

# 02 – Radioatividade

*IME – 2021*

Autor:  
Prof. Thiago Cardoso

*Aula 03*

# Sumário

<b>Apresentação da Aula</b> .....	<b>3</b>
<i>Radioatividade nas Provas do ITA/IME</i> .....	4
<b>1. Estrutura do Núcleo</b> .....	<b>5</b>
1.1. <i>Raio Nuclear</i> .....	5
1.2. <i>Composição de Prótons e Nêutrons</i> .....	7
1.3. <i>Forças Nucleares</i> .....	8
<b>2. Estabilidade Nuclear</b> .....	<b>10</b>
2.1. <i>Razão N/P</i> .....	11
2.2. <i>Defeito de Massa</i> .....	13
2.2.1. <i>Cálculo da Velocidade da luz MeV/u</i> .....	15
2.3. <i>Ilhas de Estabilidade</i> .....	16
<b>3. Equações Nucleares</b> .....	<b>18</b>
3.1. <i>Conservação da Carga</i> .....	19
3.2. <i>Conservação do Número de Massa</i> .....	20
<b>3. Decaimentos Radioativos</b> .....	<b>22</b>
4.1. <i>Emissão de Partículas Alfa</i> .....	25
4.2. <i>Emissão de Partículas Beta</i> .....	27
4.3. <i>Isomerização</i> .....	28
4.4. <i>Emissão de Pósitrons</i> .....	31
4.5. <i>Captura K</i> .....	32
4.6. <i>Séries Radioativas</i> .....	34
<b>5. Cinética das Emissões Radioativas</b> .....	<b>43</b>
5.1. <i>Constante de Decaimento</i> .....	44
5.2. <i>Tempo de Meia-Vida</i> .....	45
5.2.1. <i>Relação entre o Tempo de Meia-Vida e a Constante de Decaimento</i> .....	51
5.2.2. <i>Interpretações do Tempo de Meia-Vida</i> .....	53
5.2.3. <i>Equação de Decaimento em Função do Tempo de Meia-Vida</i> .....	56



5.3. Dose de Radiação Letal ao Ser Humano .....	56
5.4. Demonstrações das Equações.....	58
<b>6. Fissão e Fusão Nuclear .....</b>	<b>69</b>
6.1. Fissão Nuclear .....	69
6.1.1. Reação em Cadeia .....	72
6.1.2. Nuclídeos Formados .....	74
6.1.3. Velocidade dos Nêutrons.....	75
6.1.4. Enriquecimento do Urânio .....	77
6.2. Fusão Nuclear.....	79
<b>7. Lista de Questões Propostas .....</b>	<b>84</b>
<b>8. Gabarito.....</b>	<b>104</b>
<b>9. Lista de Questões Comentadas .....</b>	<b>105</b>

## Apresentação da Aula

Olá, Alunos, sejam bem-vindos a mais uma aula de Química. Nessa aula, vamos falar sobre o Núcleo Atômico, com foco especial na Radioatividade.

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.

A Radioatividade foi observada pela primeira vez pelo francês Henri Becquerel em 1896 quando estudava sobre a possibilidade de o sol provocar a emissão de raios X pelos cristais.

Ele colocava cristais de urânio perto de placas fotográficas envoltas em um papel escuro, tendo uma tela composta de fios de cobre entre os dois. Becquerel percebeu que havia uma impressão da tela de cobre. Porém, se tal fenômeno fosse causado pela luz solar, os raios X deveriam penetrar no papel escuro, e não nos fios de cobre da tela.



Sua conclusão foi a de que a radiação emitida pelo cristal de urânio não havia sido provocada pelo Sol, mas sim por alguma propriedade desse cristal. Para averiguar isso, Becquerel repetiu a experiência colocando o cristal e a placa fotográfica dentro de uma caixa blindada. Ao obter o mesmo resultado, ele concluiu que sua hipótese a respeito da radiação do urânio estava correta.

O termo Radioatividade foi dado pelo casal Marie e Pierre Curie, que descobriram elementos que liberavam partículas beta (elétrons), como o rádio (Ra). Observando que a radiação emitida por esse elemento era maior que a do urânio, batizaram o fenômeno de Radioatividade.

## Radioatividade nas Provas do ITA

Radioatividade é um assunto de média incidência nas provas do IME.

O IME adota perfis de questões bem diferentes na primeira e na segunda fase. Na primeira fase, temos vistos muitas questões teóricas. Portanto, o aluno deve estar atento às definições. Já na segunda fase, geralmente, vemos questões que envolvem trabalho algébrico – como é característica dessa instituição.

O seu foco nesse material deve ser a parte final, sobre os tipos de decaimento e a cinética das emissões radioativas. A parte inicial sobre Estrutura do Núcleo foi apresentada, pois envolve conhecimentos que podem vir a ser cobrados por um examinador que queira aprofundar no assunto, e também podem saciar a curiosidade do aluno em aprender mais sobre a estrutura do núcleo.

Esse assunto não serve de base para outros. No entanto, esse conteúdo é relativamente fácil, portanto, é um tema de bom custo-benefício. Vale muito a pena o esforço de ler esse material, pois você terá provavelmente uma questão ganha na sua prova.

O seu foco nesse material deve ser a parte final, sobre os tipos de decaimento e a cinética das emissões radioativas. A parte inicial sobre Estrutura do Núcleo foi apresentada, pois envolve conhecimentos que podem vir a ser cobrados por um examinador que queira aprofundar no assunto, e também podem saciar a curiosidade do aluno em aprender mais sobre a estrutura do núcleo.



# 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.

Convém ressaltar que esse assunto nunca foi cobrado pelas provas do ITA e IME. Porém, como está presente em qualquer livro de Ensino Médio, não seria absolutamente nenhuma surpresa se viesse a ser.

Nessa seção, vamos explorar o que, na minha visão, faz mais sentido de vir a ser cobrado em uma eventual questão de prova sobre o assunto.

Caso você esteja com pressa, você pode pular essa seção. Porém, é bastante recomendável que você a leia, tendo em vista que as provas do ITA e IME são **bastante inovadoras**.

## 1.1. Raio Nuclear

O núcleo corresponde a uma porção muito pequena do átomo, mas que concentra a maior parte de sua massa.

O átomo de oxigênio, por exemplo, tem raio de 60 pm, mas o seu núcleo tem raio de apenas 2 fm ( $2 \times 10^{-15}$  m). Os raios nucleares são descritos em **fermi** ou **fentômetro** (fm), unidade muito pequena que é definida por  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ .

A título de comparação, se o núcleo atômico fosse do tamanho de 2 cm – uma moeda –, o átomo teria a dimensão de 600 metros.



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.

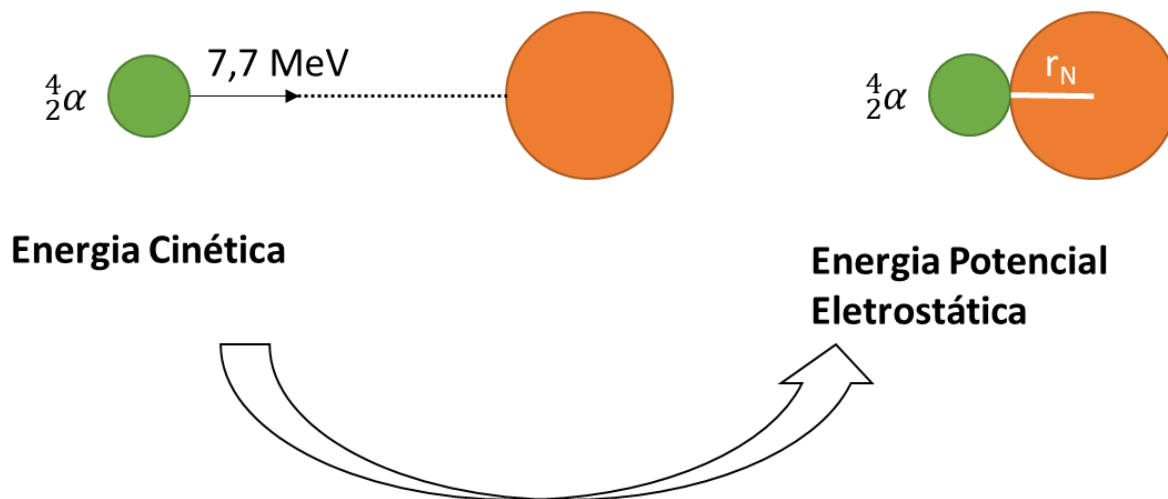


Figura 1: Aplicação da Conservação da Energia na Determinação das Distâncias Nucleares

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 ( $Z = 79$ ).

$$r_n = \frac{2.9 \cdot 10^9 \cdot 79 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{1,2 \cdot 10^{-12}} = \frac{2.9 \cdot 79 \cdot (1,6)^2}{1,2} \cdot 10^{9-2 \cdot 19+12} \cong 3000 \cdot 10^{-17} = 3 \cdot 10^{-14} m = 30 \text{ fm}$$

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

O raio nuclear é de ordem de grandeza próxima dos valores obtidos atualmente, que variam de 0,88 fm para o átomo de hidrogênio a 5,8 fm para o urânio-238. Essas dimensões são muito inferiores às do menor átomo conhecido, que é o próprio átomo de hidrogênio, cujo raio é aproximadamente 53 pm.

A densidade dos núcleos estáveis é praticamente constante. Sendo assim, podemos dizer que o volume do núcleo é aproximadamente proporcional ao seu número de massa.

$$V = kA$$

Considerando que o núcleo é praticamente uma esfera, o seu raio é proporcional ao cubo do raio nuclear. Dessa forma, o raio nuclear é proporcional à raiz cúbica do número de massa.

$$r_N = kA^{1/3}$$

Esse é um resultado que pode ser utilizado para estimar os raios de diversos núcleos.

## 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**.

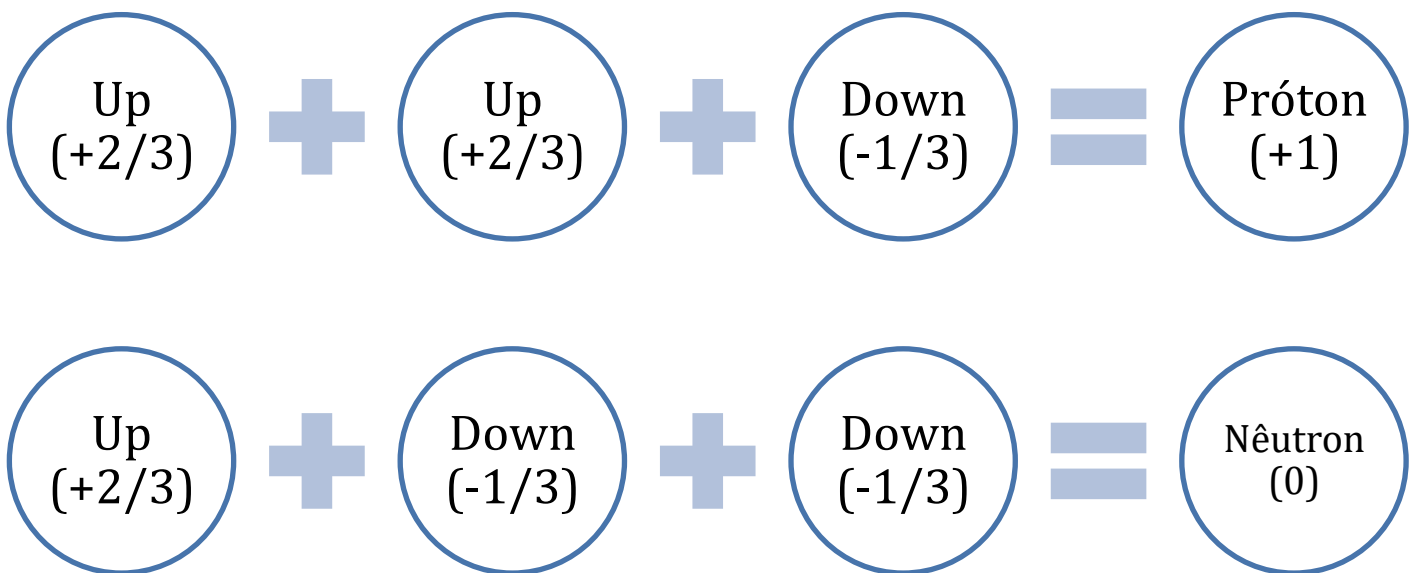


Figura 2: Composição dos Prótons e Nêutrons

Os quarks são unidos pela conhecida **Força Nuclear Forte**, que é uma das forças fundamentais da natureza. Essas forças são intermediadas pelos glúons.

O interior dos nucleons contém uma gama bem diversa de partículas, cujo estudo mais detalhado encontra-se fora do escopo desse curso, já que interessa ao ramo da Física de Partículas. A meu ver, é suficiente para a sua prova saber os quarks que compõem os prótons e nêutrons.

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.



Até o momento, acredita-se que não é possível observar quarks isolados. Segundo a doutrina de Robby Fritsch, uma vez que eles sejam separados de uma pequena distância, a força de atração entre eles atinge a magnitude suficiente para erguer o peso de uma tonelada. [1]

Essa força é tão grande comparativamente ao tamanho dos quarks que a energia necessária para separá-los é suficiente para criar um novo par de quarks.

### 1.3. Forças Nucleares

O núcleo é formado basicamente por:



- **Prótons:** partículas com carga positiva e massa, que podem ser representadas por  ${}^1_1p$ ;
- **Nêutrons:** partículas sem carga e com massa, que podem ser representadas por  ${}^1_0n$ ;

Genericamente, os prótons e nêutrons são chamados de **nucleons**.

Os prótons são todos de carga positiva. Sendo assim, em qualquer núcleo que tenha dois ou mais prótons, haverá repulsão eletrostática entre essas partículas.

Em um núcleo estável, deve haver algum tipo de força de atração entre os prótons e nêutrons que seja capaz de equilibrar essa repulsão. Caso contrário, o núcleo se partiria espontaneamente.

É importante destacar que as forças de atração no interior do núcleo não podem ter natureza eletrostática, já que não existem partículas com cargas de sinais opostas nessa região.

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- $\pi$  (ou múon), que possui três versões com cargas diferentes:  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  e  $\pi^0$ .

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

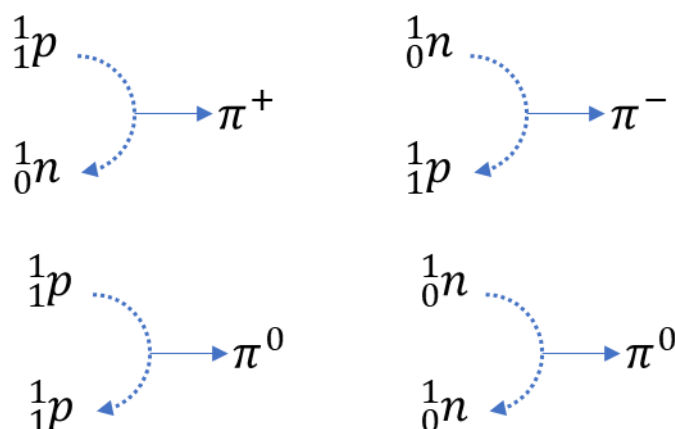


Figura 3: Mésons envolvidos na transmutação entre núcleos atômicos

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

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

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



Antigamente, a interação entre prótons e nêutrons era entendida como a força nuclear forte devido a essa formação de mésons opostos. Porém, essa hipótese foi superada.

A teoria mais moderna é que a força nuclear forte une os quarks, que são as partículas que compõem os prótons e nêutrons, dentro desses nucleons. Muito cuidado com isso na hora da prova.

Aualmente, vigora a teoria de que as forças nucleares entre próton-próton, próton-nêutron e nêutron-nêutron são da mesma ordem de grandeza.

## 2. Estabilidade Nuclear

Entre dois prótons, existe sempre a força de repulsão de natureza eletrostática que tende a partir o núcleo.

Em contrapartida, existem as forças nucleares de atração entre próton-próton, próton-nêutron e nêutron-nêutron. Porém, essas forças possuem um alcance muito pequeno de cerca de 2-3 fm.

Devido a essa limitação de alcance, os núcleos maiores tendem a ser instáveis. Não se conhecem elementos estáveis com número atômico maior que o urânio ( $Z = 92$ ). Todos os elementos acima desse número atômico são artificiais, conhecidos como transurânicos.

Existem também outros elementos artificiais, de número atômico menor que o do urânio, conhecidos como cisurânicos, que são o tecnécio ( $Z = 43$ ) e o promécio ( $Z = 61$ ).

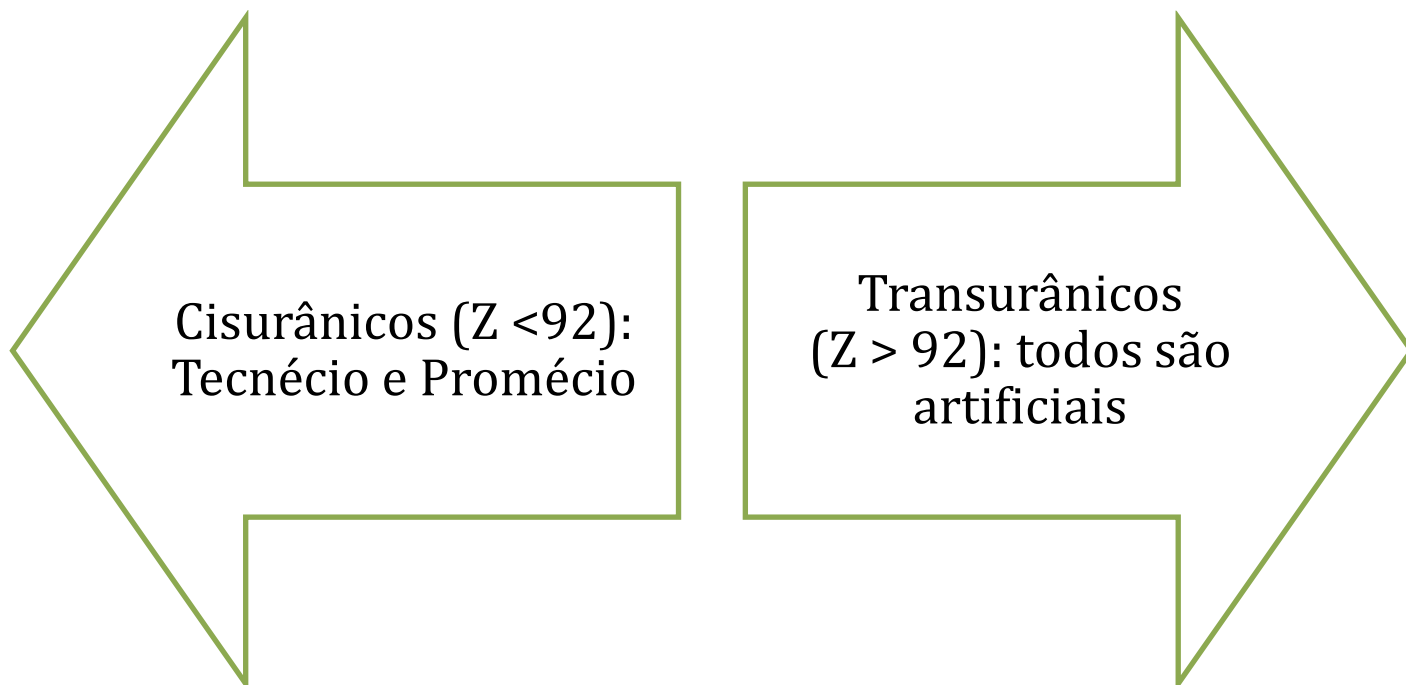


Figura 4: Elementos Químicos Artificiais

Hoje em dia, a teoria mais pesquisada a respeito da estabilidade nuclear é a teoria de camadas, semelhante ao que acontece com os elétrons em torno do núcleo.

## 2.1. Razão N/P

O núcleo do hidrogênio leve (prótio ou hidrogênio-1) é o único núcleo formado por apenas um único nucleon  ${}^1_1H$ . 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.

Em todos os demais núcleos, existem interações entre prótons e nêutrons. Nos demais elementos químicos, sempre existe repulsão entre os prótons.

Essa repulsão é suavizada pela presença dos nêutrons. Portanto, a estabilidade de um núcleo depende do número de prótons e de nêutrons presentes.

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.

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

${}^1_1\text{H}$																			${}^2_2\text{He}$
${}^4_3\text{Li}$	${}^5_4\text{Be}$									${}^6_5\text{B}$	${}^6_6\text{C}$	${}^7_7\text{N}$	${}^8_8\text{O}$	${}^{10}_9\text{F}$	${}^{10}_{10}\text{Ne}$				
${}^{12}_{11}\text{Na}$	${}^{12}_{12}\text{Mg}$									${}^{14}_{13}\text{Al}$	${}^{14}_{14}\text{Si}$	${}^{16}_{15}\text{P}$	${}^{16}_{16}\text{S}$	${}^{18}_{17}\text{Cl}$	${}^{22}_{18}\text{Ar}$				
${}^{20}_{19}\text{K}$	${}^{20}_{20}\text{Ca}$																		

Dessa maneira, os isótopos mais estáveis dos primeiros elementos da Tabela Periódica apresentam a razão N/P igual a aproximadamente 1.

