas necessárias para iniciar o processo de fusão nuclear, não se conhece ainda atualmente um modo de se processar essa transmutação de modo controlado.

Um dos principais métodos a respeito de que se pesquisa é o **confinamento magnético**. Nessa técnica, o plasma poderia ser confinado no interior de um campo magnético extremamente elevado.



HORA DE
PRATICAR!

9. (TFC – 2019 – Inédita)

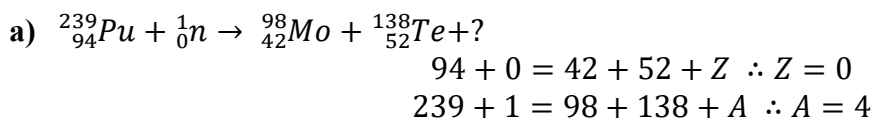
Complete as equações nucleares de fissão do plutônio-239.



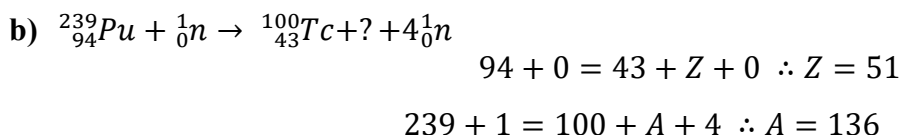
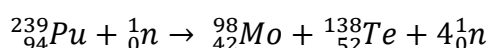


Comentários

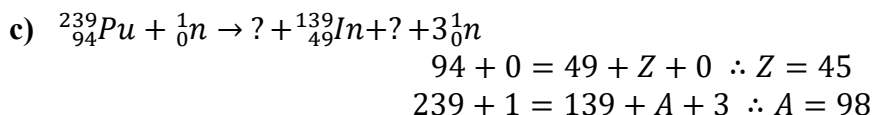
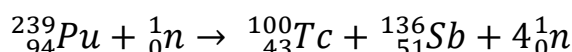
Para resolver essa questão, devemos



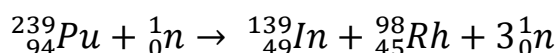
Portanto, foram expelidos quatro núcleos. Podemos escrever a equação nuclear completa para a fissão nuclear desse isótopo.



Olhando na Tabela Periódica, encontramos que o elemento, cujo número atômico é igual a 51 é o antimônio (Sb). Assim, podemos escrever a equação nuclear completa.



Olhando na Tabela Periódica, encontramos que o elemento, cujo número atômico é igual a 45 é o ródio (Rh). Assim, podemos escrever a equação nuclear completa.



Gabarito: a) 4 ${}_0\text{n}^1$; b) ${}_{51}\text{Sb}^{136}$; c) ${}_{45}\text{Rh}^{98}$

6. Lista de Questões Propostas

MASSAS MOLARES

Elemento Químico	Número Atômico	Massa Molar (g mol ⁻¹)	Elemento Químico	Número Atômico	Massa Molar (g mol ⁻¹)
H	1	1,01	Mn	25	54,94
Li	3	6,94	Fe	26	55,85
C	6	12,01	Co	27	58,93
N	7	14,01	Cu	29	63,55

Elemento Químico	Número Atômico	Massa Molar (g mol ⁻¹)	Elemento Químico	Número Atômico	Massa Molar (g mol ⁻¹)
O	8	16,00	Zn	30	65,39
F	9	19,00	As	33	74,92
Ne	10	20,18	Br	35	79,90
Na	11	22,99	Mo	42	95,94
Mg	12	24,30	Sb	51	121,76
Al	13	26,98	I	53	126,90
Si	14	28,08	Ba	56	137,33
S	16	32,07	Pt	78	195,08
Cl	17	35,45	Au	79	196,97
Ca	20	40,08	Hg	80	200,59

1. (TFC – 2019 – INÉDITA)

Complete as seguintes equações nucleares:

- ${}_7\text{N}^{14} + ? \rightarrow {}_8\text{O}^{17} + {}_1\text{p}^1$
- $? + {}_0\text{n}^1 \rightarrow {}_{97}\text{Bk}^{249} + {}_{-1}\text{e}^0$
- ${}_1\text{H}^1 + {}_1\text{p}^1 \rightarrow {}_1\text{H}^2 + ?$
- ${}_{10}\text{Ne}^{20} + {}_{10}\text{Ne}^{20} \rightarrow {}_8\text{O}^{16} + ?$

2. (TFC – 2019 – INÉDITA)

Os núcleos a seguir são radioativos e podem emitir partículas alfa, beta ou pósitrons. Determine qual o tipo de partícula emitido e o nuclídeo resultante. Esse nuclídeo deve ser estável ou ainda sofrerá novos decaimentos?

- ${}_{109}\text{Mt}^{266}$
- ${}_{55}\text{Cs}^{140}$
- ${}_4\text{Be}^7$
- ${}_{92}\text{U}^{238}$
- ${}_{19}\text{K}^{40}$

3. (TFC – 2019 – INÉDITA)

Dados alguns isótopos radioativos, em qual núcleo estável termina a sua série radioativa?

- ${}_{97}\text{Bk}^{247}$
- ${}_{109}\text{Mt}^{266}$
- ${}_{107}\text{Bh}^{265}$

4. (TFC – INÉDITA)

Um tratamento para câncer utiliza radioisótopos que emitem radiações de alta energia, como a gama, ${}^0_0\gamma$, eficientes na destruição de células cancerosas que são mais susceptíveis à radiação, por se reproduzirem rapidamente. Entretanto, durante a terapia, é impossível evitar que células saudáveis também recebam parte da radiação.

Isso ocasiona diversos efeitos colaterais, entre eles: náusea, fadiga e perda de cabelos. A fonte de radiação é projetada para o uso das radiações gama, já que as radiações alfa, ${}_2\alpha^4$, e beta, ${}_{-1}\beta^0$, são menos penetrantes nos tecidos e nas células. Um dos radionuclídeos usados na radioterapia é o cobalto, ${}_{27}\text{Co}^{60}$.

Com base nas informações e nos conhecimentos sobre radioatividade,

- Explique por que as radiações gama possuem maior poder de penetração em relação às radiações alfa e beta.

b) Sabendo que o ${}_{27}\text{Co}^{60}$ sofre decaimento por meio de emissão de uma partícula beta, escreva a sua equação de decaimento e determine o nuclídeo resultante.

5. (TFC – 2019 – INÉDITA)

Determine a meia-vida de:

- Potássio-40, $k = 5,3 \cdot 10^{-10} \text{ anos}^{-1}$
- Cobalto-60, $k = 0,132 \text{ anos}^{-1}$
- Nobélio-255, $k = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

6. (TFC – 2019 – INÉDITA)

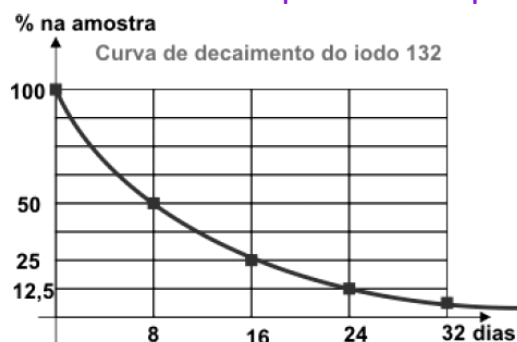
A atividade de uma fonte de estrôncio-90 é $3,29 \cdot 10^8 \text{ Bq}$. Sabendo que sua meia-vida é de 29 anos:

- Qual será a sua atividade após 50 anos?
- Determine a massa da amostra.