Uma observação interessante é que é muito raro que um núcleo seja estável com número de prótons e nêutrons simultaneamente ímpares. O nitrogênio-14, que possui 7 prótons e 7 nêutrons, um dos raros casos.

À medida que o número atômico do elemento cresce, a razão N/P começa a ficar significativamente mais alta.

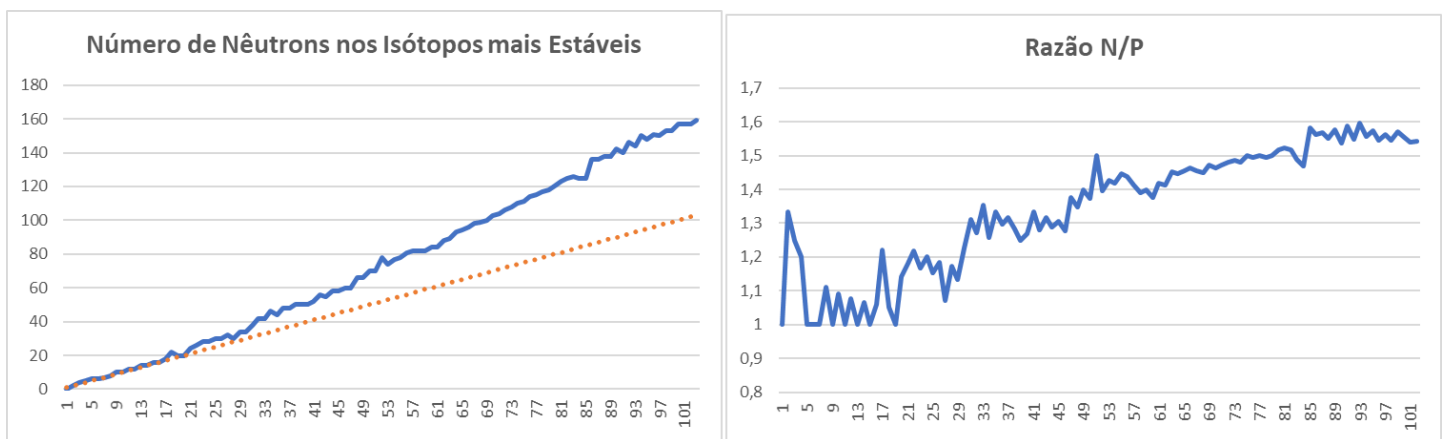


Figura 5: Relações entre Número de Prótons e Número de Nêutrons nos Isótopos mais estáveis de cada elemento

## 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.

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.

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

Somente em 20 de novembro de 2008, uma equipe internacional de físicos do Centro de Física Teórica de Marselha, com o auxílio do supercomputador Blue Gene, confirmou experimentalmente pela primeira vez que a massa do próton provém da energia liberada por quarks e glúons. Essa foi a primeira comprovação prática da relação entre massa e energia, conforme havia sido teorizado por Einstein mais de cem anos antes.

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.

$$m_p = 1,007825 u$$

$$m_N = 1,008665 u$$

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

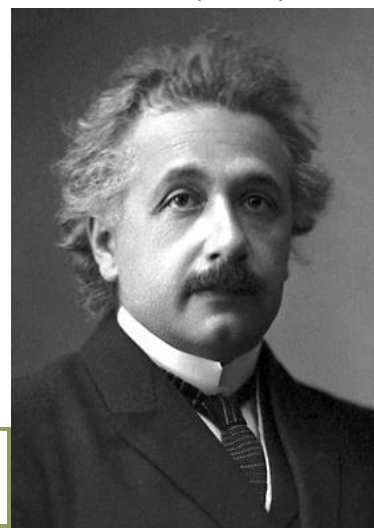


Figura 6: Albert Einstein  
(fonte: [2])

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

$$m' = 2.1,007825 + 2.1,008665 = 2,015650 + 2,017330 = 4,032980 u$$

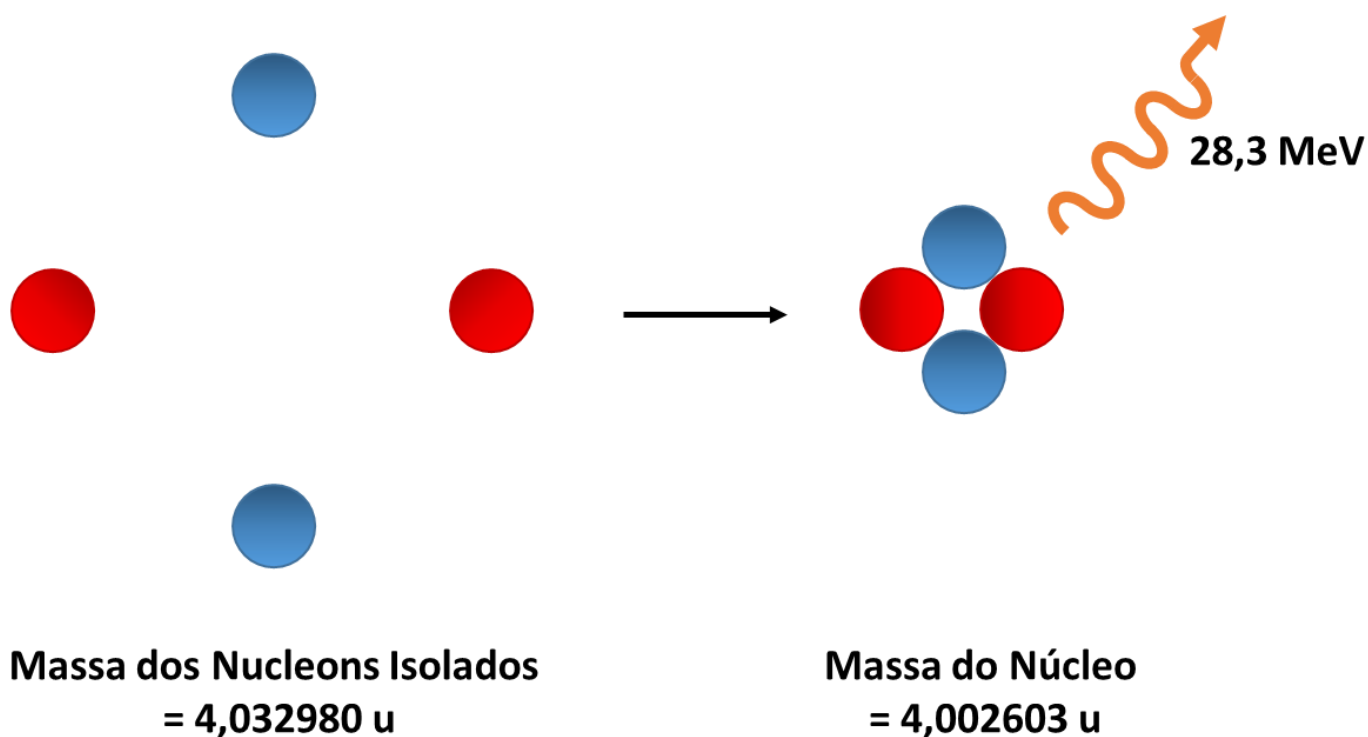
Perceba, portanto, que, ao ser formado o núcleo do átomo de hélio, ocorre uma redução de massa que pode ser calculada pela diferença entre as somas das massas dos prótons e nêutrons e a massa total do núcleo.

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

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

$$E = \Delta m c^2 = 0,030377.931,5 \cong 28,3 \text{ MeV}$$

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



*Figura 7: Formação do Núcleo de Hélio e Energia de Ligação Envolvida*

Para quebrar o núcleo de hélio-4, seria necessário fornecer exatamente essa energia 28,3 MeV.

Essa energia é muito alta em relação a praticamente todos os processos que ocorrem na eletrosfera. Por exemplo, a energia de ionização do hélio é 24,6 eV – energia necessária para remover completamente um de seus elétrons.



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.**

Pelo mesmo motivo, as propriedades radioativas do núcleo de um átomo não são influenciadas pela sua eletrosfera. Sendo assim, pouco importa se o átomo está formando um composto ou se está isolado, ele fará suas emissões radioativas exatamente da mesma forma.

A propriedade da eletrosfera mais intrigante é **a temperatura**. A temperatura mede o grau de agitação térmica das partículas. Em temperaturas inferiores a milhões de graus Celsius, a agitação térmica não afeta o núcleo, apenas a distância entre duas moléculas ou átomos e suas interações intermoleculares.

Sendo assim, **a radioatividade não é influenciada pela temperatura.**

Pouco importa, inclusive, o estado físico do elemento. Por exemplo, a emissão radioativa do urânio-235 presente em uma amostra de  $U_2O_3$ , que é sólido, e em outra amostra de  $UF_6$ , que é gasoso, **é exatamente igual.**

### 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. Po

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

O Joule, unidade do SI de energia é  $1 J = 1 kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$ . Dessa maneira, podemos converter a unidade do quadrado da velocidade.



$$c^2 = 9.10^{16} m^2 \cdot s^{-2} = 8,998.10^{16} \frac{J}{kg}$$

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

$$c^2 = 8,998.10^{16} \frac{J}{kg} = 8,998.10^{16} \frac{J}{10^3 g} = 8,998.10^{13} J/g$$

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

$$1 u = 1 \frac{g}{mol} \therefore 1g = 1u \cdot 1mol = 6,02.10^{23}u$$

Basta, portanto, substituir:

$$c^2 = \frac{8,998.10^{13} J}{g} = \frac{8,998.10^{13} J}{6,02.10^{23} u} = 1,493.10^{-10} J/u$$

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

$$1 eV = 1,602.10^{-19} J \therefore 1J = \frac{1eV}{1,6.10^{-19}}$$

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

$$c^2 = \frac{1,5.10^{-10} J}{u} = \frac{1,493.10^{-10} \cdot 1 eV}{1,602.10^{-19} u} = 0,9319.10^9 \frac{eV}{u} = \frac{931,9.10^6 eV}{u} = 931,9 \text{ MeV}/u$$

Chegamos bem próximos do valor tabelado. Para calcular exatamente 931,5 MeV/u, basta utilizar valores mais precisos para a velocidade da luz no vácuo, para o número de Avogadro e para a carga eletrônica fundamental. No entanto, considero que tanto preciosismo não se faria necessário nesse curso e atrapalharia mais o seu entendimento do que traria alguma informação relevante.

### 2.3. Ilhas de Estabilidade

Sabemos que os gases nobres são os únicos elementos que possuem eletrosferas estáveis e, por isso, são os únicos que se apresentam na forma de substâncias simples monoatômicas. Todos os demais elementos precisam se combinar por meio de alguma ligação química para formar uma substância mais estável.

O número de elétrons dos gases nobres é referenciado como **um número mágico**. É como se os átomos que tivessem essa quantidade de elétrons seja particularmente estável.





Tabela 3: Configurações Eletrônicas dos Gases Nobres

Elemento	Número Mágico	Configuração Eletrônica do Último Nível
Hélio	2	$1s^2$
Neônio	10	$2s^2 2p^6$
Argônio	18	$3s^2 3p^6$
Criptônio	36	$4s^2 4p^6$
Xenônio	54	$5s^2 5p^6$
Radônio	86	$6s^2 6p^6$

Os números de elétrons 2, 10, 18, 36, 54 e 86 são os números mágicos da eletrosfera. Átomos que possuem essa quantidade de elétrons seriam particularmente estáveis. Nesse caso, os gases nobres possuem a sua última camada preenchida exatamente  $ns^2 np^6$ , exceto o hélio.

Acredita-se que o núcleo deve ter algum tipo de distribuição de camadas de prótons e nêutrons que faz que algumas quantidades de nucleons o tornem particularmente estáveis.

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

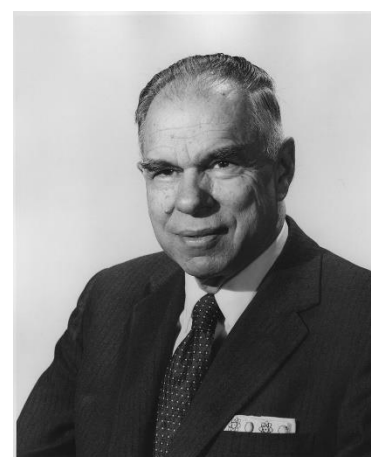


Figura 8: Glenn T. Seaborg  
(fonte: [3])

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 4: 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

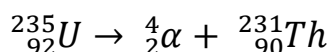
- Núcleos contendo 2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126 prótons ou nêutrons são especialmente estáveis. Por exemplo, o núcleo  ${}_{82}^{208}Pb$  é o isótopo de maior número atômico estável conhecido, e ele possui exatamente 82 prótons e 126 nêutrons ( $208 - 82 = 126$ ).

É interessante observar que o isótopo mais estável a natureza é o  ${}_{26}^{56}Fe$  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

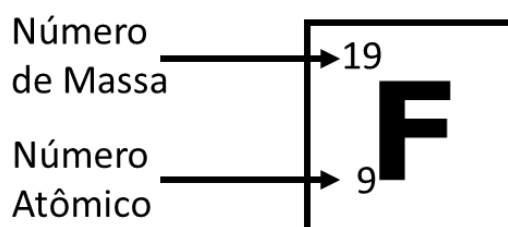
Um processo radioativo é aquele em que ocorrem transformações nos núcleos dos átomos. Assim, o átomo de um elemento se transforma em um átomo de outro. São representados por meio de Equações Nucleares.



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

Nos processos radioativos, as partículas subatômicas (prótons, nêutrons e elétrons) podem se transformar em outras partículas. Portanto, não é possível falar em conservação dessas espécies químicas. No entanto, existem dois princípios gerais que podemos aplicar.

Para aprendermos esse princípio, primeiramente, vamos nos lembrar da representação geral de um isótopo químico, que é representado pelo seu número atômico e pelo número de massa.



Vamos nos recordar das definições.

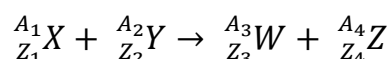
### 3.1. Conservação da Carga

O número atômico corresponde à contagem do número de prótons no núcleo de um elemento. Essa definição é bastante utilizada em outros ramos da Química.

Nesse capítulo, não vamos falar de Número Atômico, mas sim de Carga (ou Carga Nuclear).

Na Química, as principais partículas subatômicas possuem a mesma carga variando apenas o seu módulo.

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.

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$$

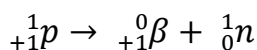
É importante observar que, no caso dos processos radioativos, a carga não é exclusiva dos prótons. Algumas outras partículas subatômicas também apresentam carga, em especial, os pósitrons e os elétrons.

Tabela 5: Partículas Carregadas

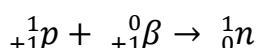
Representação	Partícula	Breve Descrição
${}_{+1}^1p$	Próton	Partícula com carga positiva e com massa
${}_{+1}^0\beta$	Pósitron	Partícula com carga positiva e massa desprezível
${}_{-1}^0\beta$	Elétron	Partícula com carga negativa e massa desprezível

Dessa maneira, é bastante possível que um próton se transforme em nêutron de duas formas:

- **Emissão de Pósitrons:**



- **Absorção de um Elétron:**



As transformações inversas também são possíveis. Dessa maneira, os processos radioativos são exceções à Lei de Lavoisier, ou Lei da Conservação das Massas. Nesse tipo de processo, partículas e elementos são criados e destruídos



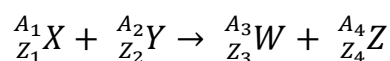
### 3.2. Conservação do Número de Massa

O número de massa corresponde à contagem do número de prótons com o número de neutros.

Como já explicamos, a massa não se conserva nos processos nucleares. Porém, a soma total do número de massa se conserva.

A conservação do número de massa se deve ao fato de que os quarks não podem ser observados isoladamente. Como a força de atração entre eles é muito grande, a massa dos prótons e dos nêutrons nunca é aniquilada completamente. O que pode acontecer em um processo radioativo é a conversão de um próton em nêutron, ou vice-versa.

Portanto, se temos um processo radioativo qualquer:



Podemos escrever a equação de conservação do número de massa.

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4$$

Vamos sintetizar as leis que regem as equações nucleares.

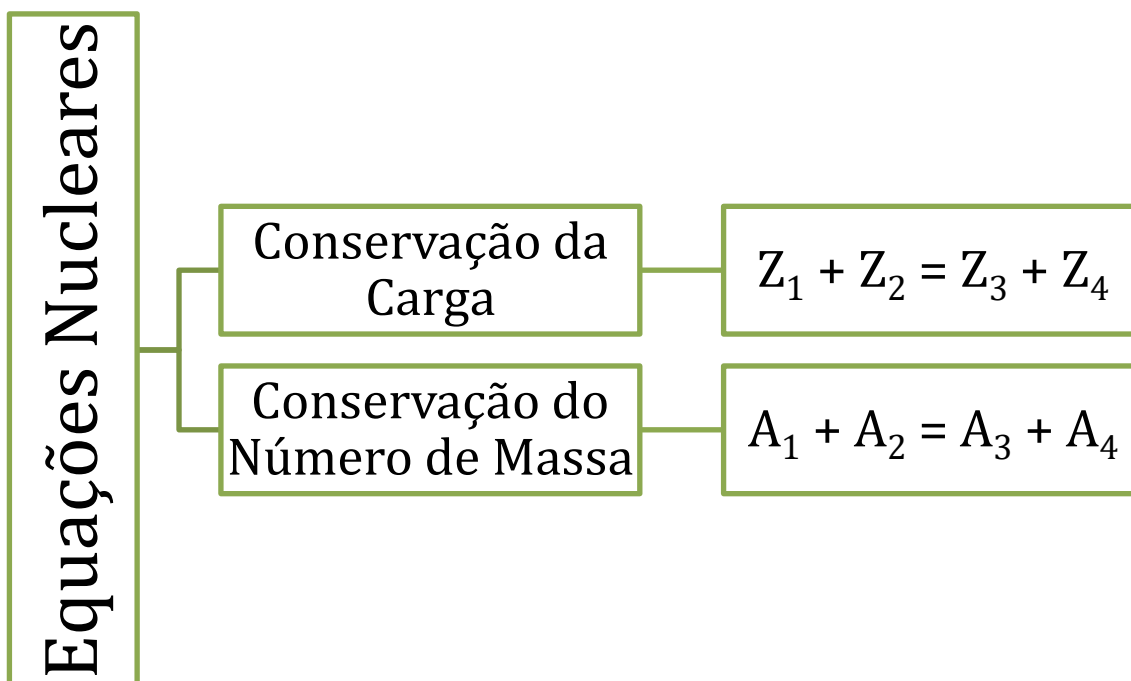
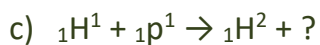
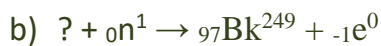
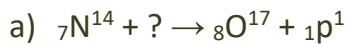


Figura 9: Equações Lineares

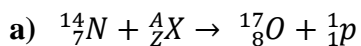
## 1. (TFC – 2019 – Inédita)

Complete as seguintes equações nucleares:



### Comentários

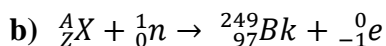
Para resolver esse problema, devemos aplicar as leis das equações nucleares. Vamos completa-las com um núcleo incógnita  ${}_Z\text{X}^A$ .



$$7 + Z = 8 + 1 \therefore Z = 2$$

$$14 + A = 17 + 1 \therefore A = 4$$

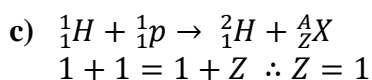
$$? = {}_2^4\text{He}$$



$$Z + 0 = 97 - 1 \therefore Z = 96$$

$$A + 1 = 249 \therefore A = 248$$

$$? = {}_{96}^{248}\text{Cm}$$



$$1 + 1 = 2 + A \therefore A = 0$$

$$? = {}_{+1}^0\text{e} \text{ (pósitron)}$$



$$10 + 10 = 8 + Z \therefore Z = 12$$

$$20 + 20 = 16 + A \therefore A = 24$$

$$? = {}_{12}^{24}\text{Mg}$$



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

## 1. 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.

É importante que o decaimento deve ser necessariamente espontâneo. É muito comum em aceleradores de partículas bombardear um núcleo com nêutrons, partículas alfa ou até mesmo núcleos inteiros. Esses processos são provocados, portanto, não são decaimentos radioativos. Em vez disso, eles devem ser chamados de **transmutações artificiais**.

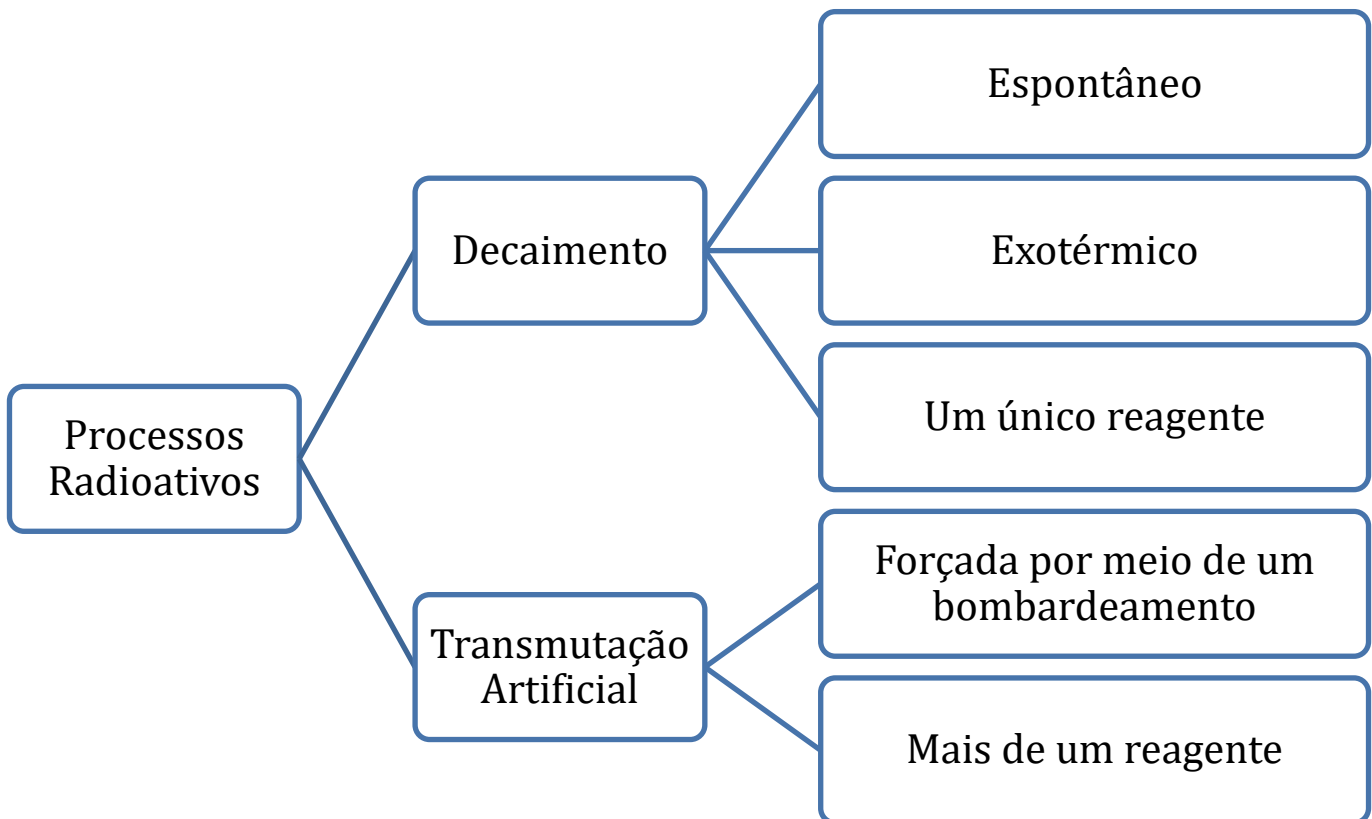


É uma transmutação artificial	${}_{83}^{208}\text{Bi} + {}_{26}^{58}\text{Fe} \rightarrow {}_{109}^{266}\text{Mt}$
É decaimento	${}_{3}^{8}\text{Li} \rightarrow {}_{4}^{8}\text{Be} + {}_{-1}^{0}\beta$

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.

Ao olhar uma equação nuclear, podemos dizer, de forma simples, que um decaimento radioativo tem **um único reagente**. Caso contrário, será uma transmutação artificial.



Quando um isótopo de um elemento qualquer sofre um decaimento radioativo, ele é classificado como um **radioisótopo**. Todos os elementos apresentam pelo menos um isótopo radioativo.

Essa classificação é importante, porque o decaimento radioativo **é sempre exotérmico**, ou seja, sempre acontece com intensa liberação de energia. Essa energia é quase sempre liberada na forma de raios gama.

Os raios gama 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.

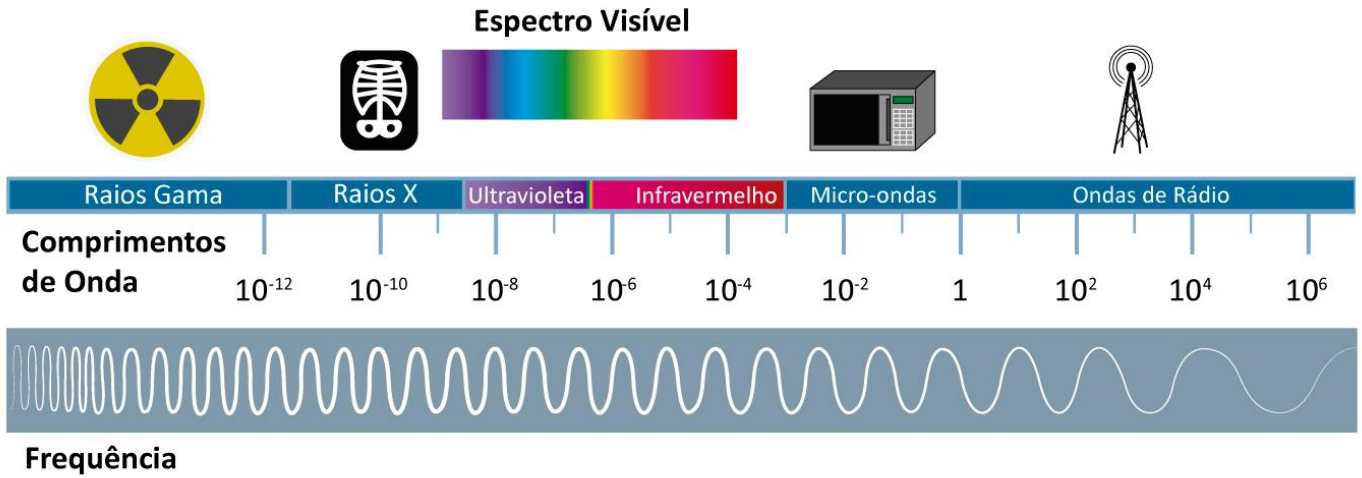


Figura 10: Espectro Eletromagnético (fonte: [2])

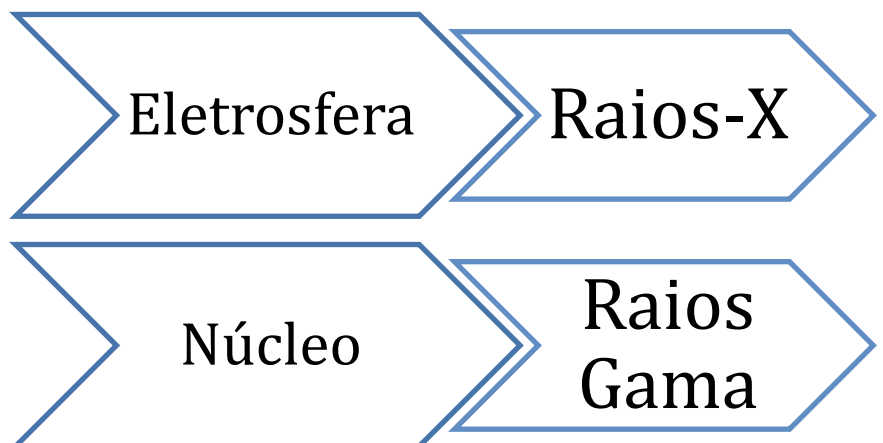
Portanto, ainda que haja a emissão de outras partículas, os decaimentos radioativos quase sempre liberam raios gama.



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. Os raios gama jamais poderão ser utilizados em tratamentos, pois o seu poder de causar danos aos tecidos dos seres vivos é muito grande devido à quantidade de energia que eles carregam.

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.



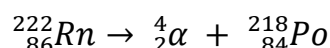
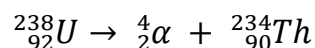


## 4.1. Emissão de Partículas Alfa

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 ( $\alpha$ ), ele se transforma em outro elemento com número atômico inferior em duas unidades e número de massa inferior em quatro unidades."

Vejam alguns exemplos da Lei de Soddy.



Note que, nas escritas de ambas as equações, foram conservadas tanto a soma das cargas como a soma dos números de massa.

As partículas alfa correspondem ao núcleo do isótopo mais estável do hélio. São representadas por  ${}_2^4\alpha$ .

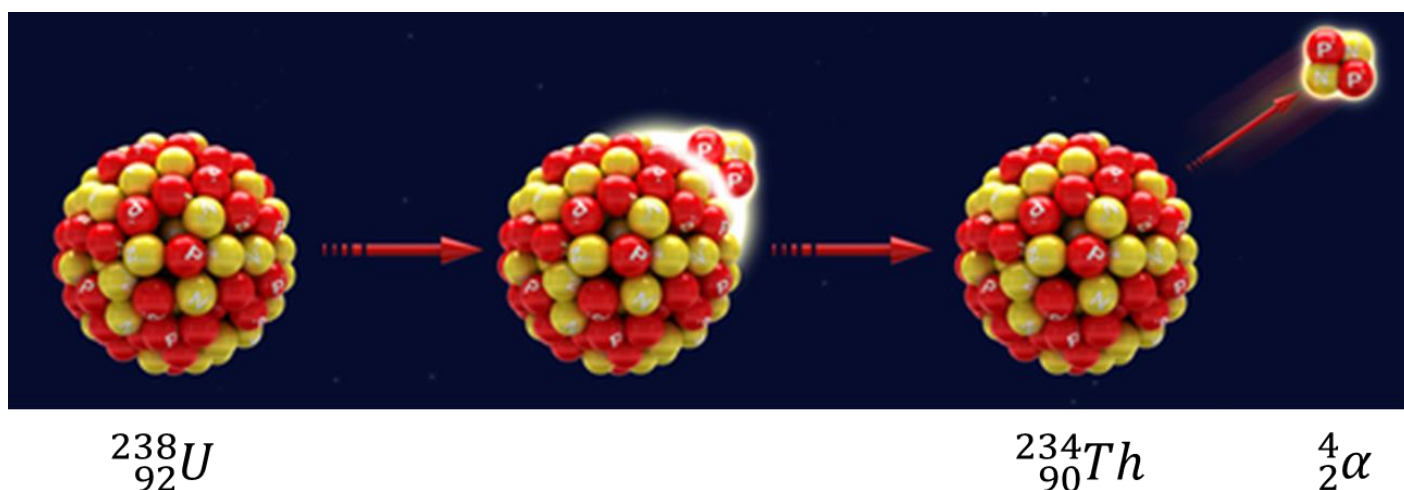


Figura 11: Emissão de Partículas Alfa (fonte: [3])

Um fato interessante é que as partículas alfa diminuem o tamanho do núcleo, portanto, são normalmente emitidas por radioisótopos de número atômico mais elevado, que se transformam em isótopos de menor núcleo.

Como já falamos, os núcleos de muito atômico muito elevado dificilmente são estáveis, porque eles já comecem a exceder o raio de atuação das forças nucleares. Portanto, eles tendem a sofrer decaimento por emissão de partículas alfa.

É muito raro que núclídeos com  $Z < 83$  emitam partículas alfa.

Como são núcleos relativamente pesados, as partículas alfa são lentas e possuem baixo poder de penetração, podendo ser facilmente detidas por uma folha de papel ou mesmo pela pele humana. Por conta disso, essa radiação não provocará sérios danos em seres pluricelulares, como o ser humano.

Elas são emitidas apenas com dois prótons e dois nêutrons. Mas, assim que encontram algum átomo pelo seu caminho, roubam-lhe dois elétrons, formando um átomo de hélio. Por conta disso, elas são ditas **radiações ionizantes**.

As radiações ionizantes trazem sérios riscos aos seres vivos, pois podem afetar o seu metabolismo de diversas formas:

- Pode incidir diretamente sobre uma molécula importante, como o DNA, provocando alterações genéticas em algumas células do indivíduo. Dependendo da intensidade de atuação
- Pode incidir sobre alguma molécula, como a água, que compõe cerca de 70% das células, induzindo a produção de íons livres, que podem ser transformados em outros produtos, como o peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), que é fortemente oxidante. Esse tipo de composto é muito reativo e pode atacar outras moléculas que sejam importantes no metabolismo do ser vivo, como o próprio DNA.

É importante reforçar que os elétrons pouco importam para a escrita das equações nucleares. Porém, nesse caso específico, é importante comentar, pois a maior parte do hélio presente na superfície terrestre é originado de emissões de partículas alfa.



## 4.2. Emissão de Partículas Beta

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

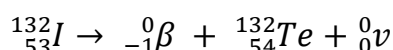
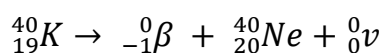
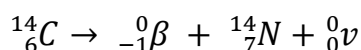
**Segunda Lei de Soddy:** "Quando um radioisótopo emite uma partícula beta ( $\beta$ ), ele se transforma em outro elemento com número atômico superior em uma unidade e com o mesmo número de massa."

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 12: Frederick Soddy  
(fonte: [6])



Mais uma vez, foram respeitadas as duas regras que aprendemos sobre as equações nucleares. Tanto a carga nuclear como o número de massa foram conservados.

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).

Porém, eles interagem muito pouco com a matéria, pois não possuem carga elétrica, nem massa. Somente interagem por meio da força nuclear fraca e por força gravitacional. Eles foram postulados pelo físico austríaco Wolfgang Pauli em 1930 para explicar o fato de o espectro de energia da radiação beta é contínuo, como foi confirmado experimentalmente por James Chadwick em 1914.

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  ${}_{-1}^0\beta$ , do que em elétron, que é representado por  $e^-$ . Essa preferência é apenas uma forma de escrever melhor as equações nucleares.

As partículas beta são muito leves, por conta disso, são emitidas a uma velocidade bem superior à velocidade das partículas alfa. Isso se reflete no seu poder de penetração, que é bem superior. Essas partículas são capazes de atravessar a pele humana, mas podem ser detidas por uma chapa de alumínio.

Como são partículas carregadas, elas interagem com campos elétricos, sendo, inclusive, bem mais susceptíveis que as partículas alfa, já que são muito mais leves e possuem uma relação carga/massa mais elevada.

A partícula beta também é considerada uma radiação ionizante. Como é carregada, pode induzir a formação de íons no corpo humano, causando danos biológicos.

Além disso, na maioria das emissões de partículas beta, é formado inicialmente uma versão instável do nuclídeo final. Esse nuclídeo sofre o processo de isomerização, com liberação de raios gama, que será comentado na próxima seção.

### 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.

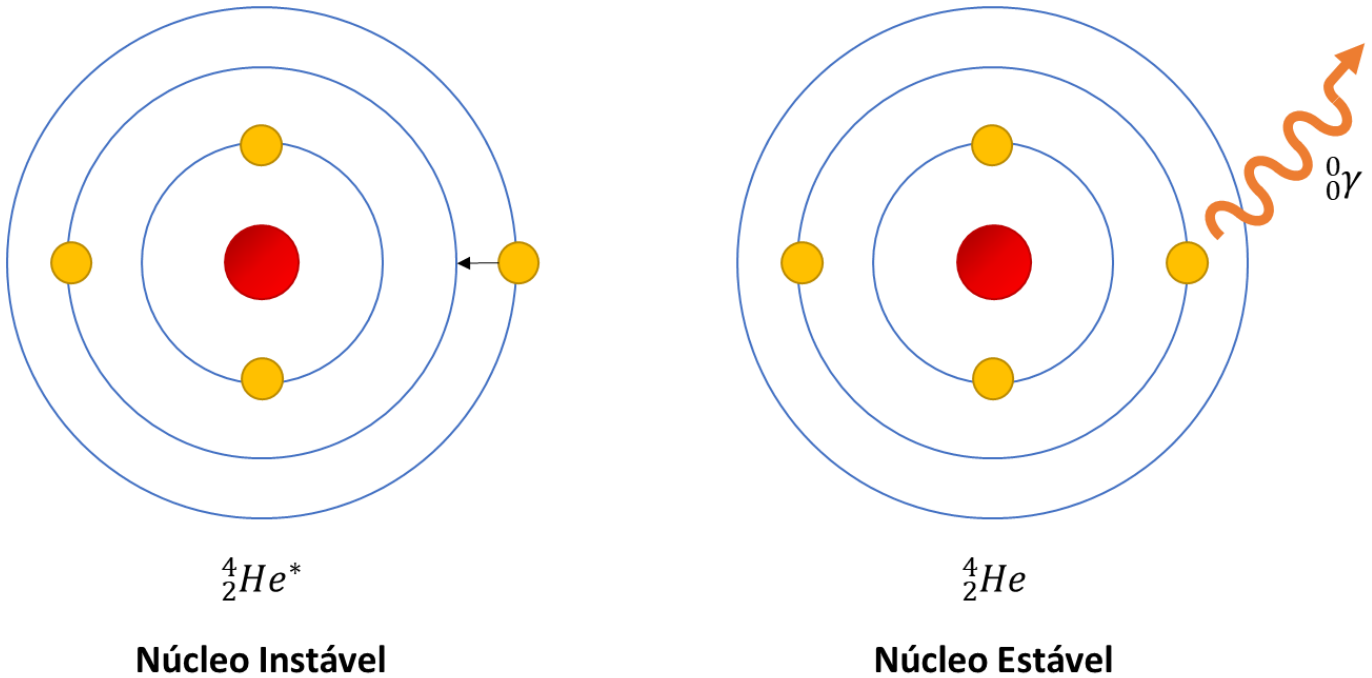
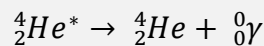


Figura 13: Transformação de um Núcleo Instável em outro Estável pela Emissão de uma Partícula Gama

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.



Nesse decaimento, o núcleo instável é assinalado com um asterisco para indicar que se trata de um estado excitado do núcleo de hélio-4.

As partículas gama são radiações eletromagnéticas, portanto, se movem na velocidade da luz. Seu comprimento de onda é muito pequeno, podendo atingir alguns picômetros ( $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$ ), mas também podem apresentar comprimentos de onda muito menores, até mesmo próximos do comprimento de Planck ( $1,6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$ ) – que é o menor comprimento de onda possível para uma onda.

Lembrando-nos da Equação de Planck:

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

Como o comprimento de onda dos raios gama é muito pequeno, essas ondas são muito energéticas, sendo sua energia na casa Megaelétron-volts (MeV). Por conta disso, elas são muito perigosas, pois podem ocasionar facilmente o rompimento de ligações químicas nas moléculas de seres vivos.

Seu poder de penetração é muito grande, somente podendo ser detidos por placas de chumbo.

É importante destacar, ainda, que, nas emissões de partículas alfa e beta, é comum ocorrer a liberação de energia. E essa energia é liberada geralmente na forma de raios gama.

O maior perigo, portanto, das emissões alfa e beta não são essas partículas propriamente, mas sim, a grande quantidade de energia que é liberada na forma de raios gama.

A Figura 14 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.

Estudaremos mais adiante alguns processos radioativos envolvendo nêutrons. Por hora, o que você precisa saber é que, por não serem radiações ionizantes, eles tendem a ser menos agressivos para os seres vivos. Preocupe-se mais, portanto, com as partículas alfa, beta, gama e com os raios X.

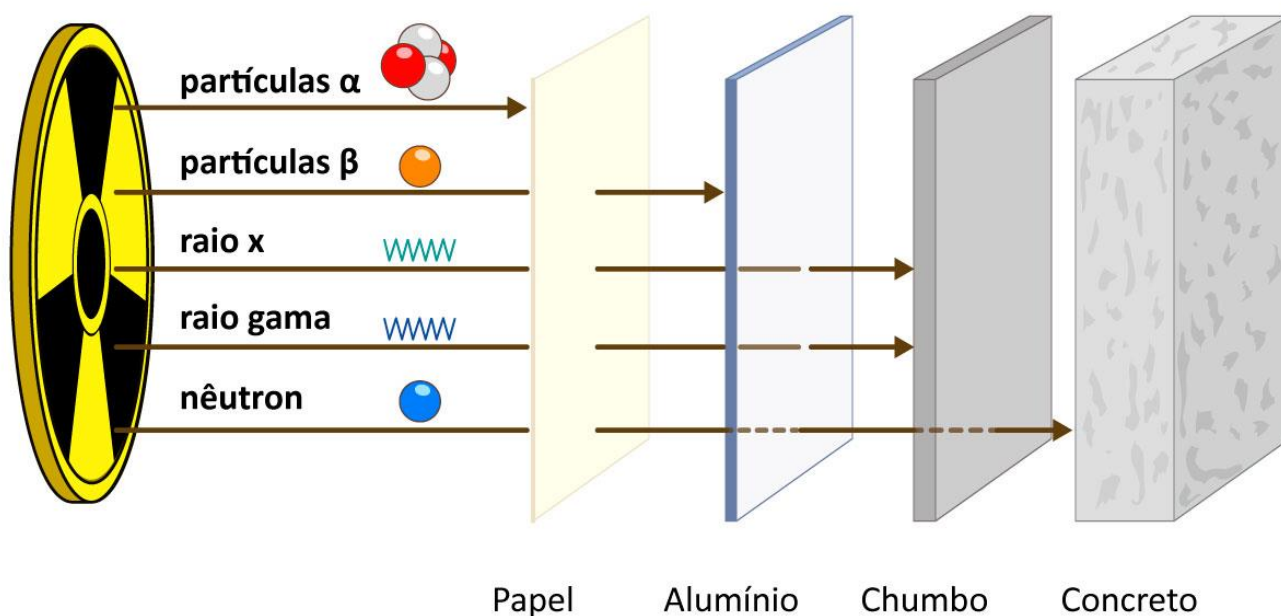


Figura 14: Tipos de Radiação e Poder de Penetração (fonte: [4])

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.