Dados: $\log 2 = 0,3$; $\log (3,29) = 0,517$; Número de Avogadro = $6 \cdot 10^{23}$.

7. (TFC – INÉDITA)

O iodo-132 sofre decaimento com liberação de partículas beta. De acordo com observações laboratoriais, traçou-se a seguinte curva de decaimento para o radioisótopo.



A análise da curva de decaimento revela que o iodo:

- sofre decaimento com emissão de partículas de carga positiva.
- estabiliza-se a partir de trinta e dois dias.
- possui meia-vida de oito dias.
- o seu tempo de meia-vida depende da quantidade inicial de iodo-132 presente na amostra.
- o seu tempo de meia-vida é crescente com a temperatura.

8. (TFC – INÉDITA)

Um dos maiores acidentes com o isótopo ${}^{137}\text{Cs}$ aconteceu em setembro de 1987, na cidade de Goiânia, Goiás, quando um aparelho de radioterapia desativado foi desmontado em um ferro velho. O desastre fez centenas de vítimas, todas contaminadas através de radiações emitidas por uma cápsula que continha ${}^{137}\text{Cs}$, sendo o maior acidente radioativo do Brasil e o maior ocorrido fora das usinas nucleares. O grande risco das emissões radioativas do cézio-137 é que, mesmo após vários anos, a atividade do material continua significativamente elevada. Considere que uma amostra radioativa tinha 32 g de ${}^{137}\text{Cs}$ e que o seu tempo de meia vida é 30 anos. Com base nessa informação, depois de quantos anos, teremos 1 g de ${}^{137}\text{Cs}$?

- 90
- 120
- 150
- 180
- 210

9. (TFC – 2019 – INÉDITA)

Complete as equações nucleares de fissão do plutônio-239.

- ${}_{94}\text{Pu}^{239} + {}_0\text{n}^1 \rightarrow {}_{42}\text{Mo}^{98} + {}_{52}\text{Te}^{138} + ?$
- ${}_{94}\text{Pu}^{239} + {}_0\text{n}^1 \rightarrow {}_{43}\text{Tc}^{100} + ? + 4 {}_0\text{n}^1$
- ${}_{94}\text{Pu}^{239} + {}_0\text{n}^1 \rightarrow {}_{49}\text{In}^{139} + ? + 3 {}_0\text{n}^1$

10. (ITA – 2020 – 2ª FASE)

A partir do isótopo ${}^x_y\text{A}$ ocorrem três processos sucessivos de decaimento radioativo que levam à formação do isótopo final D. A partir de ${}^x_y\text{A}$ há emissão de uma partícula beta, produzindo o nuclídeo B. Este, por sua vez, libera uma partícula beta formando o nuclídeo C. O nuclídeo D é produzido a partir de C por meio de emissão de uma partícula alfa. Escreva as equações nucleares dessas etapas, fornecendo os números de massa e atômico dos nuclídeos B, C e D em função de x e y. Esboce um gráfico da quantidade de cada nuclídeo em função do tempo até a produção de D e o consumo de todos os demais nuclídeos. Considere que a constante de velocidade é a mesma em todas as etapas.



11. (ITA – 2019 – 1ª FASE)

Sabe-se que um determinado nuclídeo, estável ou instável, em seu estado fundamental é designado por X e, em seu estado excitado, por X*. Considere o bombardeamento do átomo estável de cobalto no estado fundamental por um nêutron. O nuclídeo gerado por essa reação sofre três decaimentos radioativos consecutivos, liberando, respectivamente, uma partícula beta e 0,31 MeV de energia, uma partícula gama e 1,17 MeV de energia, e uma partícula gama e 1,33 MeV de energia. Com base nessas informações, assinale a opção que apresenta os nuclídeos formados em cada um dos três decaimentos, respectivamente:

- a) Co*, Co*, Co
- b) Co*, Co, Ni
- c) Co*, Ni*, Ni
- d) Ni*, Co*, Co
- e) Ni*, Ni*, Ni

12. (ITA – 2018)

Considere as seguintes proposições:

- I. Massa crítica representa a massa mínima de um nuclídeo físsil em um determinado volume necessária para manter uma reação em cadeia.
- II. Reações nucleares em cadeia referem-se a processos, nos quais elétrons liberados na fissão produzem nova fissão em, no mínimo, um outro núcleo.
- III. Os núcleos de ^{226}Ra podem sofrer decaimentos radioativos consecutivos até atingirem a massa de 206 (chumbo), adquirindo estabilidade.

Das proposições acima, está(ão) CORRETA(S):

- a) apenas I.
- b) apenas II.
- c) apenas III.
- d) apenas I e II.
- e) apenas I e III.

13. (ITA – 2016)

O tetraetilchumbo era adicionado à gasolina na maioria dos países até cerca de 1980.

a) O ^{238}U decai a ^{206}Pb com tempo de meia-vida de $4,5 \times 10^9$ anos. Uma amostra de sedimento colhida em 1970 continha 0,119 mg de ^{238}U e 2,163 mg de ^{206}Pb . Assumindo que todo o ^{206}Pb é formado somente pelo decaimento do ^{238}U e que o ^{206}Pb não sofre decaimento, estime a idade do sedimento.

b) Justifique o resultado obtido no item b) sabendo que a idade do Universo é de 13,7 bilhões de anos.

Dados: $\ln 2 = 0,693$; $\ln 22 = 3,091$

14. (ITA – 2016)

Assinale a opção que apresenta a afirmação ERRADA.

- a) O número de massa, A, de um isótopo é um número inteiro positivo adimensional que corresponde à soma do número de prótons e nêutrons no núcleo daquele isótopo.
- b) Massa atômica refere-se à massa de um único átomo, e é invariante para átomos de um mesmo isótopo. Quando medida em unidades padrão de massa atômica, ela nunca é um número inteiro, exceto para o ^{12}C .
- c) A soma do número de prótons e nêutrons em qualquer amostra de matéria cuja massa é exatamente 1 g vale exatamente 1 mol.
- d) A massa molar de um dado elemento químico pode variar em diferentes pontos do Sistema solar.
- e) Multiplicando-se a unidade padrão de massa atômica pela constante de Avogadro, obtém-se exatamente 1 g/mol.

15. (ITA – SP)

Em relação ao tempo de meia-vida do cézio-137, livre ou combinado, são feitas as afirmações abaixo. Observação: (tempo de meia-vida é o tempo necessário para que a metade dos átomos de cézio sofram desintegração radioativa).

- I_a – Ele decresce com o aumento da temperatura.
- I_b – Ele independe da temperatura.
- I_c – Ele cresce com o aumento da temperatura.
- II_a – Ele decresce com o aumento da pressão.
- II_b – Ele independe da pressão.
- II_c – Ele cresce com o aumento da pressão.
- III_a – Ele é o mesmo tanto no cézio elementar como em todos os compostos de cézio.
- III_b – Ele varia se são mudando os outros átomos ligados ao átomo de cézio.