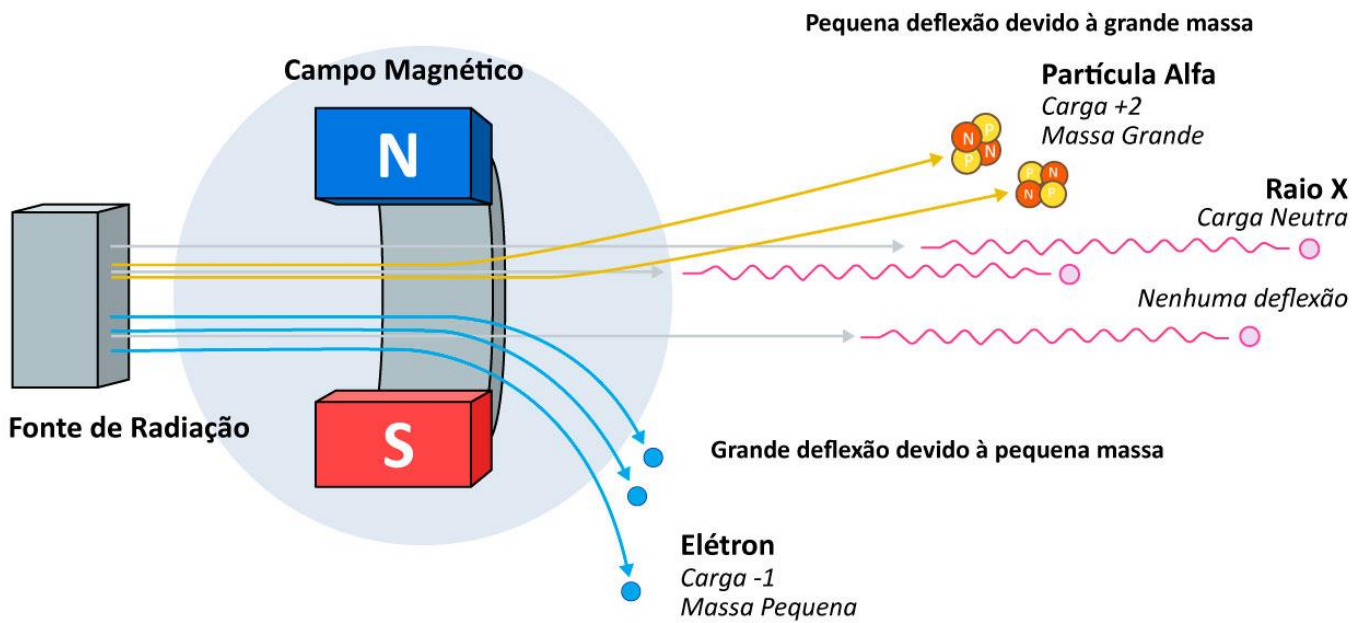


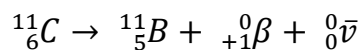
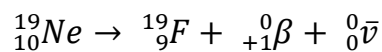
Figura 15: Partículas Subatômicas sob a Ação de um Campo Magnético

#### 4.4. Emissão de Póstrons

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

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.

A emissão de pósitrons é acompanhada pela emissão de um antineutrino, que é a antipartícula do neutrino. Já o pósitron é a antipartícula do elétron.

Um par de partícula e antipartícula, quando se encontram, sofrem aniquilação, ou seja, a matéria é destruída provocando intensa liberação de energia, na forma de raios gama.

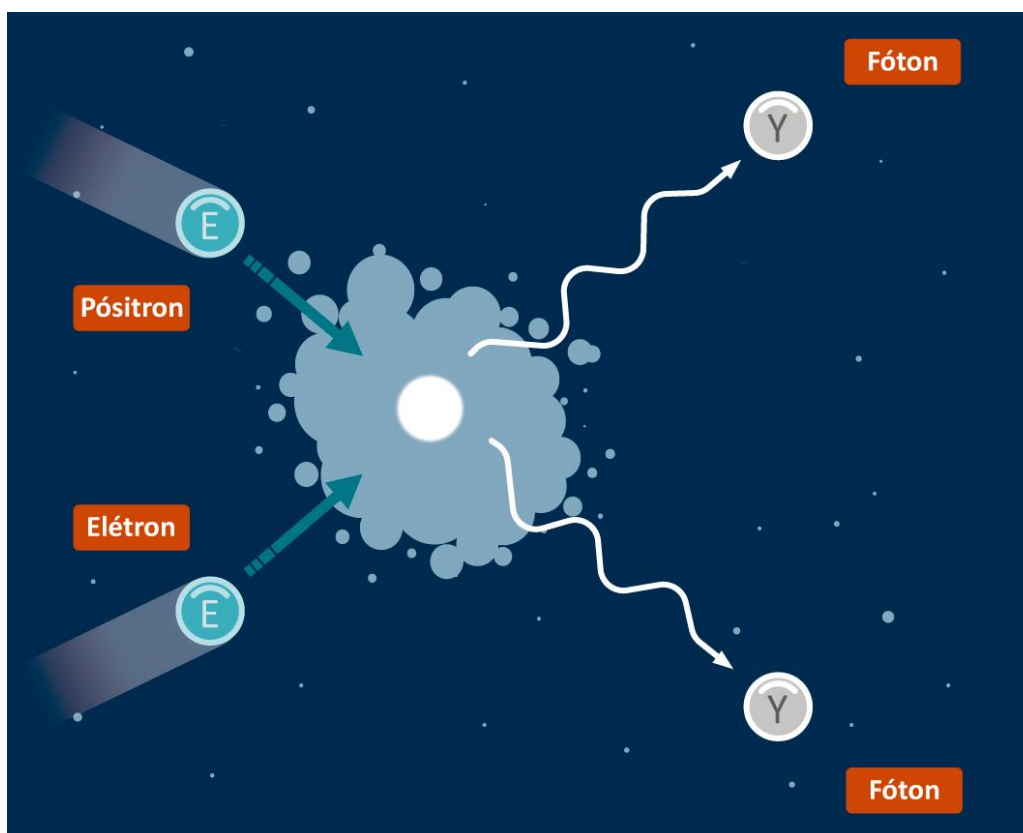


Figura 16: Aniquilação de um Pósitron e um Elétron

Como os elétrons são bastante abundantes, o pósitron é também considerada uma **radiação ionizante**, já que tem facilidade em aniquilar esses elétrons, provocando sensíveis alterações na matéria.

#### 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.

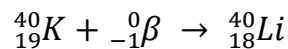
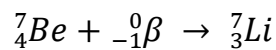
O efeito da Captura K é o mesmo da emissão de pósitrons. Sinteticamente, elas podem ser resumidas como:



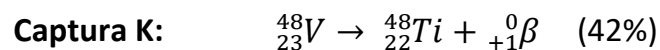
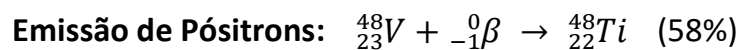


Ao converter o próton em um nêutron, a Captura K também aumenta a relação N/P, portanto, acontece em núcleos deficientes em nêutrons.

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.

Por fim, podemos sintetizar o tipo de partícula emitido pelo radioisótopo, de acordo com a quantidade prótons e nêutrons presentes no seu núcleo.

A captura K é classificada como um **decaimento radioativo**, porque o elétron não foi bombardeado no núcleo. O que aconteceu é que o próprio núcleo absorveu o elétron do átomo a fim de aumentar a sua estabilidade.



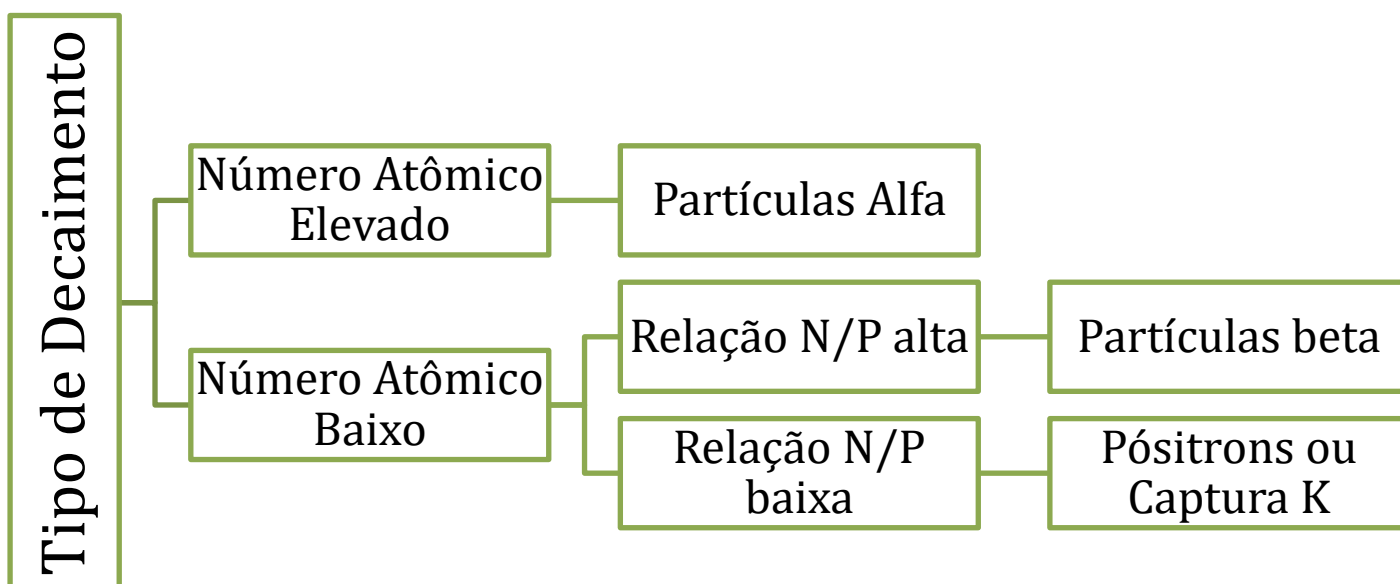


Figura 17: Tipos de Decaimento

É importante ressaltar que existem exceções à Figura 17. Por exemplo, é comum que alguns elementos de número atômico elevado emitam partículas beta. Vamos ver alguns casos ao estudar as Séries Radioativas.

#### 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.

É interessante observar que, de todas as partículas que estudamos, a única que altera o número de massa do isótopo é a partícula alfa e que essa partícula possui o número de massa igual a 4.

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...).

Um tema que pode ser cobrado em questões de prova é saber qual isótopo do chumbo será o resultante da série radioativa. Para isso, basta você dividir o número de massa inicial e registrar o

resto da divisão por 4. O número de massa do isótopo final deve apresentar o mesmo resto da divisão.

Para isso, já vamos registrando os restos das divisões dos números de massa dos isótopos estáveis do chumbo.

$$\begin{array}{ccc}
 206 & \left| \begin{array}{l} 4 \\ \hline \end{array} \right. & 207 & \left| \begin{array}{l} 4 \\ \hline \end{array} \right. & 208 & \left| \begin{array}{l} 4 \\ \hline \end{array} \right. \\
 (-204) & 51 & (-204) & 51 & (-208) & 52 \\
 \\ 
 & = 2 & & = 3 & & = 0
 \end{array}$$

Existem três séries radioativas naturais e uma artificial. Cada uma delas tem um elemento principal, que é o radioisótopo mais abundante na Terra, sendo o elemento que possui o maior tempo de meia-vida, ou seja, o que demora mais para decair.

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.

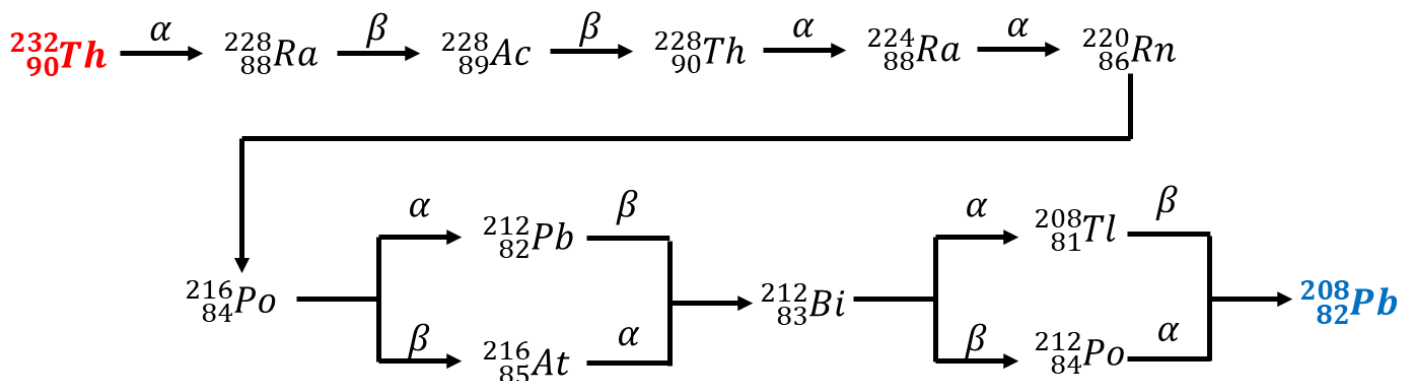


Figura 18: Série do Tório

- **Série do Neptúnio (4n + 1):** essa é uma série artificial, que foi descoberta após a síntese dos primeiros elementos transurânicos artificiais. É marcada pela presença do  ${}_{93}\text{Np}^{237}$ . 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 ( ${}_{83}\text{Bi}^{209}$ ). 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.

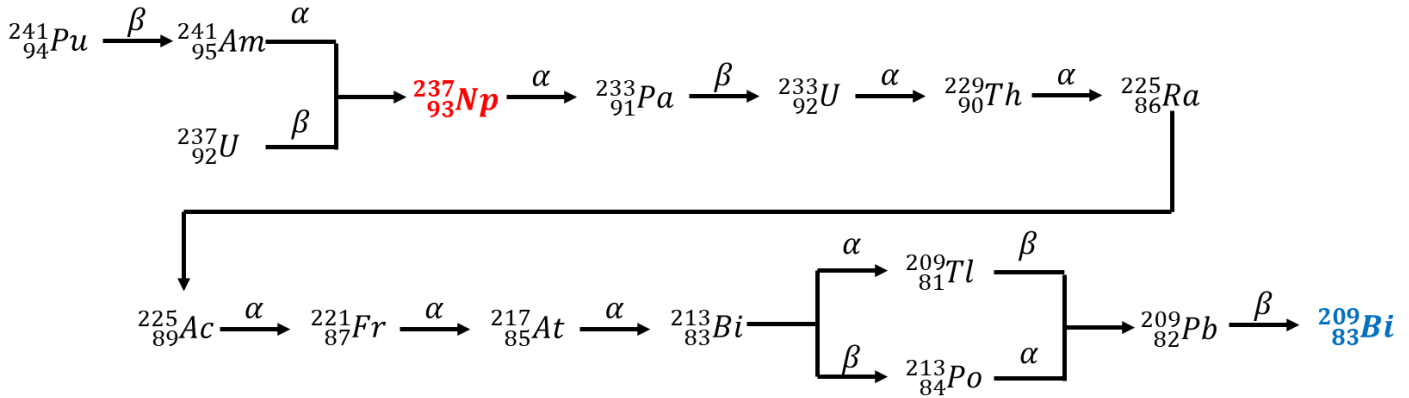


Figura 19: Série do Neptúnio

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.

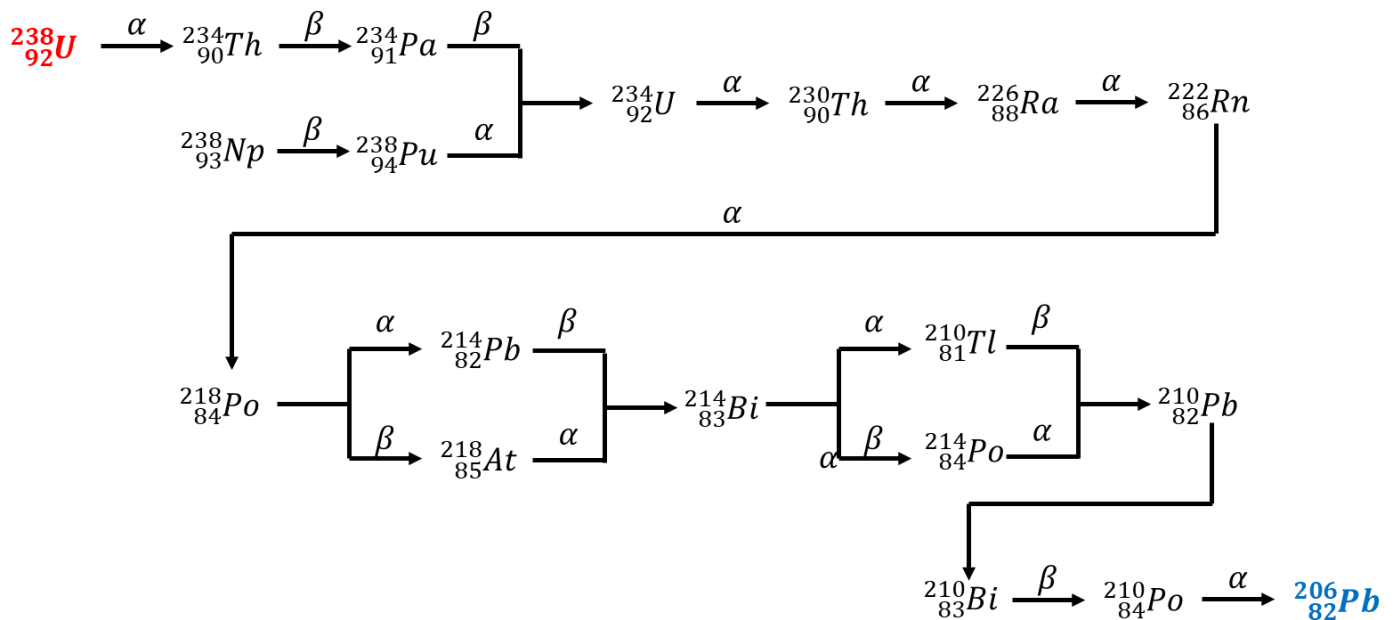


Figura 20: Série do Urânio

- **Série do Actínio ( $4n + 3$ ):** essa série, na verdade, se inicia com o  $^{235}_{92}\text{U}$  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  ${}_{82}\text{Pb}^{207}$ . 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.

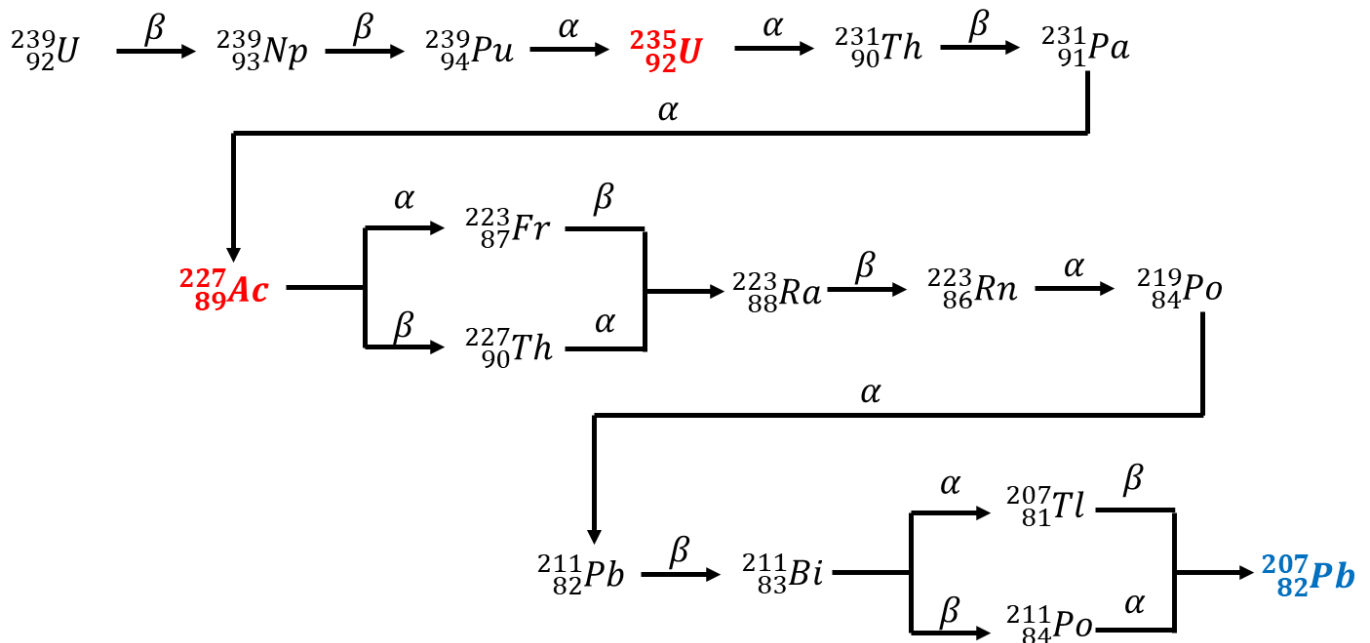


Figura 21: Série do Actínio

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.

E, agora, vamos praticar com alguns exercícios.



## 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?

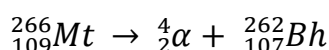
- ${}_{109}\text{Mt}^{266}$
- ${}_{55}\text{Cs}^{140}$
- ${}_{4}\text{Be}^7$



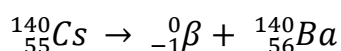
## Comentários

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.

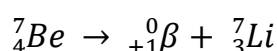


- b) O céσιο-140 possui 55 prótons e 85 nêutrons, portanto, possui uma quantidade muito elevada de nêutrons, ou seja, uma relação N/P muito alta. O isótopo mais estável desse elemento é o céσιο-133. Por conta disso, ele deve emitir partículas beta negativas (ou elétrons). Basicamente, a emissão de partículas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

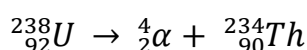


O bário-140 possui 56 prótons e 84 nêutrons, portanto, ainda possui uma relação N/P muito elevada.

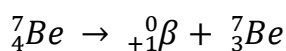
- c) O núcleo de berílio-7, por sua vez, possui 4 prótons e 3 nêutrons, portanto, ele possui poucos nêutrons. Logo, deve emitir partículas beta positivas



- 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

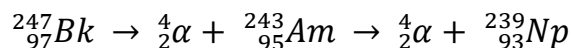
Nessa questão, você deve aplicar a regra do resto da divisão por 4 do número de massa.

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

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

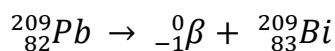
$$\begin{array}{r} 206 \quad | \quad 4 \\ (-204) \quad | \quad 51 \\ \hline = 2 \end{array} \quad \begin{array}{r} 207 \quad | \quad 4 \\ (-204) \quad | \quad 51 \\ \hline = 3 \end{array} \quad \begin{array}{r} 208 \quad | \quad 4 \\ (-208) \quad | \quad 52 \\ \hline = 0 \end{array}$$

- 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 21.



- 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 Bóhrrio 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.

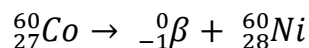
Isso ocasiona diversos efeitos colaterais, entre eles: náusea, fadiga e perda de cabelos. A fonte de radiação é projetada para o uso das radiações gama, já que as radiações alfa,  ${}^4_2\alpha$ , e beta,  ${}^0_{-1}\beta$ , são menos penetrantes nos tecidos e nas células. Um dos radionuclídeos usados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

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.
- Sabendo que o  ${}^{60}_{27}\text{Co}$  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. (Escola Bahiana de Medicina e Saúde Pública – 2017)





O radionuclídeo  ${}^{67}_{31}\text{Ga}^*$ , cuja meia-vida é igual a três dias, é utilizado na Medicina Nuclear no tratamento de tumores linfáticos. Uma vez introduzido no corpo, as emissões de radioisótopos emitem raios gama por meio do seguinte decaimento:

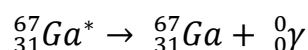


Tendo em vista as informações do texto e os conhecimentos sobre radioatividade, é correto afirmar:

- a) As radiações gama,  ${}^0_0\gamma$ , são mais penetrantes, porém menos ionizantes que as partículas alfa,  ${}^2_2\alpha$ , e beta,  ${}_{-1}^0\beta$ .
- b) Os radionuclídeos utilizados em Medicina Nuclear devem possuir meia-vida bastante longa.
- c) As propriedades químicas do gálio 67 se modificam com as emissões radioativas.
- d) A razão próton/nêutron do radionuclídeo gálio 67 é, aproximadamente, 0,86.
- e) Ao emitir radiação gama,  ${}^0_0\gamma$ , o nuclídeo gálio 67 é desestabilizado.

### Comentários

Questão bastante interessante. O que acontece é um caso de isomerização do gálio-67.



Nesse processo, há apenas uma alteração na configuração nuclear, sem modificar o número atômico ou de massa do núcleo. Ocorre liberação de energia, porque o estado  $\text{Ga}^*$  é um estado excitado, já o estado  $\text{Ga}$  é o estado fundamental. Com base nisso, vamos analisar as afirmativas.

- a) As radiações gama são bastante energéticas e, por isso, possuem elevado poder ionizante em relação às partículas alfa e beta. Afirmativa errada.
- b) Se os radionuclídeos apresentassem meia-vida longa, eles poderiam trazer efeitos nocivos ao ser humano depois de algum tempo.
- c) As propriedades químicas são exatamente as mesmas, porque o  $\text{Ga}^*$  e  $\text{Ga}$  pertencem ao mesmo elemento químico.
- d) O gálio-67 tem 31 prótons e 36 nêutrons. Portanto, a razão é

$$\frac{31}{36} \cong 0,86$$

- e) Pelo contrário, o nuclídeo  $\text{Ga}^*$  é metaestável e, após emitir os raios gama, passa a ser estável. Ocorreu uma desexcitação com consequente liberação de energia.

**Gabarito: D**



## 6. (TFC – Inédita)

Com relação aos conceitos associados à radioatividade, assinale a alternativa correta.

- a) Quando um átomo é bombardeado com partículas  $\alpha$  e/ou partículas  $\beta$ , sofrendo uma desintegração nuclear, diz-se que ele sofreu um decaimento radioativo.
- b) Quando um núcleo atômico emite uma partícula  $\alpha$ , ele perde um próton e um nêutron.
- c) A radiação gama não é uma partícula propriamente dita, mas sim uma onda eletromagnética transversal.
- d) O período de semidesintegração é o tempo necessário para que todos os átomos radioativos existentes em uma certa amostra transmutem-se em átomos estáveis.
- e) A radioatividade consiste na emissão de partículas e radiações eletromagnéticas por núcleos atômicos instáveis. Esses núcleos atômicos sempre se transformam em núcleos estáveis após o primeiro decaimento radioativo.

### Comentários

Vamos analisar item por item.

a) Um decaimento radioativo deve ser necessariamente um processo espontâneo. Ele não pode ser induzido pelo bombardeamento de nenhuma partícula. Nesse caso, tem-se uma transmutação artificial. Item errado.

b) Quando o núcleo atômico emite uma partícula alfa, ele perde dois prótons e dois nêutrons. Item errado.

c) A partícula gama não apresenta carga nem massa, por isso, não é uma partícula propriamente dita. Ela é, de fato, uma onda eletromagnética. E todas as ondas eletromagnéticas são transversais – esse é um assunto estudado em física. As ondas longitudinais só podem ser mecânicas, como é o caso do som. Item correto.

d) O período de semidesintegração ou tempo de meia-vida é o tempo necessário para que a atividade da amostra se reduza à metade da inicial. Teoricamente, a atividade radioativa nunca se esgota completamente – ela apenas vai se reduzindo à metade a cada período de semidesintegração. Item errado.



e) O início traz uma excelente definição de radioatividade. Porém, é muito comum que os núcleos atômicos precisem de vários decaimentos sucessivos para atingir a estabilidade. É o caso das séries radioativas. Item errado.

**Gabarito: C**

## 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.

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

Em termos matemáticos, a velocidade de decaimento de um nuclídeo qualquer é igual à variação instantânea (ou derivada) do número de mols desse nuclídeo pelo tempo.

Caso você não esteja familiarizado com o conceito de derivada, não se preocupe, pois basta você memorizar as expressões que serão mostradas nesse livro digital que você terá conteúdo suficiente para resolver todas as questões que podem vir a aparecer na sua prova. Por outro lado, caso você já esteja familiarizado com esse conceito matemático, apresentaremos ao final dessa Seção as demonstrações de todas as equações aqui desenvolvidas.

A atividade de uma amostra radioativa é normalmente medida em Becquerel (Bq), que corresponde a desintegrações por segundo.

Mas, antes de aprender a calcular a atividade de uma amostra radioativa, é importante resumir alguns conceitos importantes:

- Você precisará aprender alguns conceitos básicos de Estequiometria, como massa atômica e número de Avogadro;
- Você precisará aprender sobre Logaritmos, assunto da Matemática.

Não se preocupe, porque eu resumi aqui tudo o que você precisa saber sobre esses dois campos para resolver as questões de Radioatividade.



## 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**.

Como já explicado anteriormente, os fenômenos da eletrosfera não influenciam nas propriedades nucleares, porque as energias nele envolvidos são de ordem de grandeza um milhão de vezes inferior às energias envolvidas nos fenômenos nucleares.

- **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.

Sendo assim, não influenciam na velocidade de decaimento de um radioisótopo:



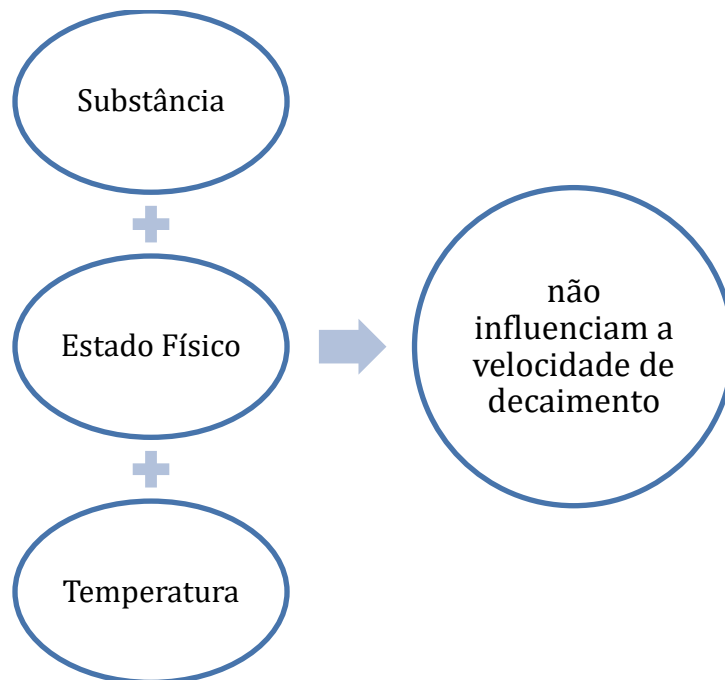


Figura 22: Fatores que não influenciam a velocidade de decaimento de um radioisótopo

## 5.2. Tempo de Meia-Vida

Um sinônimo para um **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**.



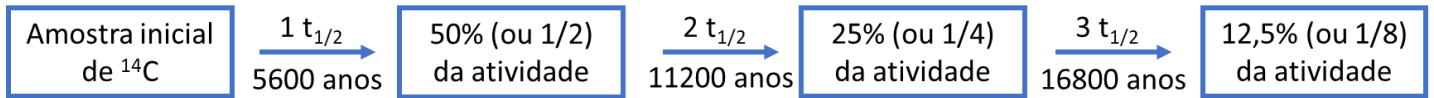
O tempo de meia-vida, também conhecido como período de semidesintegração, é representado por  $t_{1/2}$ . Corresponde ao tempo necessário para que a massa (o número de mols ou a atividade também, já que todas essas grandezas são proporcionais) inicial do radioisótopo seja reduzido à metade. Por exemplo, o  $^{14}\text{C}$  (carbono-14) decai por radiação beta com tempo de meia-vida igual a 5600 anos.

Isso significa que, se hoje, temos uma amostra de carbono-14, ela será reduzida a 50% do seu valor inicial daqui a 5600 anos.

Como o tempo de meia-vida é constante, depois de passada uma segunda meia-vida, ou seja, depois de 11200 anos, essa amostra será reduzida novamente à metade, passando a 25% (ou 1/4) do seu valor inicial.

Passadas exatamente três meias-vidas, ou seja, 16800 anos, a atividade inicial da amostra será reduzida passando a 1/8 da sua atividade inicial. E, assim, por diante.

Podemos representar isso por meio de uma figura.



Podemos representar esse decaimento por meio de uma equação.

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

Tempo de Meia-Vida  
Quantidade de Núcleos Inicial  
Quantidade de Núcleos Final

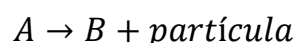
A quantidade de núcleos pode ser expressa em número de mols, mas muitas vezes é expressa diretamente em número de átomos. Você só precisa se lembrar que a taxa de conversão de número de átomos para número de mols é o Número de Avogadro ( $6,02 \times 10^{23}$ ).

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

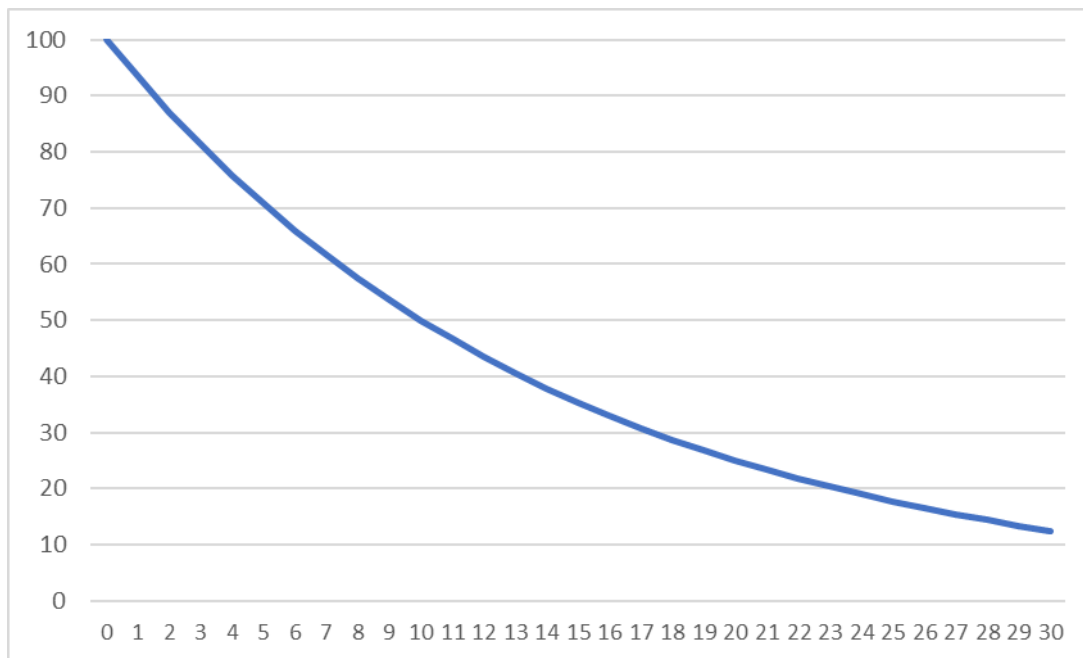
$$N(t) = N_0 \cdot (e)^{-kt}$$

Constante de Decaimento  
Quantidade de Núcleos Inicial  
Quantidade de Núcleos Final

O gráfico do número de mols (ou átomos) do radioisótopo em função do tempo corresponde a um decaimento exponencial. Considere um decaimento radioativo que pode ocorrer por meio de qualquer partícula (alfa, beta, gama, pósitron etc.)

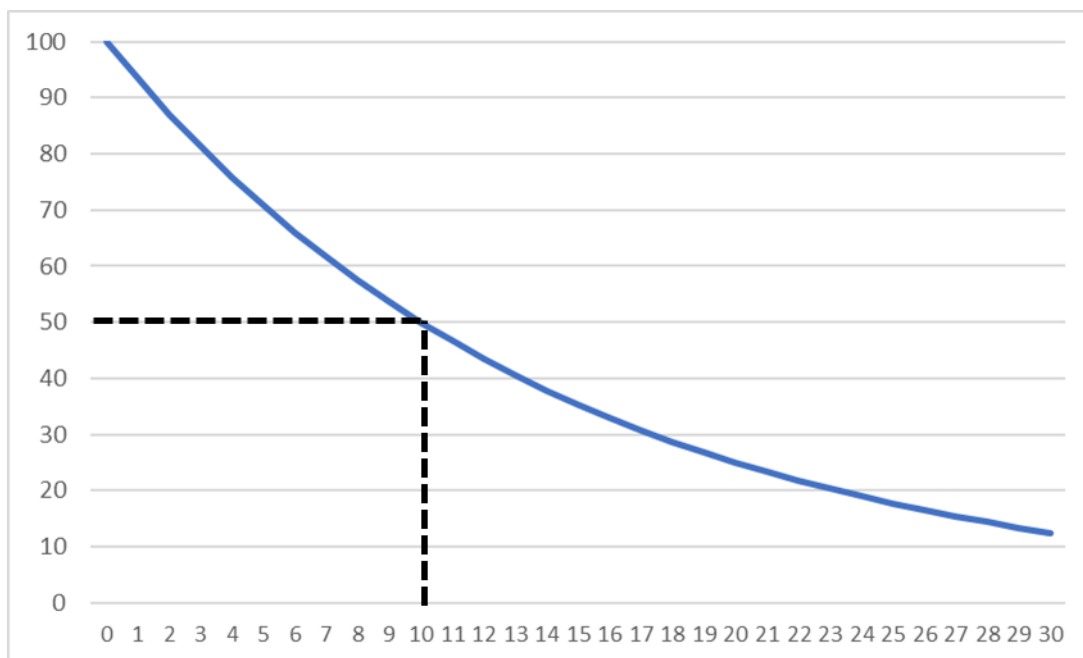


É comum nesse tipo de decaimento referir-se ao nuclídeo A como **pai** e ao B como **filho**.



*Figura 23: Curva de Decaimento Exponencial*

Nesse gráfico, podemos visualizar o tempo de meia-vida. No início, a quantidade de núcleos era 100. Ela se reduz à metade depois de 10 unidades de tempo. Vejamos.



*Figura 24: Amostra Radioativa depois um tempo de meia-vida*

Decorridas as 10 primeiras unidades de tempo, a quantidade de núcleos diminui pela metade, passando de 100 para 50. Decorridas mais 10 unidades de tempo, portanto 2 tempos de meia-vida, ocorreu nova redução à metade, passando a 25.

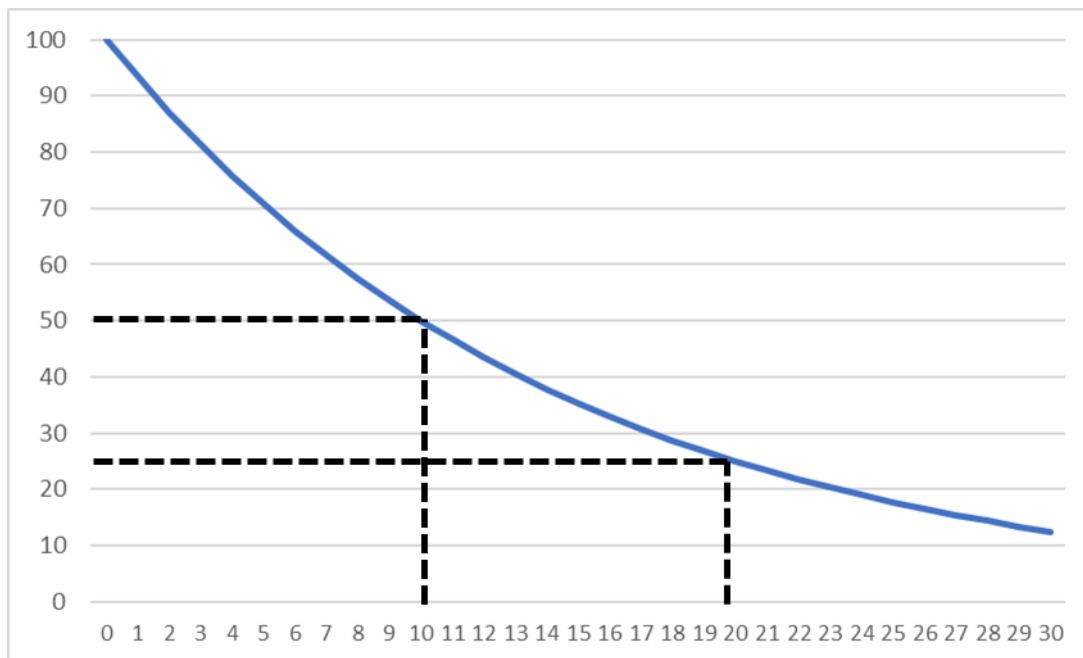


Figura 25: Amostra Radioativa depois dois tempos de meia-vida

Ao observar o terceiro tempo de meia vida, ou seja, em 30 ( $3 \times 10 = 30$ ), concluímos que, mais uma vez, a amostra se reduziu à metade.