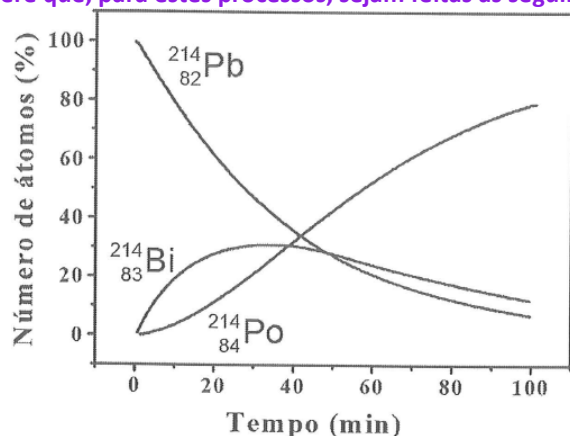
Dessas afirmações, são corretas:

- a) I_b; II_c; III_a.

- b) Ic; IIa; IIIa.
- c) Ia; IIb; IIIb.
- d) Ic; IIc; IIIb.
- e) Ib; IIb; IIIa.

16. (ITA – 2004)

O $^{214}_{82}\text{Pb}$ desintegra-se por emissão de partículas Beta, transformando-se em $^{214}_{83}\text{Bi}$ que, por sua vez, se desintegra também por emissão de partículas Beta, transformando-se em $^{214}_{84}\text{Po}$. A figura abaixo mostra como varia, com o tempo, o número de átomos, em porcentagem de partículas, envolvidos nestes processos de desintegração. Admita $\ln 2 = 0,69$. Considere que, para estes processos, sejam feitas as seguintes afirmações:



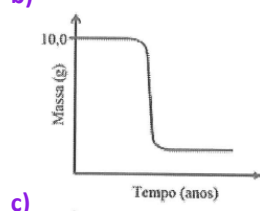
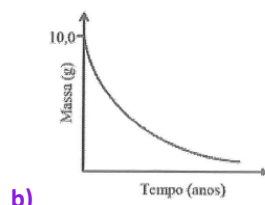
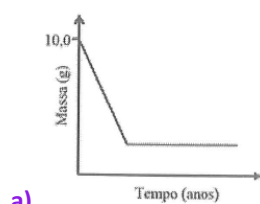
- I – O tempo de meia-vida do chumbo é de aproximadamente 27 min.
- II – A constante de velocidade da desintegração do chumbo é de aproximadamente $3 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$.
- III – A velocidade de formação de polônio é igual à velocidade de desintegração do bismuto.
- IV – O tempo de meia-vida do bismuto é maior que o do chumbo.
- V – A constante de velocidade de decaimento do bismuto é de aproximadamente $1 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$.

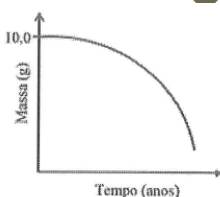
Das afirmações acima, estão CORRETAS

- a) apenas I, II e III.
- b) apenas I e IV.
- c) apenas II, III e V.
- d) apenas III e IV.
- e) apenas IV e V.

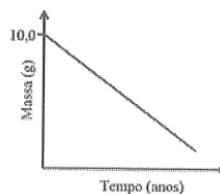
17. (ITA – 2009)

Qual o gráfico que apresenta a curva que melhor representa o decaimento de uma amostra contendo 10,0 g de um material radioativo ao longo dos anos?





d)



e)

18. (ITA – 2015)

O acidente nuclear ocorrido em Chernobyl (Ucrânia), em abril de 1986, provocou a emissão radioativa predominantemente de Iodo-131 e Césio-137. Assinale a opção CORRETA que melhor apresenta os respectivos períodos de tempo para que a radioatividade provocada por esses dois elementos radioativos decaia para 1% dos seus respectivos valores iniciais. Considere o tempo de meia-vida do Iodo-131 igual a 8,1 dias e do Césio-137 igual a 30 anos. Dados: $\ln 100 = 4,6$; $\ln 2 = 0,69$.

- a) 45 dias e 189 anos.
- b) 54 dias e 201 anos.
- c) 61 dias e 235 anos.
- d) 68 dias e 274 anos.
- e) 74 dias e 296 anos.

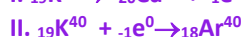
19. (ITA – 2015)

O elemento Plutônio-238 é utilizado para a geração de eletricidade em sondas espaciais. Fundamenta-se essa utilização porque esse isótopo tem

- a) longo tempo de meia-vida e é emissor de partículas beta.
- b) longo tempo de meia-vida e é emissor de partículas gama.
- c) longo tempo de meia-vida e é emissor de partículas alfa.
- d) longo tempo de meia-vida e é emissor de partículas delta.
- e) tempo de meia-vida curto e é emissor de partículas alfa.

20. (ITA – 2003)

O tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) do decaimento radioativo do potássio 40 ($^{40}_{19}\text{K}$) é igual a $1,27 \times 10^9$ anos. Seu decaimento envolve os dois processos representados pelas equações seguintes:



O processo representado pela equação I é responsável por 89,3 % do decaimento radioativo do $^{40}_{19}\text{K}$, enquanto que o representado pela equação II contribui com os 10,7 % restantes. Sabe-se, também, que a razão em massa de $^{40}_{18}\text{Ar}$ e $^{40}_{19}\text{K}$ pode ser utilizada para a datação de materiais geológicos. Determine a idade de uma rocha, cuja razão em massa de $^{40}_{18}\text{Ar}/^{40}_{19}\text{K}$ é igual a 0,95. Mostre os cálculos e raciocínios utilizados.

21. (TFC – INÉDITA)

A energia gerada pela fissão de 1 g de U-235 é igual a $8,0 \times 10^{10}$ J. Sabendo disso, quantas lâmpadas de 25 W podem ser mantidas acesas pelo período de 1 ano com a energia liberada na fissão de 1 g de U-235.

- a) 25
- b) 50
- c) 75
- d) 100
- e) 150

22. (TFC – 2019 – INÉDITA)

Um amostra de 30 g de cobalto foi mantida por 10 anos em um laboratório, onde sua atividade radioativa foi monitorada. Após passados os 10 anos, descobriu-se que a amostra continha 0,35g do radioisótopo cobalto-67. Sabendo que a meia-vida do cobalto-67 é 5 anos, qual era a percentagem em massa desse radioisótopo na amostra original?

23. (TFC – 2019 – INÉDITA)

Uma amostra recente de 1,00g de carbono mostra 900 desintegrações por hora, principalmente devidas ao isótopo 14, que possui meia-vida de 5730 anos. No estudo de um fóssil, foi recolhida uma amostra que continha aproximadamente 1,00g do fóssil que apresentava 6000 desintegrações em 24 horas, qual é a idade da amostra de carvão?

Dados: $\log 2 = 0,30$; $\log 3 = 0,48$.



6.1. Gabarito

1. a) ${}_2\text{He}^4$; b) ${}_{96}\text{Cm}^{248}$; c) ${}_{+1}\text{e}^0$; d) ${}_{12}\text{Mg}^{24}$
2. a) ${}_{107}\text{Bh}^{262}$; b) ${}_{56}\text{Ba}^{140}$; c) ${}_3\text{Li}^7$; d) ${}_{90}\text{Th}^{234}$; e) ${}_3\text{Be}^7$
3. a) chumbo-207; b) chumbo-206; c) bismuto-209
4. discursiva
5. a) $1,3 \cdot 10^9$ anos; b) 5,32 anos; c) 179 s
6. a) $1,3 \cdot 10^9$ anos; b) 5,32 anos; c) 179 s
7. C
8. C
9. a) 4 on^1 ; b) ${}_{51}\text{Sb}^{136}$; c) ${}_{45}\text{Rh}^{98}$
10. discursiva
11. E
12. E
13. b) 20 bilhões de anos; c) discursiva
14. C
15. E
16. A
17. B
18. B
19. C
20. 4,2 bilhões de anos
21. D
22. 4,7%
23. 4,7%

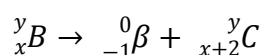
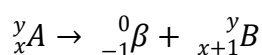
7. Lista de Questões Comentadas

10. (ITA – 2020 – 2ª Fase)

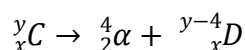
A partir do isótopo ${}_x^yA$ ocorrem três processos sucessivos de decaimento radioativo que levam à formação do isótopo final D. A partir de ${}_x^yA$ há emissão de uma partícula beta, produzindo o nuclídeo B. Este, por sua vez, libera uma partícula beta formando o nuclídeo C. O nuclídeo D é produzido a partir de C por meio de emissão de uma partícula alfa. Escreva as equações nucleares dessas etapas, fornecendo os números de massa e atômico dos nuclídeos B, C e D em função de x e y. Esboce um gráfico da quantidade de cada nuclídeo em função do tempo até a produção de D e o consumo de todos os demais nuclídeos. Considere que a constante de velocidade é a mesma em todas as etapas.

Comentários:

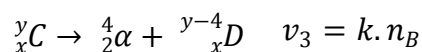
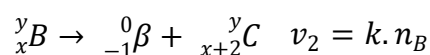
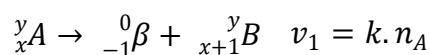
O decaimento por partícula beta provoca aumento do número atômico, mas preserva o número de massa.



A partícula alfa, por sua vez, corresponde ao núcleo do átomo de hélio, com número atômico igual a 2 e número de massa igual a 4.



Podemos escrever as velocidades de decaimento associadas a cada uma das reações.



Observe que o nuclídeo A é consumido na primeira etapa e que não é produzido em nenhuma outra. O nuclídeo B é produzido na primeira etapa e consumido na segunda. O nuclídeo C é produzido na segunda etapa e consumido na terceira. Por fim, o nuclídeo D é consumido na quarta etapa. Portanto, as taxas de variação nos seus números de mols são:

$$\frac{\Delta n_A}{\Delta t} = -k \cdot n_A$$



$$\frac{\Delta n_B}{\Delta t} = k \cdot n_A - k \cdot n_B$$

$$\frac{\Delta n_C}{\Delta t} = k \cdot n_B - k \cdot n_C$$

$$\frac{\Delta n_D}{\Delta t} = +k \cdot n_C$$

Portanto, o número de mols de A decresce exponencialmente. O número de mols de D é sempre crescente.

O nuclídeo B inicialmente terá uma alta taxa de produção. Mas, à medida que ele é produzido, sua taxa de consumo aumenta. É importante observar que o ponto de máximo no número de mols do nuclídeo B acontece em:

$$\frac{\Delta n_B}{\Delta t} = k \cdot n_A - k \cdot n_B = 0$$

$$\therefore k \cdot n_A - k \cdot n_B = 0$$

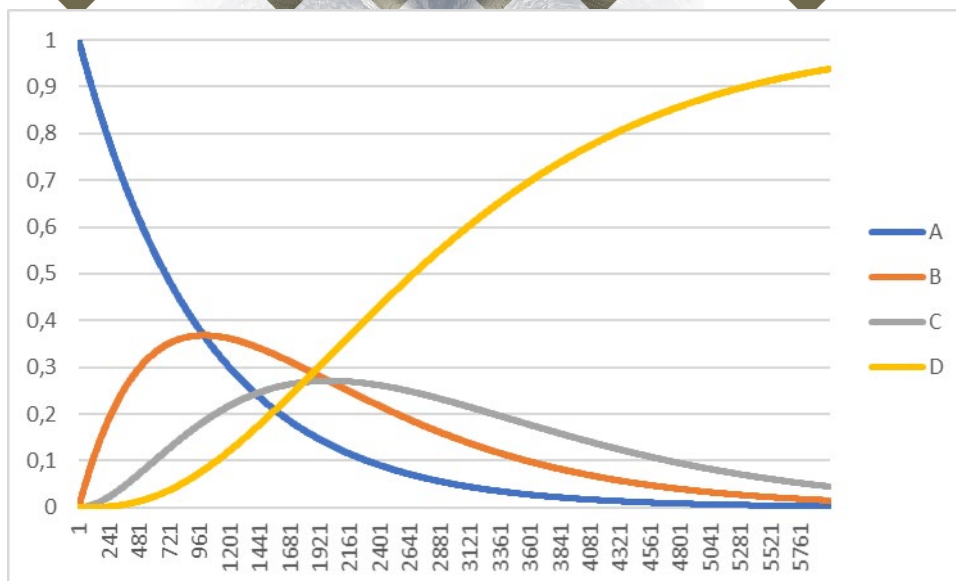
$$k \cdot n_A = k \cdot n_B$$

$$\therefore n_A = n_B$$

Portanto, o número de mols do nuclídeo B será máximo exatamente no ponto em que o número de mols de B se igualar ao número de mols de A. Podemos ver isso no gráfico.

A mesma situação acontecerá com C. O número de mols do nuclídeo C será máximo exatamente no ponto em que esse número se igualar ao número de mols do nuclídeo B.

Por fim, o nuclídeo D terá uma taxa de produção inicialmente muito lenta, pois haverá pouco do nuclídeo C. À medida que for aumenta a quantidade de nuclídeos C, a taxa de produção de D aumenta significativamente.



Esse gráfico foi construído com uma simulação computacional considerando $k = 1$ e variações de unidade de tempo equivalentes a $t = 0,01$.

Gabarito: discursiva

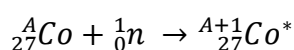
11. (ITA – 2019 – 1ª fase)

Sabe-se que um determinado nuclídeo, estável ou instável, em seu estado fundamental é designado por X e, em seu estado excitado, por X^* . Considere o bombardeamento do átomo estável de cobalto no estado fundamental por um nêutron. O nuclídeo gerado por essa reação sofre três decaimentos radioativos consecutivos, liberando, respectivamente, uma partícula beta e 0,31 MeV de energia, uma partícula gama e 1,17 MeV de energia, e uma partícula gama e 1,33 MeV de energia. Com base nessas informações, assinale a opção que apresenta os nuclídeos formados em cada um dos três decaimentos, respectivamente:

- a) Co^* , Co^* , Co
- b) Co^* , Co , Ni
- c) Co^* , Ni^* , Ni
- d) Ni^* , Co^* , Co
- e) Ni^* , Ni^* , Ni

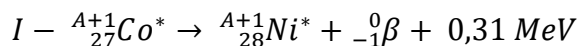
Comentários

Inicialmente, um átomo estável de cobalto é bombardeado por um nêutron, tornando-se um nuclídeo instável.



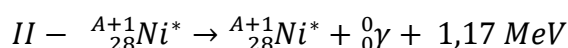
Muito cuidado, porque, até o presente momento, não houve nenhum decaimento. Houve apenas a formação de um nuclídeo instável. Por conta disso, não podemos marcar nenhuma das letras de “a” a “c”.