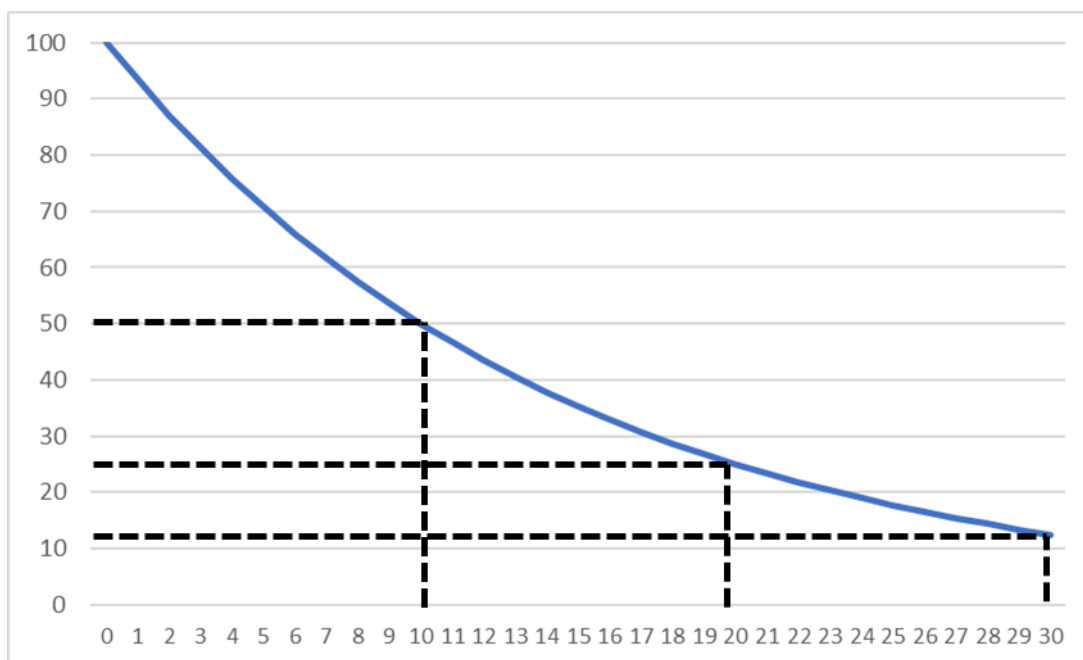


Figura 26: Amostra Radioativa depois de três tempos de meia-vida

É interessante observar que também podemos calcular o número de mols presentes do nuclídeo filho. Para isso, devemos saber que a soma dos números de mols de ambos os nuclídeos deve ser mantida constante. Isso acontece, porque todo o nuclídeo B que nasceu veio a partir do decaimento de um nuclídeo A.



$$n_A + n_B = n_0$$

Substituindo a expressão conhecida para o decaimento do nuclídeo pai, temos.

$$n_0 e^{-kt} + n_B = n_0$$

$$\therefore n_B = n_0 - n_0 e^{-kt} = n_0(1 - e^{-kt})$$

Portanto, o número de núcleos do nuclídeo filho, como era de se esperar, é crescente.

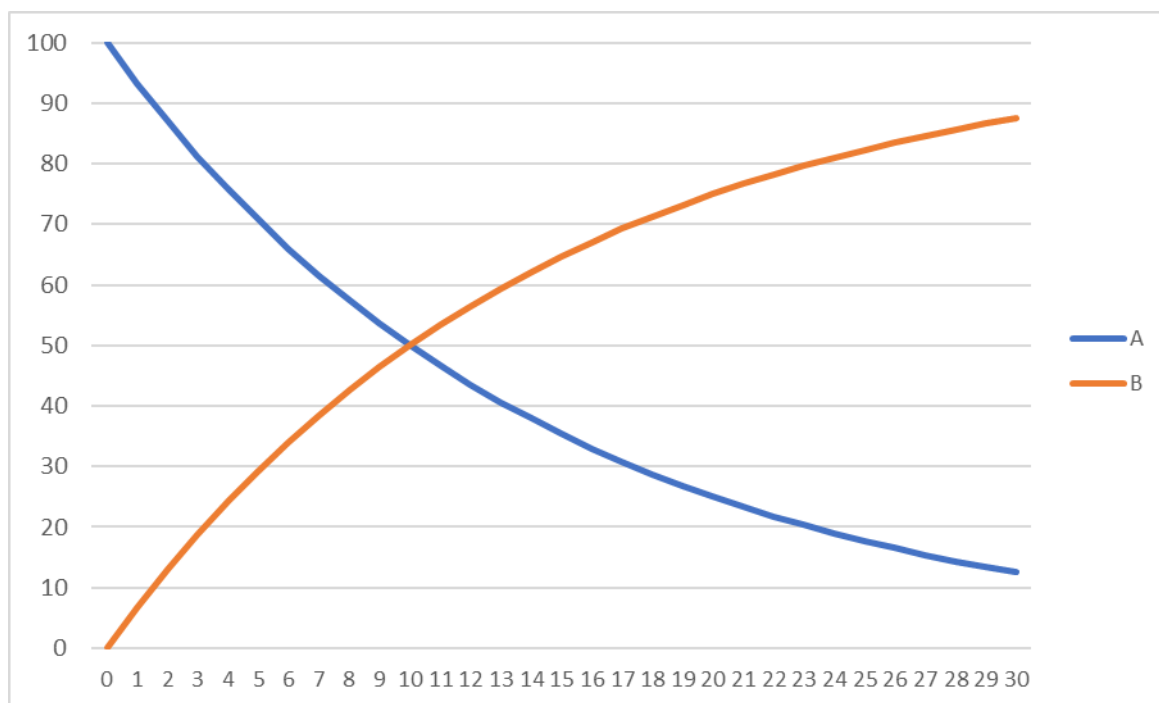


Figura 27: Quantidades do Nuclídeo Pai e do Nuclídeo Filho pelo Tempo em um Decaimento Radioativo

Vale ressaltar que o número de mols pode ser substituído tanto pela atividade radioativa como pela massa do radioisótopo na equação acima, porque todas essas grandezas são diretamente proporcionais. Portanto, podemos dizer também que:

$$A(t) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$
$$m(t) = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$



A atividade radioativa é medida geralmente em Becquerel (Bq), que significa desintegrações por segundo. Já a massa é medida normalmente em gramas. Por isso, é muito comum que as questões forneçam uma determinada massa e peçam a sua atividade.

Para isso, você deverá fazer a conversão de número de mols em número de átomos multiplicando pelo número de Avogadro ( $N_{AV} = 6,02 \cdot 10^{23}$ ).

Vale ressaltar que a velocidade de desintegração igual a 1 Bq corresponde à desintegração de apenas um único átomo por segundo. Trata-se de uma taxa extremamente baixa, por isso, outras unidades podem ser utilizadas.

Por exemplo, o Curie (1 Ci) corresponde à radiação de uma fonte de 1 g de rádio-226, que foi o isótopo estudado por Marie e Pierre Curie nos seus primeiros trabalhos sobre radioatividade. O fator de conversão é que  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ .

Em laboratório, o equipamento utilizado para medir o nível de radiação é o **Contador Geiger**.



Figura 28: Contador Geiger (fonte: [7])

Como exemplo de uso dessa expressão, suponha que tenhamos uma amostra radioativa de  $^{14}\text{C}$ , cujo tempo de meia vida é  $t_{1/2} = 5600$  anos, que irradie 1 Bq. Qual será a atividade dessa amostra depois de 22400 anos?

E aí, já começou a calcular a resposta?

Tente fazer sozinho seguindo o procedimento que já ilustramos nesse capítulo.

Tentou?

E aí, conseguiu?

Posso resolver?

Então, vamos lá.

Primeiramente, devemos calcular quantos tempos de meia-vida já se passaram depois dos 22400 anos.

$$\frac{t}{t_{1/2}} = \frac{22400}{5600} = 4$$

Como já se passaram 4 tempos de meia-vida, a atividade da amostra radioativa já se reduziu à metade quatro vezes seguidas. Portanto, ela será:

$$A(t) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^4 = 1 \cdot \left(\frac{1}{2^4}\right) = \frac{1}{16} = 0,0625 \text{ Bq}$$

### 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.

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

Podemos ir além. Como sabemos a atividade dessa amostra, podemos calcular a massa de carbono-14 que apresenta a atividade exatamente igual a 1 Bq.

Para isso, devemos nos lembrar que a atividade se relaciona com o número de mols presentes na amostra através da constante de decaimento.

$$A = kn$$



Como a atividade está em Becquerel (desintegrações por segundo), é conveniente obter a constante de decaimento em segundo também.

$$k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0,693}{5600.365.24.3600} = 3,9.10^{-12} \text{ s}^{-1}$$

$$1 = 3,9.10^{-12} \cdot n$$

$$\therefore n = \frac{1}{3,9.10^{-12}} = 2,55.10^{11} \text{ átomos}$$

Vale ressaltar que, como o Becquerel equivale ao número de desintegrações por segundo, o resultado obtido não foi em número de mols, mas em número de átomos. Podemos converter dividindo pelo Número de Avogadro, que corresponde ao número de átomos que compõem um mol.

$$n = \frac{2,55.10^{11}}{6,02.10^{23}} = 4,2.10^{-13} \text{ mol}$$

Para obter a massa de carbono presente em  $4,2 \times 10^{-13}$  mol, precisamos multiplicar esse valor pela massa molar, que é 14 g/mol, tendo em vista que não estamos falando do elemento carbono, mas sim do isótopo  $^{14}\text{C}$ .

$$m = 4,2.10^{-13} \cdot 14 \cong 59.10^{-13} = 5,9.10^{-12} \text{ g} = 5,9.10^{-6} \mu\text{g}$$

Trata-se, portanto, de uma massa ínfima de carbono-14 que já é suficiente para ter uma desintegração por segundo.

Outro ponto a se comentar é que, como o tempo de meia-vida depende exclusivamente da constante de decaimento, os fatores que não afetam essa constante **k** também não afetam o tempo de meia-vida.

Portanto, o tempo de meia-vida também é independente de todo e qualquer fenômeno da eletrosfera.



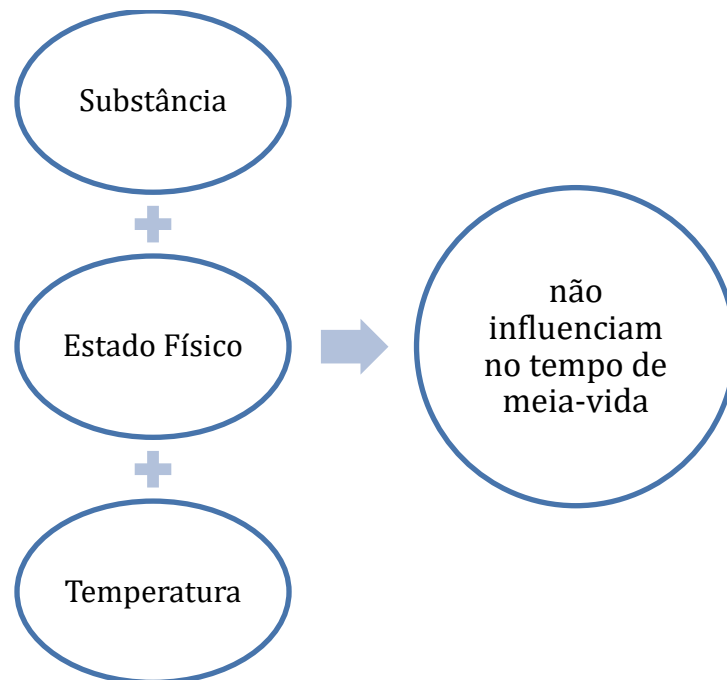


Figura 29: Fatores que não influenciam nem a atividade nem o tempo de meia-vida

Podemos dizer que o tempo de meia-vida e a constante de decaimento radioativo são **características do decaimento, não sendo influenciadas por nenhum fator externo.**

### 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 reduz a zero.

Na verdade, essa é uma força de expressão, porque, matematicamente, a atividade somente se anula depois de um tempo infinito.

Porém, em termos de ciência, podemos calcular o fator de redução da atividade depois de passadas 10 meias-vidas.

$$A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{10} = \frac{A_0}{1024} < 0,1\% \text{ de } A_0$$

Sendo assim, depois de passadas dez meias-vidas, a atividade de uma amostra radioativa atingiu menos de 0,1% do seu valor inicial. Trata-se, portanto, de uma redução muito grande.

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.



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.

Vou dar um tempo para você fazer sozinho.

Já tentou fazer?

Posso apresentar a minha solução?

Então, vamos lá.

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.

Em caso de um acidente em uma usina nuclear com esse isótopo, o seu tempo de meia-vida é tão curto que não dá tempo de os radioisótopos se dispersarem e atingirem alguma região em que haja uma população, mesmo um pequeno vilarejo.

Até mesmo, se pensarmos nos funcionários da usina que estão trabalhando próximos ao material, o tempo de 8 segundos é provavelmente insuficiente para atingir algum deles, mesmo que eles estejam a poucos metros de distância da fonte da radiação.

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  $^{14}\text{C}$ .



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.

Os materiais de tempo de meia-vida muito curto rapidamente dispersam sua atividade e ela se reduz a frações insignificantes em pouco tempo. Já os materiais de tempo de meia-vida muito longo apresentam atividades muito baixas devido ao seu baixo valor de constante de decaimento.

Os radioisótopos de tempo meia-vida relativamente curto encontram bastante aplicações na Medicina. Por exemplo, o iodo-131, cuja meia-vida é de 8 dias, é um radioisótopo muito utilizado para o tratamento de hipertireoidismo e câncer na tireóide.

A tireóide é uma glândula que tem grande afinidade pelo iodo, pois consome o elemento para a produção de seus hormônios. O tratamento consiste em injetar o iodo radioativo no corpo, que vai ser absorvido por essa glândula.

As partículas gama emitidas por sua radiação eliminam as células cancerígenas e o excesso de produção de hormônios. O interessante é que ele somente é absorvido pela tireóide, portanto, não provoca efeitos em outras partes do corpo humano.

Considerando um prazo de 10 meias-vidas, a sua atividade se reduz significativamente somente após 80 dias. Porém, como esse elemento é eliminado pelo metabolismo normal do corpo, é comum que o paciente tenha alta em algumas semanas após o tratamento. Recomenda-se apenas o cuidado com a urina e fezes, pois elas podem conter traços do elemento radioativo.

É interessante observar que o iodo-123, cuja meia vida é de apenas 13 horas, é também utilizado na Medicina, mas com o propósito de diagnóstico. No caso de tratamento de câncer, como sua atividade se esgotaria em 130 horas (ou pouco mais de 5 dias) e esse período não seria suficiente para eliminar as células cancerígenas, ele teria que ser administrado várias vezes no paciente.

### 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;
- **N<sub>0</sub>**: é a quantidade inicial de radioisótopos;
- **t**: é o tempo passado desde o início do decaimento;
- **t<sub>1/2</sub>**: 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**.

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

Outro ponto interessante que podemos comentar é que seguem a mesma lei de decaimento radioativo com o mesmo tempo de meia-vida todas as medidas que são diretamente proporcionais ao número de radioisótopos. Entre elas, podemos destacar:

- A massa do radioisótopo;
- A atividade do radioisótopo.

Portanto, podemos escrever as mesmas equações de decaimento tanto para a massa como para a atividade.

$$m = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$
$$A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

## 5.3. Dose de Radiação Letal ao Ser Humano

Esse é um tema que eu nunca vi ser cobrado em provas, porém, é muito útil para você realmente entender de uma maneira mais prática o assunto. Além disso, vale ressaltar que os





vestibulares têm trazido cada vez mais temas práticos, por isso, acredito que é bastante possível que a dose de radiação venha a ser cobrada.

O primeiro ponto que precisamos entender é que a atividade em Becquerel ou em Curie de uma amostra radioativa qualquer é pouco relevante para saber se oferece potenciais danos ao ser humano. Pouco importa se você está exposto a uma atividade muito elevada de radiação, se essa radiação não for ionizante.

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.

Outra unidade comum é o **sievert** (Sv), que multiplica a dose de radiação em Gy por um fator que leva em consideração os efeitos biológicos da radiação.

O diagnóstico de uma pessoa atingida por uma dose intensa de radiação é a Síndrome Aguda de Radiação (SAR). É interessante observar que, como a radiação pode atacar diretamente moléculas essenciais ao metabolismo humano, os seus efeitos se prolongam por vários dias. Sendo assim, mesmo a exposição por um curtíssimo período de tempo pode ser suficiente para levar um ser humano à morte.

A dose de radiação média durante um exame raio-X é da ordem de mGy ( $10^{-3}$  Gy), que é uma dose muito leve. Vale lembrar que os raios-X, que são provenientes de transformações na eletrosfera, são muito menos energéticos que os raios gama, que são provenientes de fenômenos nucleares.

Acima de 1 Gy de radiação, a radiação incomoda bastante o ser humano, podendo provocar de náuseas e vômitos à morte de células sanguíneas. Acima de 4 Gy, a dose pode ser fatal, causando sérios danos neurológicos às pessoas expostas.



O Contador Geiger mede sempre a atividade radioativa, mas pode ser configurado para calcular a dose de radiação em Gy ou Sv.

## 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,  $n(t) = n_0/2$ .

$$n(t_{1/2}) = n_0 \cdot e^{-kt_{1/2}}$$

$$\frac{n_0}{2} = n_0 \cdot e^{-kt_{1/2}}$$

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.



## 7. (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**

---

### 8. (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.

$$k = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} = \frac{0,693}{29.365.24.3600} = 7,6 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

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.

$$m = 0,71 \cdot 90 \cdot 10^{-6} \cong 64 \cdot 10^{-6} \text{ g} = 64 \mu\text{g}$$

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

## 9. (TFC – 2019 – Inédita)

Marie e Pierre Curie descobriram que a radiação proveniente de uma fonte de rádio-226 era bem mais intensa do que a do urânio. Por causa disso, eles aprofundaram seus estudos no elemento. Determine a atividade de 1,0 g em Becquerel de uma amostra de rádio-226, sabendo que o seu tempo de meia-vida 1600 anos. Considere que a massa atômica do núclídeo seja igual a seu número de massa.

## Comentários



A atividade de uma amostra radioativa é proporcional ao número de núclídeos presentes na amostra.

$$Atv = CN$$

A constante de decaimento radioativo, por sua vez, pode ser calculada pelo tempo de meia vida.

$$C = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0,69}{1600} = 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ anos}^{-1}$$

Agora, precisamos calcular o número de núclídeos presentes na amostra de 1 g de rádio-226. Primeiramente, podemos calcular o número de mols pela razão entre a massa presente e a massa molar do radioisótopo.

$$n = \frac{m}{M} = \frac{1}{226} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

Agora, podemos converter para número de átomos multiplicando pelo Número de Avogadro.

$$N = 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{23} = 2,64 \cdot 10^{21} \text{ átomos}$$

Agora, podemos calcular

$$Atv = 2,64 \cdot 10^{21} \cdot 4,3 \cdot 10^{-4} = 1,13 \cdot 10^{18} \text{ desintegrações por ano}$$

$$Atv = \frac{1,13 \cdot 10^{18}}{365 \cdot 24 \cdot 3600} = 3,6 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Vale ressaltar que a atividade radioativa calculada é definida como 1 Ci (Curie), que é muito utilizado como unidade de medida de radiação.

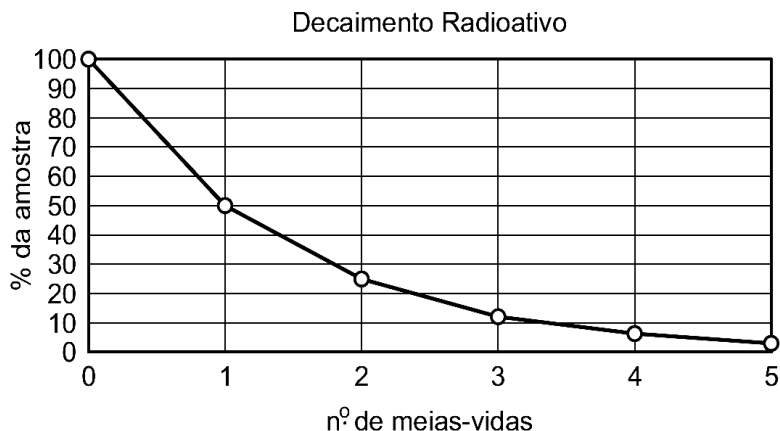
**Gabarito:  $3,6 \cdot 10^{10}$  Bq**

---

## 10. (TFC – Inédita)

Considere o seguinte gráfico de decaimento radioativo.





As águas termais são fontes de águas aquecidas pela energia liberada no decaimento do isótopo  $^{238}\text{U}$ . Estima-se que elas tenham surgido há cerca de 3,5 bilhões de anos.

Sabendo que a meia-vida do  $^{238}\text{U}$  é 4,5 bilhões de anos e que esse isótopo é utilizado para datação da idade da Terra, a porcentagem de  $^{238}\text{U}$  atual, considerando a época de formação das fontes de águas termais, corresponde a, aproximadamente,

- a) 60,0%
- b) 75,0%
- c) 12,5%
- d) 30,0%
- e) 50,0%

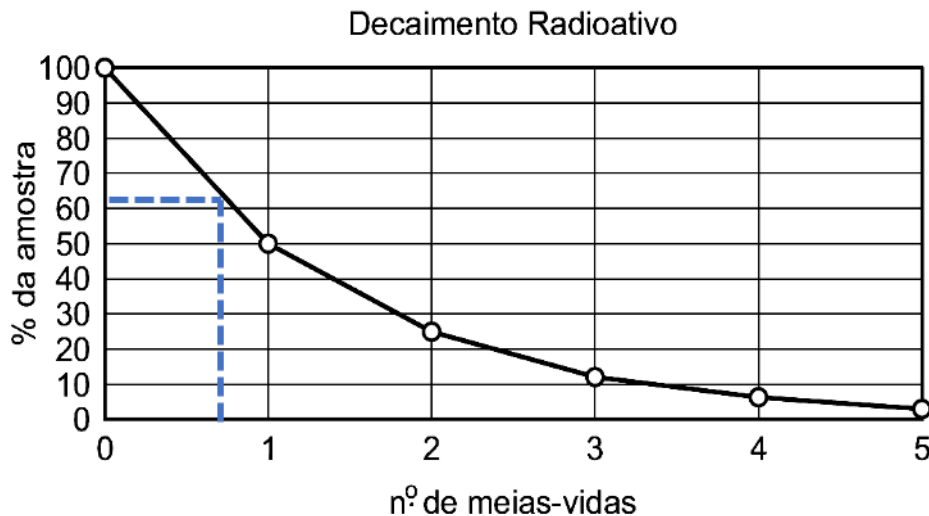
### Comentários

O número de meias-vidas que decorram é obtido dividindo a idade das fontes termais pela meia-vida do radioisótopo.

$$t = \frac{3,5}{4,5} = \frac{7}{9} \cong 0,78$$

Agora, vamos olhar no gráfico para ter um valor aproximado do estágio do decaimento.