Esse nuclídeo sim é que irá sofrer decaimento. Primeiramente é liberada uma partícula beta.



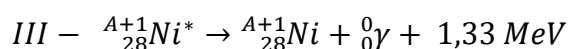
O nuclídeo de níquel formado nesse primeiro decaimento é instável, por isso, deve ser marcado. A prova de que o nuclídeo formado é instável é justamente que ele sofre outros decaimentos.

O segundo decaimento corresponde à emissão de partícula gama, que não altera nem o número atômico nem o número de massa do nuclídeo.



Como o nuclídeo formado também sofre um terceiro decaimento, ele é instável e deve ser marcado.

Esse terceiro decaimento também é de uma partícula gama, que, portanto, não altera nem o número atômico nem o número de massa. O nuclídeo resultante não sofre novos decaimentos, portanto, é um nuclídeo estável.



Diante do exposto, a sequência de nuclídeos formados nos três decaimentos é Ni*, Ni*, Ni. Não se pode marcar as alternativas com Co* porque esse elemento não foi formado em um decaimento radioativo, mas sim em um processo de excitação do átomo que foi anterior aos decaimentos.

Gabarito: E

12. (ITA – 2018)

Considere as seguintes proposições:

- I. Massa crítica representa a massa mínima de um nuclídeo físsil em um determinado volume necessária para manter uma reação em cadeia.
- II. Reações nucleares em cadeia referem-se a processos, nos quais elétrons liberados na fissão produzem nova fissão em, no mínimo, um outro núcleo.
- III. Os núcleos de ${}^{226}\text{Ra}$ podem sofrer decaimentos radioativos consecutivos até atingirem a massa de 206 (chumbo), adquirindo estabilidade.

Das proposições acima, está(ão) CORRETA(S):

- a) apenas I.
- b) apenas II.
- c) apenas III.



d) apenas I e II.

e) apenas I e III.

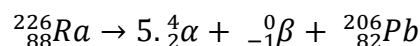
Comentários

Vamos analisar isoladamente cada uma das proposições.

I – Na fissão nuclear, a massa crítica é a mínima porção necessária para manter os nêutrons dentro do sistema reacional, evitando que eles escapem. Item correto.

II – Na fissão nuclear, nêutrons são liberados. São eles que colidem com os novos núcleos para provocar o encadeamento da reação.

III – O rádio-226 é radioativo e sofre desintegração até atingir um isótopo estável do chumbo. Note que a diferença de números de massa é igual a 20, que é múltiplo de 4. Portanto, foram feitas 5 emissões de partículas alfa para atingir o chumbo-206.



Vale ressaltar que o rádio possui mais de 25 isótopos diferentes, sendo apenas 4 encontrados na natureza, sendo o rádio-226 o mais comum e que possui o tempo de meia-vida mais longo (1600 anos). Esse isótopo é produto do decaimento do urânio-238.

Gabarito: E

13. (ITA – 2016)

O tetraetilchumbo era adicionado à gasolina na maioria dos países até cerca de 1980.

a) O ${}^{238}\text{U}$ decai a ${}^{206}\text{Pb}$ com tempo de meia-vida de $4,5 \times 10^9$ anos. Uma amostra de sedimento colhida em 1970 continha 0,119 mg de ${}^{238}\text{U}$ e 2,163 mg de ${}^{206}\text{Pb}$. Assumindo que todo o ${}^{206}\text{Pb}$ é formado somente pelo decaimento do ${}^{238}\text{U}$ e que o ${}^{206}\text{Pb}$ não sofre decaimento, estime a idade do sedimento.

b) Justifique o resultado obtido no item b) sabendo que a idade do Universo é de 13,7 bilhões de anos.

Dados: $\ln 2 = 0,693$; $\ln 22 = 3,091$

Comentários

Vamos calcular o número de mols presente de cada um dos isótopos de urânio-238 e chumbo-206 presentes na amostra. Para isso, consideraremos que o número de massa é aproximadamente igual à massa atômica.

$$n_U = \frac{0,119}{238} = 0,0005 \text{ mol}$$

$$n_{pb} = \frac{2,163}{206} \cong 0,0105 \text{ mol}$$

Supondo que o sedimento continha apenas urânio-238 no início de sua formação, o número de mols inicial desse isótopo presente é igual à soma do que restou com o que decaiu.

$$n_0 = 0,0005 + 0,0105 = 0,011$$

Aplicando a Equação de Decaimento Exponencial, temos:

$$n_U = n_0 \cdot e^{-kt}$$

$$0,0005 = 0,011 \cdot e^{-kt}$$

$$\therefore e^{-kt} = \frac{0,0005}{0,0110} = \frac{5}{110} = \frac{10}{220} = \frac{1}{22}$$

Tirando o logaritmo natural, temos:

$$kt = \ln(22) \therefore t = \frac{\ln(22)}{k}$$

Usando a relação entre constante de desintegração e tempo de meia-vida, temos:

$$k = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

$$k = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

Sendo assim, o tempo gasto

$$t = \frac{\ln(22)}{\frac{\ln(2)}{t_{1/2}}} = \frac{\ln(22)}{\ln(2)} \cdot t_{1/2} = \frac{3,091}{0,693} \cdot t_{1/2} = \frac{3,091}{0,693} \cdot 4,5 \cdot 10^9 \cong 20 \cdot 10^9 = 20 \text{ bilhões de anos}$$

Como o tempo decorrido foi superior à Idade do Universo, podemos concluir que a suposição inicial era falsa. Ou seja, nem todo o chumbo-206 presente no sedimento se originou do decaimento de urânio-238.

Gabarito: b) 20 bilhões de anos; c) discursiva

14. (ITA – 2016)

Assinale a opção que apresenta a afirmação ERRADA.

a) O número de massa, A, de um isótopo é um número inteiro positivo adimensional que corresponde à soma do número de protons e neutrons no núcleo daquele isótopo.



- b) Massa atômica refere-se à massa de um único átomo, e é invariante para átomos de um mesmo isótopo. Quando medida em unidades padrão de massa atômica, ela nunca é um número inteiro, exceto para o ^{12}C .
- c) A soma do número de prótons e nêutrons em qualquer amostra de matéria cuja massa é exatamente 1 g vale exatamente 1 mol.
- d) A massa molar de um dado elemento químico pode variar em diferentes pontos do Sistema solar.
- e) Multiplicando-se a unidade padrão de massa atômica pela constante de Avogadro, obtém-se exatamente 1 g/mol.

Comentários

Questão muito boa, totalmente dentro do estilo do ITA. Vamos analisar isoladamente cada uma das afirmativas.

a) Definição exata do número de massa. Como esse número é uma contagem, ele é, de fato, adimensional. Afirmativa correta.

b) Muito interessante. De fato, todos os átomos de um mesmo isótopo apresentam exatamente a mesma massa atômica. Afirmativa correta.

c) A massa dos prótons e dos nêutrons é ligeiramente diferente de 1 g/mol. Além disso, a massa de um núcleo é ligeiramente menor que a soma das massas dos prótons e dos nêutrons, o que se chama defeito de massa.

O defeito de massa é diferente em cada núcleo, portanto, 1 g de uma massa de matéria tem uma quantidade diferente de prótons e nêutrons. O número de prótons e nêutrons presentes só é exatamente igual a 1 mol no caso do ^{12}C . Afirmativa errada.

d) Muito interessante essa afirmativa. A massa do elemento químico é dada pela média ponderada das massas de seus isótopos. Como o teor de cada isótopo pode variar em diferentes pontos do Sistema Solar, então, a massa molar do elemento químico também pode variar.

Por exemplo, o Sol tem um teor de deutério diferente da Terra, pois lá acontece o processo de fusão nuclear com mais intensidade. Por exemplo, certamente, no Sol, a massa do hidrogênio é diferente da massa do hidrogênio na Terra. Portanto, uma afirmativa correta.

e) O número de Avogadro é a conversão entre unidade de massa atômica e o grama. De fato, basta multiplicar. Afirmativa correta.

Gabarito: C

**15. (ITA – SP)**

Em relação ao tempo de meia-vida do cézio-137, livre ou combinado, são feitas as afirmações abaixo. Observação: (tempo de meia-vida é o tempo necessário para que a metade dos átomos de cézio sofram desintegração radioativa).

I_a – Ele decresce com o aumento da temperatura.

I_b – Ele independe da temperatura.

I_c – Ele cresce com o aumento da temperatura.

II_a – Ele decresce com o aumento da pressão.

II_b – Ele independe da pressão.

II_c – Ele cresce com o aumento da pressão.

III_a – Ele é o mesmo tanto no cézio elementar como em todos os compostos de cézio.

III_b – Ele varia se são mudando os outros átomos ligados ao átomo de cézio.

Dessas afirmações, são corretas:

a) I_b; II_c; III_a.

b) I_c; II_a; III_a.

c) I_a; II_b; III_b.

d) I_c; II_c; III_b.

e) I_b; II_b; III_a.

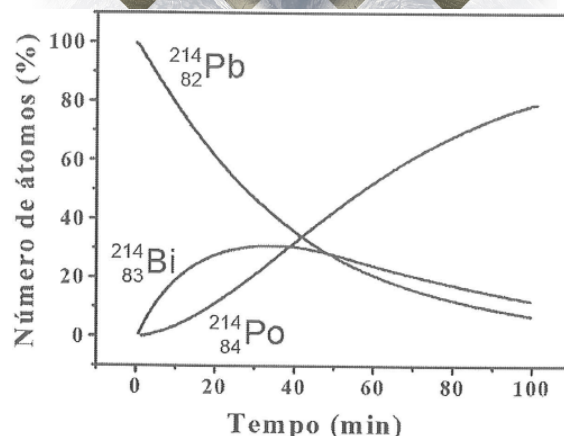
Comentários

Nessa questão, o aluno deve saber que a atividade radioativa independe dos fenômenos da eletrosfera, como temperatura, pressão e ligações químicas.

Portanto, o tempo de meia-vida independe da temperatura (I_b), independe da pressão (II_b) e é o mesmo tanto no cézio elementar como em todos os compostos do metal (III_a).

Gabarito: E**16. (ITA – 2004)**

O ${}_{82}\text{Pb}^{214}$ desintegra-se por emissão de partículas Beta, transformando-se em ${}_{83}\text{Pb}^{214}$ que, por sua vez, se desintegra também por emissão de partículas Beta, transformando-se em ${}_{84}\text{Po}^{214}$. A figura abaixo mostra como varia, com o tempo, o número de átomos, em porcentagem de partículas, envolvidos nestes processos de desintegração. Admita $\ln 2 = 0,69$. Considere que, para estes processos, sejam feitas as seguintes afirmações:



I – O tempo de meia-vida do chumbo é de aproximadamente 27 min.

II – A constante de velocidade da desintegração do chumbo é de aproximadamente $3 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$.

III – A velocidade de formação de polônio é igual à velocidade de desintegração do bismuto.

IV – O tempo de meia-vida do bismuto é maior que o do chumbo.

V – A constante de velocidade de decaimento do bismuto é de aproximadamente $1 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$.

Das afirmações acima, estão CORRETAS

a) apenas I, II e III.

b) apenas I e IV.

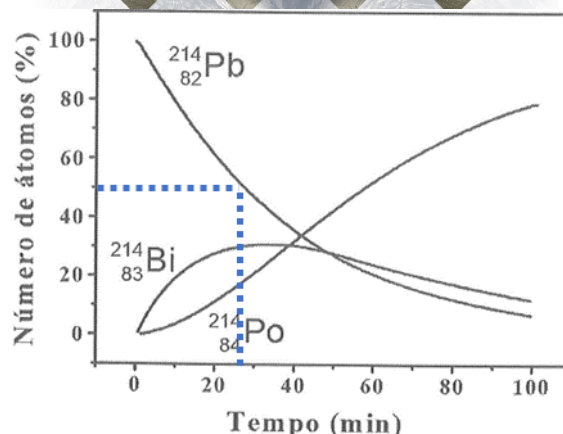
c) apenas II, III e V.

d) apenas III e IV.

e) apenas IV e V.

Comentários

I – O tempo de meia vida do chumbo-214 é o tempo necessário para que a quantidade de núcleos seja reduzida à metade. Podemos olhar no gráfico fornecido.



Pelo gráfico, o tempo de meia-vida do isótopo é ligeiramente inferior a 30 minutos, portanto, podemos assinalar correto nesse item.

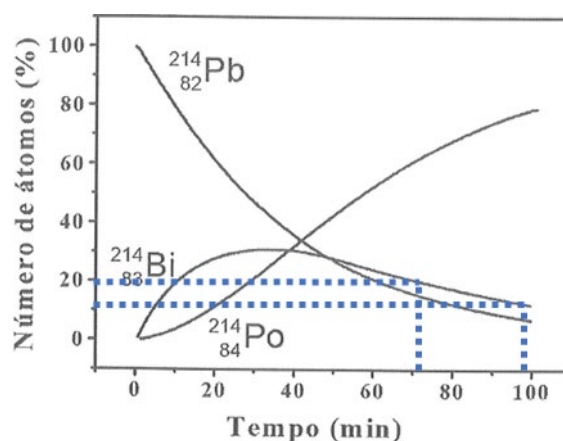
II – Usando o tempo de meia-vida obtido no item I, podemos calcular a constante de desintegração radioativa pela expressão:

$$k = \frac{0,693}{t_{1/2}} = \frac{0,693}{27} = 0,0257 \text{ min}^{-1} = 2,57 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1} \cong 3 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$$

Item correto.

III – Como todo o polônio-214 é formado a partir do bismuto-214, a velocidade de produção de um é igual à velocidade de desintegração do outro. Item correto.

IV – Para obter uma estimativa razoável do tempo de meia-vida do bismuto-214, devemos escolher uma região do gráfico em que a atividade do isótopo que o forma seja a menor possível. Portanto, olharemos para o final do gráfico. Vamos destacar uma região de aproximadamente 27 minutos no gráfico de decaimento do bismuto-214.



Observe que, no período de 27 minutos, o bismuto decaiu de 20% para aproximadamente 10%, ou seja, o seu tempo de meia-vida é aproximadamente o mesmo do chumbo. Portanto, o item IV está errado.

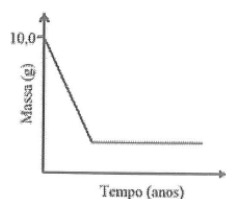
V – Como o tempo de meia-vida do bismuto é aproximadamente o mesmo do chumbo-214, então a sua constante de desintegração deve ser aproximadamente igual. Item errado.