Pelo gráfico, temos que a massa restante de  $^{238}\text{U}$  é aproximadamente 60 % da massa inicial.

**Gabarito: A**

### 11. (TFC – Inédita)

Sobre os efeitos e aplicações da radiação, assinale a única afirmação **FALSA**.

- A energia cinética das partículas  $\alpha$  (alfa) oriundas da desintegração do rádio-226 é convertida em energia térmica após as colisões.
- A radioatividade está presente em todos os seres humanos, como por exemplo, o isótopo radioativo carbono-14.
- Os raios gama e os nêutrons não apresentam efeitos graves nos seres humanos, por conta de sua pequena capacidade de penetração.
- As radiações nucleares provocam ionização com alterações moleculares, formando espécies químicas que causam danos às células.

### Comentários

Vamos analisar separadamente cada uma das afirmações.

- Mais uma questão de Física. De fato, em uma colisão qualquer, é liberada energia. Afirmação correta.
- O ser humano absorve o carbono naturalmente como parte do seu metabolismo. Como o radioisótopo  $^{14}\text{C}$  apresenta as mesmas propriedades químicas dos demais isótopos, nós o absorvemos na mesma proporção em que ele existe no ambiente. Portanto, o nosso corpo, de fato, emana radioatividade. Afirmação correta.



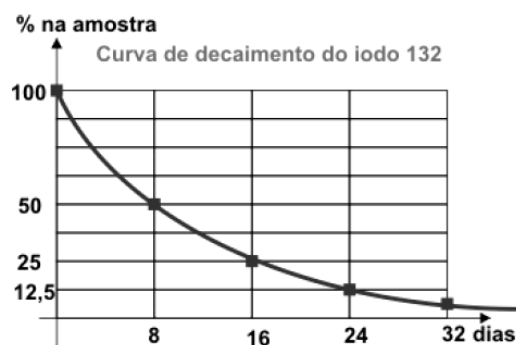


- c) Pelo contrário, essas partículas são as que possuem maior poder de penetração. Os raios gama somente podem ser detidos por uma parede de chumbo. Já os nêutrons são ainda mais penetrantes que os raios gama. Afirmação errada.
- d) Esse é o grande perigo das radiações. Quando atingem a matéria, podem ionizar e provocar alterações estruturais em moléculas vitais ao metabolismo celular. Afirmação correta.

**Gabarito: C**

## 12. (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**

---

### 13. (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 césio-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  $^{137}\text{Cs}$ ?

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

### Comentários

O decaimento do césio 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.

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

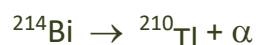
Agora, basta calcular o tempo.

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

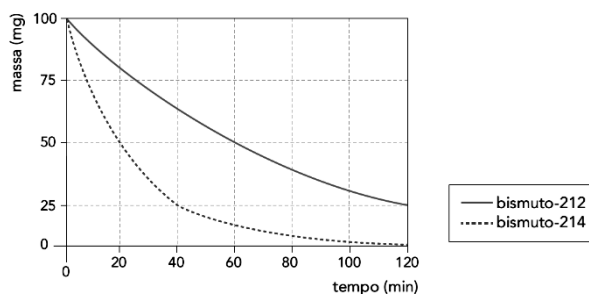
**Gabarito: C**

#### 14. (TFC – Inédita)

Em um experimento, foi utilizada uma amostra de 100 mg contendo partes iguais dos radioisótopos bismuto-212 e bismuto-214. Suas respectivas reações nucleares de decaimento estão indicadas abaixo:



No gráfico a seguir, foram desenhadas curvas que representam as variações das massas desses radioisótopos ao longo das duas horas de duração do experimento.



Com base nas informações apresentadas:

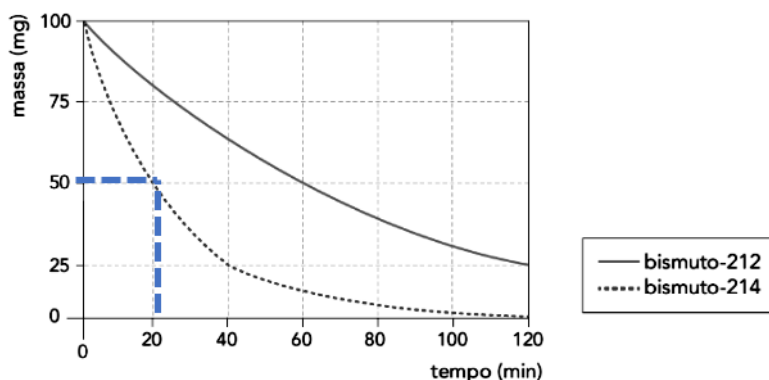
a) Determine o tempo de meia-vida do radioisótopo  ${}^{214}\text{Bi}$ .



- b) Determine a velocidade média de formação de partículas  $\beta$ , em partícula  $\times h^{-1}$ , no tempo total do experimento.

### Comentários

Vamos traçar no gráfico o momento em que a massa do bismuto-214 se reduz à metade.



Encontramos, portanto, o valor de 20 minutos.

Já as partículas beta são formadas pelo bismuto-212. Observe que tínhamos uma massa inicial de 100 g que se reduziu a 25 g no período de 120 minutos (ou 2 horas). Vamos calcular a variação de número de mols ocorrida.

$$\Delta n = \frac{\text{variação da massa}}{\text{massa molar}} = \frac{(100 - 25) \cdot 10^{-3}}{212} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{212} \cong 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

O número de mols de partícula beta produzidas corresponde exatamente ao número de mols decaídos de  $^{212}\text{Bi}$ .

$$v = \frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{0,35 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,175 \cdot 10^{-3} \text{ mol/h}$$

Para converter de mol por hora em partícula por hora, devemos multiplicar pelo Número de Avogadro.

$$v = 0,176 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{23} = 1,06 \cdot 10^{20} \text{ partícula} \cdot h^{-1}$$

**Gabarito: 20 minutos;  $1,06 \cdot 10^{20}$**

## 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.

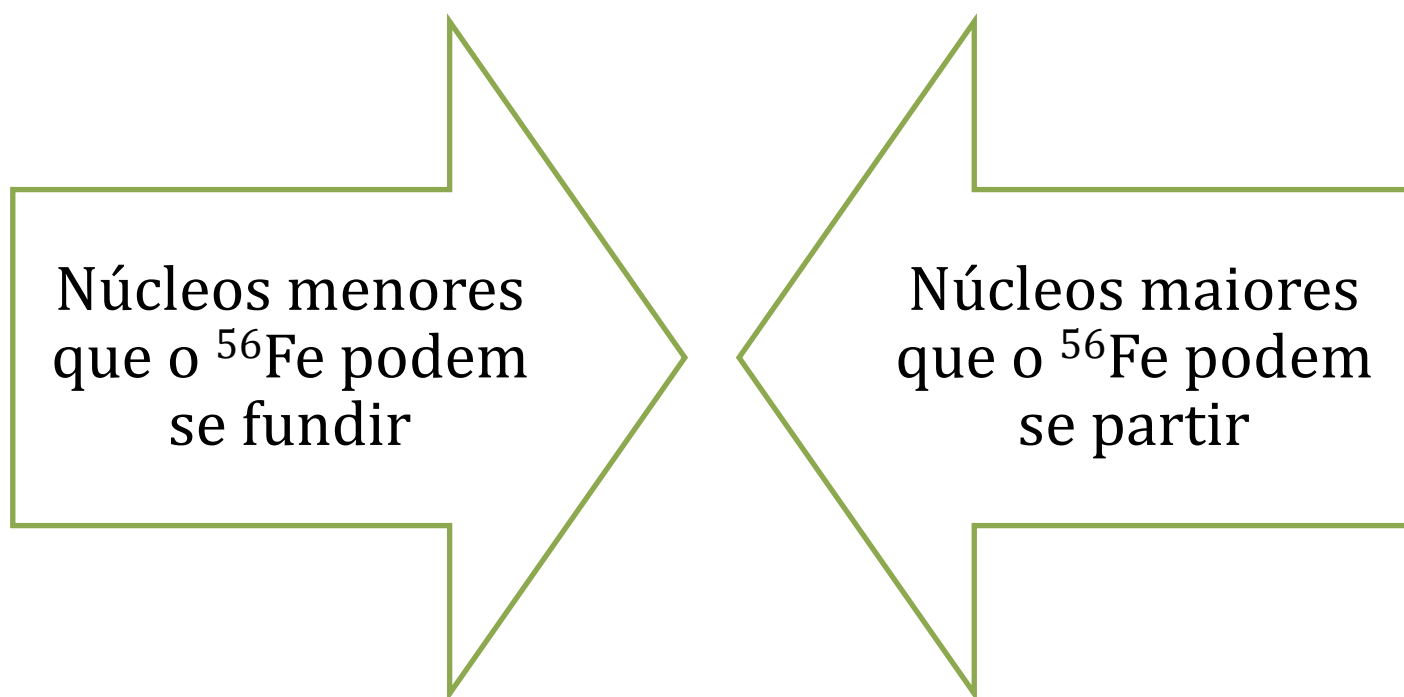
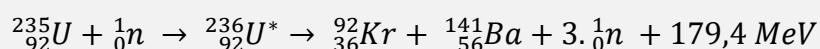


Figura 30: Fissão e Fusão Nuclear

### 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.



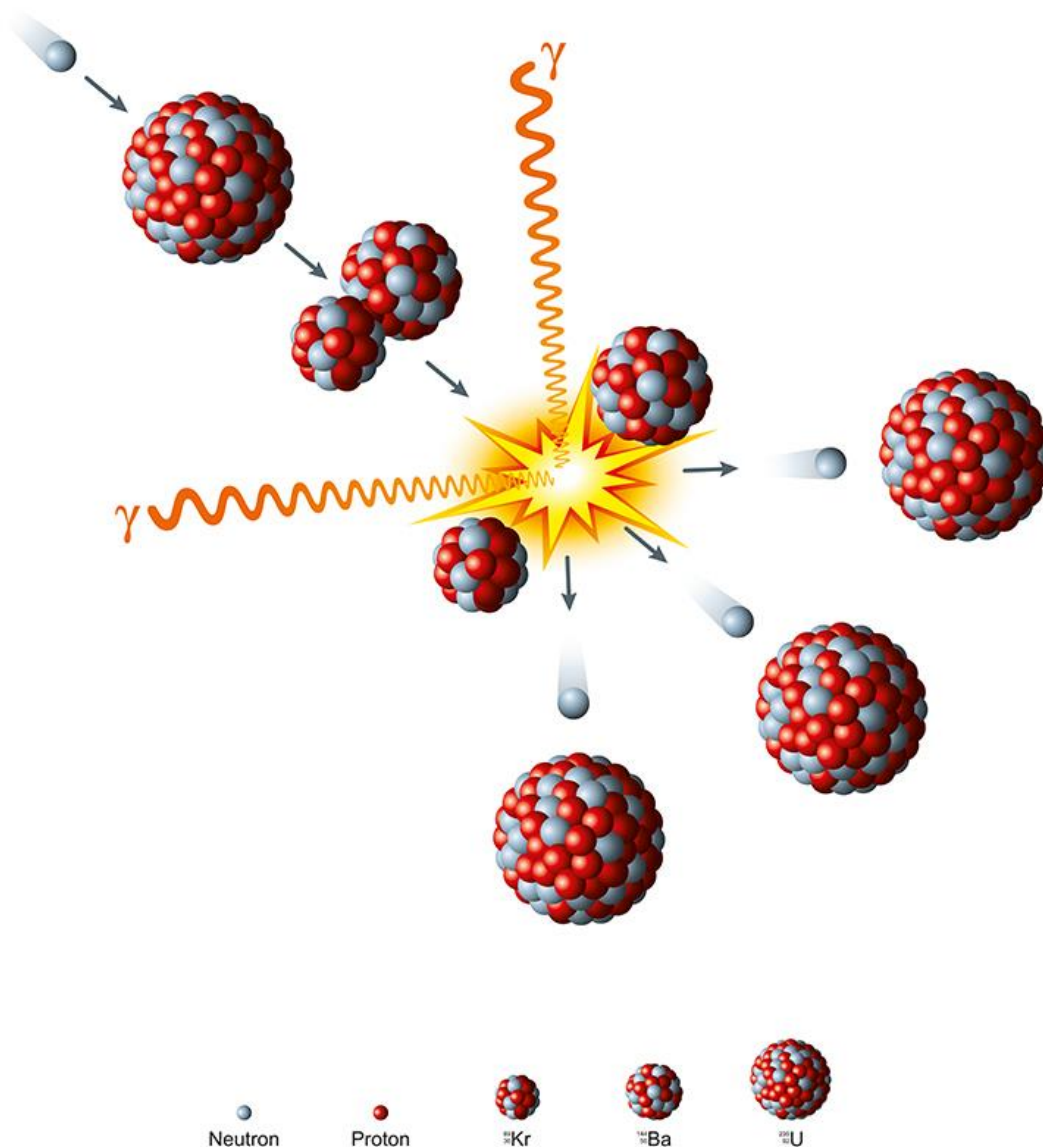


Figura 31: Fissão Nuclear do Urânio (fonte: [8])

É importante esclarecer que a fissão nuclear não envolve somente a quebra do núcleo de urânio-235. Quando falamos em quebrar um núcleo, falamos em **afastar completamente** os prótons e nêutrons que o compõem. Esse processo é sempre bastante endotérmico, ou seja, requer muita energia.

Considere, por exemplo, a quebra do núcleo de hélio-4. Esse núcleo possui energia de ligação de 28,3 MeV. Isso significa que é necessário fornecer essa quantidade imensa de energia para romper o núcleo.

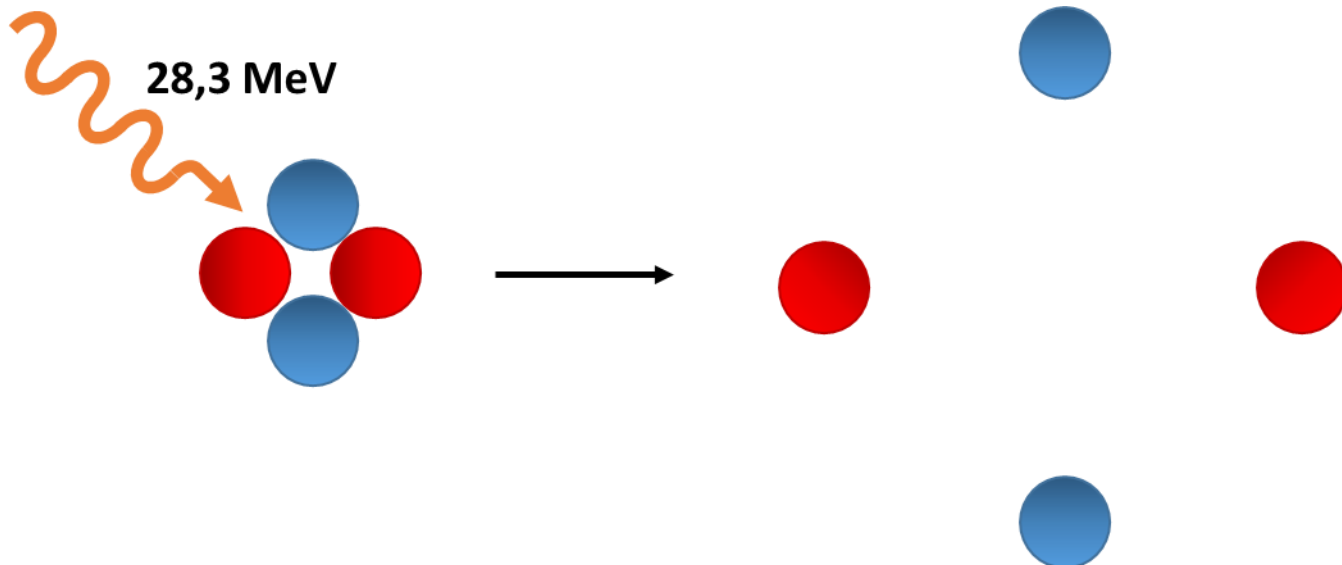


Figura 32: Quebra Pura e Simples de um Núcleo

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.

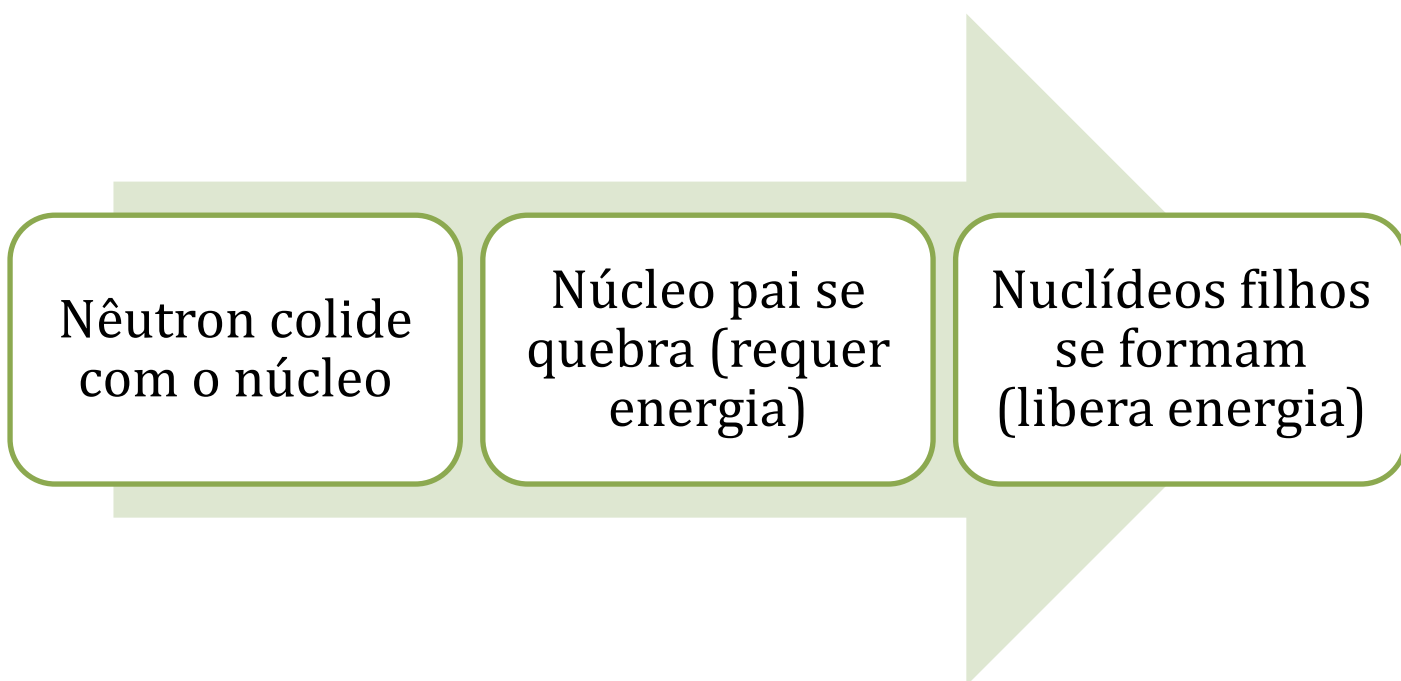


Figura 33: Esquematização da Fissão Nuclear

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.