Portanto, somente os itens I, II e III estão corretos.

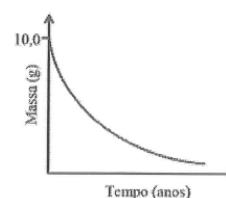
Gabarito: A

17. (ITA – 2009)

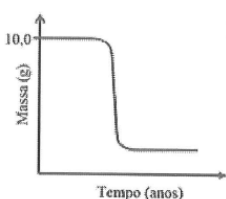
Qual o gráfico que apresenta a curva que melhor representa o decaimento de uma amostra contendo 10,0 g de um material radioativo ao longo dos anos?



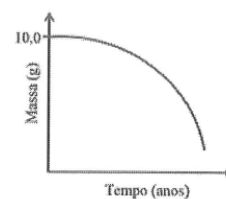
a)



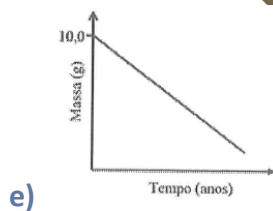
b)



c)



d)



Comentários

Questão muito direta. O decaimento da massa deve seguir o gráfico exponencial em um processo radioativo, exatamente como consta na letra B.

Gabarito: B

18. (ITA – 2015)

O acidente nuclear ocorrido em Chernobyl (Ucrânia), em abril de 1986, provocou a emissão radioativa predominantemente de Iodo-131 e Césio-137. Assinale a opção CORRETA que melhor apresenta os respectivos períodos de tempo para que a radioatividade provocada por esses dois elementos radioativos decaia para 1% dos seus respectivos valores iniciais. Considere o tempo de meia-vida do Iodo-131 igual a 8,1 dias e do Césio-137 igual a 30 anos. Dados: $\ln 100 = 4,6$; $\ln 2 = 0,69$.

- a) 45 dias e 189 anos.
- b) 54 dias e 201 anos.
- c) 61 dias e 235 anos.
- d) 68 dias e 274 anos.
- e) 74 dias e 296 anos.

Comentários

Devemos nos lembrar que a atividade radioativa decai exponencialmente com o tempo. Portanto, podemos escrever:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-kt}$$

$$A(t) = \frac{A_0}{100}$$

Substituindo, temos:

$$\frac{A_0}{100} = A_0 e^{-kt}$$

Simplificando a atividade inicial (A_0) de ambos os lados da equação, temos:

$$\frac{1}{100} = e^{-kt} \therefore e^{kt} = 100$$

Tomando o logaritmo natural de ambos os lados, temos:

$$kt = \ln 100 = 4,6$$

A constante de desintegração pode ser calculada em função do tempo de meia-vida:

$$\left(\frac{\ln 2}{t_{1/2}} \right) \cdot t = 4,6$$

$$\therefore t = \left(\frac{4,6}{\ln 2} \right) t_{1/2} = \left(\frac{4,6}{0,69} \right) t_{1/2} = \frac{460}{69} \cdot t_{1/2}$$

Observe que é possível simplificar por 23 a fração.

$$t = \frac{20}{3} \cdot t_{1/2}$$

Agora, basta substituir para cada elemento. Para o iodo-131, temos:

$$t_I = \frac{20}{3} \cdot 8,1 = \frac{162}{3} = 54 \text{ dias}$$

Para o cézio-137, cujo tempo de meia-vida é igual a 30 anos, temos:

$$t_{Cs} = \frac{20}{3} \cdot 30 = 20 \cdot 10 = 200 \text{ anos}$$

Gabarito: B

19. (ITA – 2015)

O elemento Plutônio-238 é utilizado para a geração de eletricidade em sondas espaciais. Fundamenta-se essa utilização porque esse isótopo tem

- a) longo tempo de meia-vida e é emissor de partículas beta.
- b) longo tempo de meia-vida e é emissor de partículas gama.
- c) longo tempo de meia-vida e é emissor de partículas alfa.
- d) longo tempo de meia-vida e é emissor de partículas delta.
- e) tempo de meia-vida curto e é emissor de partículas alfa.

Comentários

Acredito que essa questão pode trazer bastante confusão, mas você precisa se preparar para lidar com questões desse tipo. O polônio apresenta um núcleo muito grande, portanto, deve ser um emissor de partículas alfa.

Porém, você deve avaliar se ele possui um tempo de meia-vida curto ou longo. Note que, se o tempo de meia-vida for muito curto, rapidamente, a sua capacidade de gerar energia vai ser esgotada.

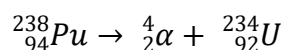
Por exemplo, é comum que alguns elementos transurânicos muito pesados apresentem tempo de meia-vida de alguns segundos. Se esse fosse o caso do polônio, em poucos minutos, sua capacidade de gerar energia teria sido esgotada.

Portanto, é preciso que o radioisótopo utilizado na geração de eletricidade apresente tempo de meia-vida relativamente longo. No caso, o plutônio-239 apresenta tempo de meia-vida de 87,7 anos.

Vale ressaltar que não existem as partículas delta, como escrito na letra D. O plutônio não é um emissor de partículas beta, mas sim de partículas alfa, como explicado na resolução, portanto, a letra A está errada.

É interessante o que foi afirmado na letra B, pois os raios gama acompanham a maioria dos decaimentos radioativos com intensa liberação de energia. A meu ver, poderia caber um recurso para considerar correto esse item, pois é justamente esses raios que são absorvidos na forma de energia pelas sondas especiais.

Porém, como técnica de resolver provas, o aluno deve identificar a emissão principal do plutônio, que é a partícula alfa, com objetivo de diminuir o tamanho do seu núcleo. Os raios gama são apenas acessórios e, por isso, não devem ser marcados.



Gabarito: C

20. (ITA – 2003)

O tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) do decaimento radioativo do potássio 40 (${}_{19}\text{K}^{40}$) é igual a $1,27 \times 10^9$ anos. Seu decaimento envolve os dois processos representados pelas equações seguintes:



O processo representado pela equação I é responsável por 89,3 % do decaimento radioativo do ${}_{19}\text{K}^{40}$, enquanto que o representado pela equação II contribui com os 10,7 % restantes. Sabe-se, também, que a razão em massa de ${}_{18}\text{Ar}^{40}$ e ${}_{19}\text{K}^{40}$ pode ser utilizada para a datação de materiais geológicos. Determine a idade de uma rocha, cuja razão em massa de ${}_{18}\text{Ar}^{40}/{}_{19}\text{K}^{40}$ é igual a 0,95. Mostre os cálculos e raciocínios utilizados.

Comentários

É interessante notar os tipos de decaimento sofridos pelo potássio-40. Esse isótopo pode tanto emitir como absorver um elétron. O segundo processo é conhecido como captura K.

A massa de potássio-40 presente na amostra é dada pela equação de decaimento exponencial.

$$n_K = n_0 \cdot e^{-kt}$$

Observe que essa foi a quantidade de mols de potássio-40 que restaram. A quantidade de mols que se transformaram é dada pela diferença entre o número de mols inicial e o final.

$$n_{\text{decaídos}} = n_0 - n_K = n_0 - n_0 e^{-kt} = n_0(1 - e^{-kt})$$

Desses átomos que decaíram, 10,7% se transformaram em argônio-40. Portanto, o número de mols desse isótopo é:

$$n_{Ar} = 0,107 \cdot n_{\text{decaídos}} = 0,107 \cdot n_0(1 - e^{-kt})$$

Portanto, a razão entre o número de mols de argônio e potássio é dada por:

$$\frac{n_{Ar}}{n_K} = \frac{0,107 \cdot n_0 \cdot (1 - e^{-kt})}{n_0 e^{-kt}} = 0,107 \cdot e^{kt}(1 - e^{-kt}) = 0,107 \cdot (e^{kt} - 1)$$

Considerando que a massa atômica é aproximadamente igual ao número de massa, como os dois isótopos possuem o mesmo número de massa, temos que a razão calculada acima é igual à razão de massas.

$$\frac{m_{Ar}}{m_K} = 0,107 \cdot (e^{kt} - 1) = 0,95$$

$$\therefore e^{kt} - 1 = \frac{0,95}{0,107} = 8,9 \therefore e^{kt} = 9,9$$

Infelizmente, a questão não forneceu uma tabela de logaritmos. Por isso, o aluno pode deixar em função do ln.

$$kt = \ln(9,9) \therefore t = \frac{\ln(9,9)}{k} = \frac{\ln(9,9)}{\ln 2} \cdot t_{1/2}$$

Aplicando a propriedade da mudança de base, temos:

$$t = \log_2(9,9) \cdot 1,27 \cdot 10^9 \text{ anos}$$

Como não foi fornecido nenhum logaritmo, esse era o máximo que você poderia fazer. Consultando o Excel, podemos obter que o logaritmo em questão é aproximadamente igual a 3,3.

$$t = 3,3 \cdot 1,27 \cdot 10^9 \cong 4,2 \text{ bilhões}$$

Obs.: Considero essa questão, no mínimo estranha. Como o argônio é gás, ele não ficaria preso na rocha, mas sim passaria para a atmosfera. Faria muito mais sentido que a rocha fosse datada pelo teor de cálcio-40 em relação ao potássio-40.

Nesse caso, teríamos outro problema, tendo em vista que o cálcio-40 é o isótopo mais estável do cálcio e é bastante comum que as rochas naturais apresentem cálcio na sua composição. Portanto, é pouco provável que todo o cálcio na rocha tenha se originado da decomposição do potássio-40.

Gabarito: 4,2 bilhões de anos

21. (TFC – Inédita)

A energia gerada pela fissão de 1 g de U-235 é igual a $8,0 \times 10^{10}$ J. Sabendo disso, quantas lâmpadas de 25 W podem ser mantidas acesas pelo período de 1 ano com a energia liberada na fissão de 1 g de U-235.

- a) 25
- b) 50
- c) 75
- d) 100
- e) 150

Comentários

Vamos calcular a quantidade de energia que uma lâmpada de 25W precisa para se manter acesa pelo período de 1 ano. Para isso, devemos lembrar que:

- 1 ano tem 365 dias;
- 1 dia tem 24 horas;
- 1 hora tem 60 minutos;
- 1 minuto tem 60 segundos.

$$E = Pt = 25.60.60.24.365 = 78840000 \cong 7,9.10^8 J$$

A energia liberada na fusão nuclear do urânio-235 é igual a 8.10^{10} g. Essa energia é suficiente para manter acesas um total de:

$$N = \frac{8.10^{10}}{7,9.10^8} \cong 101$$

Gabarito: D

22. (TFC – 2019 – Inédita)

Um amostra de 30 g de cobalto foi mantida por 10 anos em um laboratório, onde sua atividade radioativa foi monitorada. Após passados os 10 anos, descobriu-se que a amostra continha 0,35g do radioisótopo cobalto-67. Sabendo que a meia-vida do cobalto-67 é 5 anos, qual era a percentagem em massa desse radioisótopo na amostra original?

Comentários

Primeiramente, vamos escrever que a massa decai exponencialmente em um processo radioativo.

$$m = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

Podemos passar a potência para o outro lado, invertendo numerador e denominador.

$$m_0 = m \cdot 2^{+t/t_{1/2}} = 0,35 \cdot 2^{10/5} = 0,35 \cdot 4 = 1,4 \text{ g}$$

$$m_0 = 1,4 \text{ g}$$

Chegamos à conclusão que a amostra inicial continha 1,4 g de cobalto-60. Portanto, a fração do radioisótopo na mistura é:

$$\tau = \frac{\text{porção de } ^{60}\text{Co}}{\text{massa total da amostra}} = \frac{1,4}{30} = 0,047 \cong 4,7\%$$

Gabarito: 4,7%

23. (TFC – 2019 – Inédita)

Uma amostra recente de 1,00g de carbono mostra 900 desintegrações por hora, principalmente devidas ao isótopo 14, que possui meia-vida de 5730 anos. No estudo de um fóssil, foi recolhida uma amostra que continha aproximadamente 1,00g do fóssil que apresentava 6000 desintegrações em 24 horas, qual é a idade da amostra de carvão?

Dados: $\log 2 = 0,30$; $\log 3 = 0,48$.

Comentários

O processo de datação por ^{14}C pressupõe que o teor desse isótopo na Terra sempre foi constante. A atividade radioativa desse isótopo decai exponencialmente com o tempo.

Uma amostra recente de fóssil sofre as 900 desintegrações por hora (dph). Por outro lado, a atividade radioativa da amostra de fóssil é:

$$A(t) = \frac{6000}{24} = 250 \text{ dph}$$

Agora, devemos utilizar o fato de que a atividade radioativa decai exponencialmente com o tempo. Considerando que a atividade inicial da amostra era exatamente igual à atividade de uma amostra recente, que foi de 900 dph, temos que:

$$\begin{aligned} A_{tv}(t) &= A_{tv_0} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_1}} \\ \therefore 250 &= 900 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5730}} \\ \therefore \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5730}} &= \frac{250}{900} = \frac{25}{90} \\ \therefore 2^{t/5730} &= \frac{90}{25} = 3,6 \end{aligned}$$

Podemos tirar o logaritmo na base 2

$$\therefore \frac{t}{5730} = \log_2(3,6)$$

Usando a propriedade da mudança de base.

$$\frac{t}{5730} = \frac{\log(3,6)}{\log 2}$$

Agora, vamos usar mais algumas propriedades do logaritmo para calcular os logaritmos necessários.

$$\frac{t}{5730} = \frac{\log\left(\frac{36}{10}\right)}{\log 2} = \frac{\log(36) - \log(10)}{\log 2} = \frac{\log(36) - 1}{\log 2}$$

Agora, podemos observar que $36 = 4 \cdot 9 = 2^2 \cdot 3^2$, podemos fatorar esse número.

$$\frac{t}{5730} = \frac{\log(4 \cdot 9) - 1}{\log 2} = \frac{\log(4) + \log(9) - 1}{\log 2} = \frac{2 \log(2) + 2 \log(3) - 1}{\log 2} = \frac{2 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,48 - 1}{0,3}$$

$$\frac{t}{5730} = \frac{0,6 + 0,96 - 1}{0,3} = \frac{0,56}{0,3} \cong 1,87$$

$$\therefore t = 5730 \cdot 1,87 \cong 10700 \text{ anos}$$

Gabarito: 4,7%