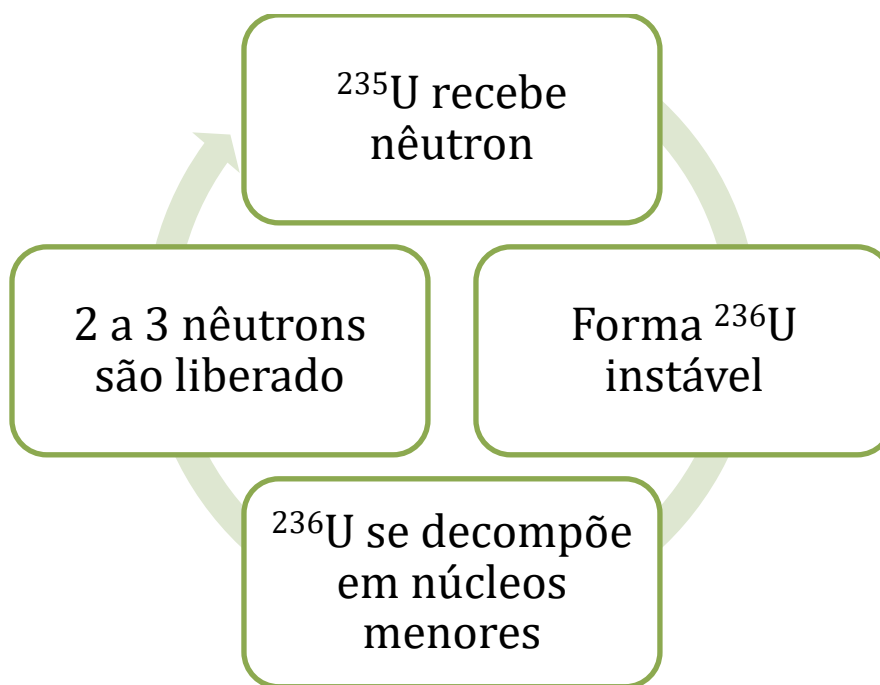


Figura 34: Fissão do  $^{235}\text{U}$  é uma reação em cadeia

Dessa maneira, podemos concluir que a parte difícil de acontecer em uma fissão nuclear é a quebra do primeiro núcleo de urânio-235. Uma vez quebrado o primeiro núcleo, ele liberará energia e nêutrons que serão suficientes para quebrar os próximos núcleos.

Portanto, o estudo da fissão nuclear passa por entender o que é necessário para iniciar a reação, tendo em vista que, uma vez iniciada, o processo se alimenta.

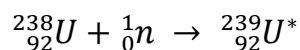
O primeiro ponto é **a energia necessária** para começar a fissão de um núcleo pesado, que é da ordem de 7 a 8 MeV.

Essa quantidade de energia é inferior ao que é necessário para quebrar completamente um núcleo – por exemplo, a quebra do hélio-4 requer 28,3 MeV. Porém, é muito superior à quantidade de energia que é liberada nas reações químicas, que são fenômenos da eletrosfera.



Por esse motivo, a fissão nuclear é muito difícil de ser detonada. Se o isótopo não se fissionar espontaneamente, não será possível processar a transmutação.

É por isso que o urânio-238, que é o isótopo mais abundante desse elemento, não fissiona. Embora ele possa absorver um nêutron, formando o isótopo instável urânio-239, a energia de excitação é de apenas 5 MeV, não sendo suficiente para iniciar a fissão.



Como não há energia suficiente para fissionar o núcleo de  ${}^{239}\text{U}^*$ , esse núcleo atinge a estabilidade por meio da simples emissão de partículas gama ou pela emissão de partículas alfa, formando núcleos menores.

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 6: Massa Crítica dos Principais Isótopos Fissionáveis*

Isótopo	Massa Crítica
Urânio-233	15 kg
Urânio-235	50 kg
Neptúnio-236	7 kg

Isótopo	Massa Crítica
Neptúncio-237	60 kg
Plutônio-238	9 kg
Plutônio-239	10 kg
Plutônio-240	40 kg
Plutônio-242	100 kg
Americío-241	60 a 100 kg
Americío 242	9 a 18 kg
Americío 243	50 a 150 kg
Califórnio-249	6 kg
Califórnio-251	5 kg

### 6.1.2. Nuclídeos Formados

Já analisamos a primeira etapa da fissão nuclear, que é o rompimento dos núcleos, e as condições necessárias.

Agora, vamos estudar a segunda etapa, que é a formação propriamente dos nuclídeos filhos.

Tão logo os prótons e nêutrons presentes no núcleo de urânio-235 ou de qualquer outro isótopo fissionável sejam parcialmente liberados, eles serão muito reativos. Com isso, os prótons e nêutrons se reúnem facilmente com tudo o que está em volta deles.

Tente imaginar que você pegou um martelo e vai usá-lo para quebrar uma placa de vidro em duas partes iguais. Você até pode bater várias vezes no mesmo lugar, mas, muito provavelmente, os pedaços formados serão diferentes.

Por isso, 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.



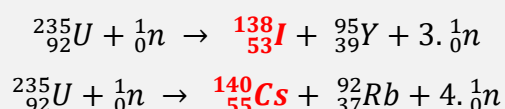
Os produtos principais da fissão do urânio-235 são, de fato,  ${}^{92}_{36}\text{Kr} + {}^{141}_{56}\text{Ba}$ . Porém, esses isótopos não são preocupantes. Eles apresentam tempos de meia-vida muito curtos: o criptônio-92 apresenta 1,8 segundos, enquanto que o bário-142 apresenta 8,3 minutos. Além disso, 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 césio-137 (30 anos) e o iodo-131 (8 dias).

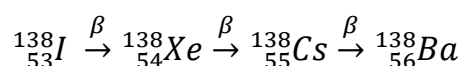
O primeiro apresenta uma meia-vida média – sua radiação permanece no local em foi aplicada por mais de 100 anos em níveis acima do tolerável pelo ser humano. É perigoso também por ser volátil, com ponto de fusão de  $28^{\circ}\text{C}$ , o que significa que, apesar de ser sólido, ele pode se dispersar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



É interessante observar que o urânio-235 possui uma relação N/P muito elevada em relação aos núcleos menores. Por isso, quando ele se parte, é natural que os isótopos formados tenham mais nêutrons do que seriam necessários para estabilizar o núcleo. Por exemplo, os isótopos mais abundantes do iodo e do césio são, respectivamente  ${}^{127}\text{I}$  e  ${}^{133}\text{Cs}$ . Ambos são bastante estáveis.

O iodo-138, por exemplo, emite uma série partículas beta para se transformar no núcleo estável de bário-138.



### 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.

A descoberta dessas partículas ocorreu no ano de 1932 quando o físico inglês James Chadwick quando fez que feixes de partículas alfa colidissem com uma amostra de berílio. Dessa colisão, foi observado um tipo de radiação que não era defletida por campos elétricos, portanto, não apresentava carga.

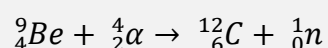
Com base nisso, muitos cientistas acreditavam que eram raios gama. Porém, James Chadwick constatou que, na verdade, essas partículas apresentavam massa muito próxima da massa do próton. Por suas contribuições, James Chadwick foi laureado com o Prêmio Nobel de Física em 1935.



É importante constatar que os nêutrons haviam sido especulados inicialmente por Rutherford, que lançou a hipótese de que um próton poderia absorver um elétron, formando uma partícula de massa igual à do próton, mas carga nula.

*Figura 35: James Chadwick foi o responsável pela descoberta do nêutron (fonte: [12])*

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



Esse processo é de bastante importância, pois o berílio é uma das principais fontes de nêutrons para o processo de fissão nuclear.

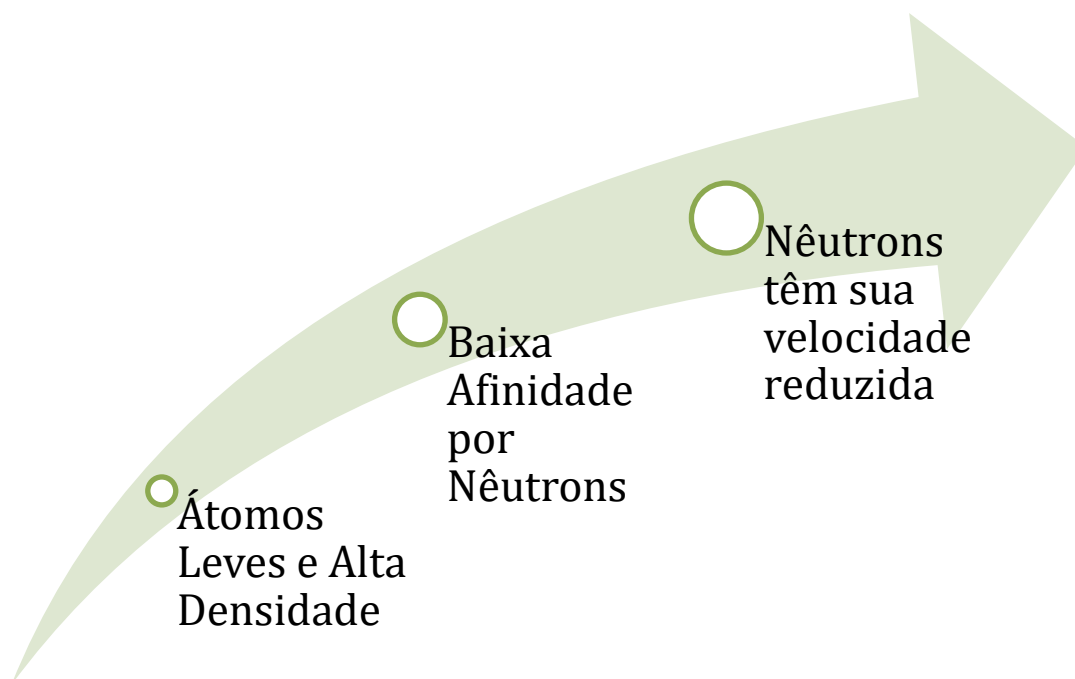
De maneira geral, as reações nucleares são bastante exotérmicas, por isso, os nêutrons emitidos costumam ser bastante rápidos, tendo energia superior a 2 MeV. São tão rápidos que escapam com facilidade do reator de fissão.

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.

Vale ressaltar que o elemento utilizado deve ser leve, pois os elementos mais pesados podem absorver nêutrons mais facilmente. Porém, o ideal é que eles tenham a maior densidade possível, pois maior densidade é sinal da maior proporção de núcleos por volume possível. Sendo assim, substâncias no estado gasoso devem ser evitadas.

Sucessivas colisões com os núcleos do moderador diminuem a energia cinética dos nêutrons, tornando-os aptos a participar da fissão nuclear.

Podemos resumir as características de um bom moderador de velocidade.



*Figura 36: Características de um Bom Moderador de Velocidades*

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  $^{12}C$ , 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  $^{238}U$  e apenas 0,7% em massa do isótopo  $^{235}U$ , que é físsil.

Em geral, nos reatores de fissão nuclear, precisa-se utilizar um teor de cerca de 3% do isótopo  $^{235}U$ , 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.

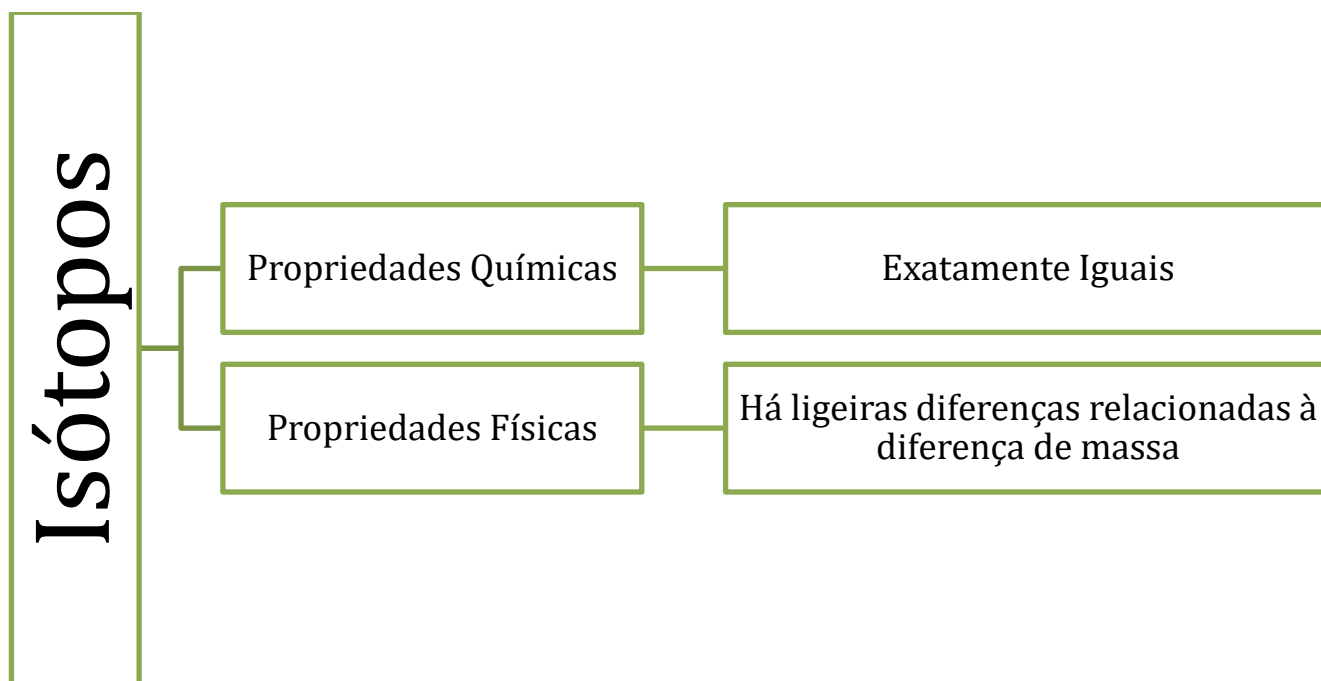
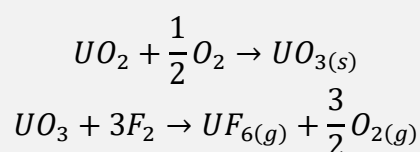


Figura 37: Diferenças entre Propriedades Físicas e Químicas dos Isótopos

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  $\text{UO}_2$ , já que esse minério é sólido.

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

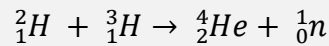


O hexafluoreto de urânio é submetido à centrífuga. Como as diferenças de massa entre os dois isótopos de urânio a serem separados são muito pequenas, o processo é extremamente lento e caro. Por isso, somente para fins militares é que se costuma obter purezas superiores do isótopo  $^{235}\text{U}$ .

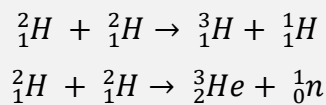
## 6.2. Fusão Nuclear

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.



Outras reações também muito comuns envolvem apenas o deutério.



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.

Outro ponto a se comentar é que a energia liberada é muito superior. Enquanto que fissão completa de 1 g de urânio leva à liberação de energia correspondente a 18 toneladas de TNT, a fusão completa de 1 g de deutério leva à liberação da mesma quantidade de energia corresponde a incríveis 58 toneladas de TNT.

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



Fonte Limpa de Energia

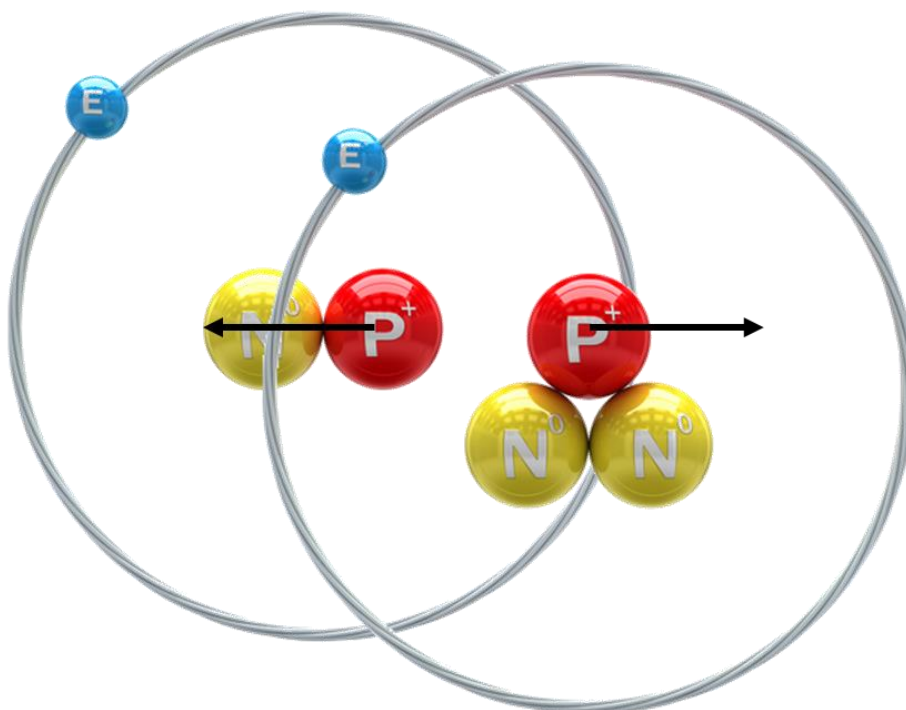
Subprodutos não são radioativos

Quantidade de energia liberada é muito superior

O hidrogênio é muito abundante na Terra

*Figura 38: Vantagens da Fusão Nuclear em Relação à Fissão*

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



*Figura 39: Repulsão Eletrostática entre dois prótons*



As forças nucleares só possuem alcance muito curto, de certa de alguns fentômetros. Até conseguir aproximar tanto dois átomos de hidrogênio, é necessário vencer a intensa repulsão eletrostática entre eles, **já que os prótons são cargas de mesmo sinal.**

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.



---

É importante observar que já comentamos que a temperatura não influencia nos processos radioativos, tendo em vista que a agitação térmica comum somente influencia a distância entre duas eletrosferas, o que altera apenas propriedades, como as forças intermoleculares, que nada influenciam o núcleo.

Porém, no estado de plasma, a milhões de graus Celsius, as temperaturas são tão elevadas que a energia cinética dos átomos é suficiente para desafia a repulsão eletrostática entre os prótons, o que começa a influenciar os fenômenos nucleares, entre os quais, se inclui a fusão nuclear.

---

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.

A fusão não poderia acontecer dentro de um recipiente sólido, por exemplo, um reator de aço, pois, ao entrar em contato com esse material, o plasma provocaria a sua rápida vaporização, sendo impossível de controlá-lo. 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.

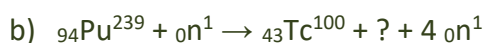
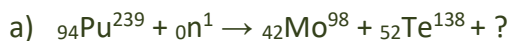
O estudo mais aprofundado da fusão até construir um reator de fusão em que a reação poderia acontecer de maneira controlada é uma das invenções mais aguardadas pela Ciência. Considero também que será uma grande revolução na produção de energia no mundo inteiro, tendo em vista o seu leque de vantagens.



HORA DE  
PRATICAR!

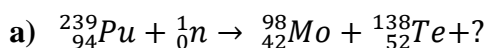
### 15. (TFC – 2019 – Inédita)

Complete as equações nucleares de fissão do plutônio-239.



### Comentários

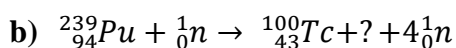
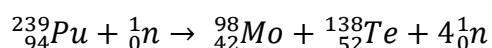
Para resolver essa questão, devemos



$$94 + 0 = 42 + 52 + Z \quad \therefore Z = 0$$

$$239 + 1 = 98 + 138 + A \quad \therefore A = 4$$

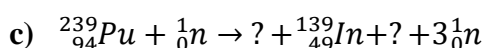
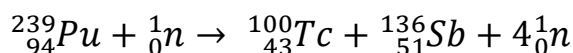
Portanto, foram expelidos quatro núcleos. Podemos escrever a equação nuclear completa para a fissão nuclear desse isótopo.



$$94 + 0 = 43 + Z + 0 \quad \therefore Z = 51$$

$$239 + 1 = 100 + A + 4 \quad \therefore A = 136$$

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.

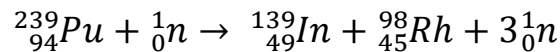


$$94 + 0 = 49 + Z + 0 \quad \therefore Z = 45$$

$$239 + 1 = 139 + A + 3 \quad \therefore A = 98$$



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)  $4 {}_0n^1$ ; b)  ${}_{51}\text{Sb}^{136}$ ; c)  ${}_{45}\text{Rh}^{98}$

---

### 16. (TFC – Inédita)

A respeito dos processos de fissão e fusão nuclear, assinale a alternativa correta.

- a) Na fusão nuclear, núcleos atômicos menores formando núcleos atômicos maiores, absorvendo uma grande quantidade de energia.
- b) A fissão nuclear é o processo utilizado na produção de energia nas usinas atômicas, porque apresenta baixo impacto ambiental, sendo considerada uma energia limpa e sem riscos.
- c) A energia liberada pelo Sol se deve às reações de fissão nuclear que ocorrem na estrela.
- d) A equação:  ${}_0n^1 + {}_{92}\text{U}^{235} \rightarrow {}_{56}\text{Ba}^{140} + {}_{36}\text{Kr}^{93} + 3 \cdot {}_0n^1$  representa uma reação de fissão nuclear.
- e) O processo de fusão nuclear foi primeiramente dominado pelos americanos para a construção das bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki.

### Comentários

A questão busca confundir os conceitos de fissão e fusão nuclear.

- a) A fusão libera energia, não absorve. Por isso, a letra A está errada.
- b) A fissão nuclear, de fato, é utilizado nas usinas atômicas. Mas a sua grande desvantagem reside no fato de que possui elevado impacto ambiental, pois pode gerar isótopos radioativos, como césio-140 e iodo-131. Alternativa errada.
- c) A energia do Sol é liberada por fusão nuclear. Alternativa errada.
- d) A equação representada representa a fissão do núcleo de urânio. Alternativa correta.
- e) A bomba atômica se baseia em um processo de fissão nuclear, não fusão. Alternativa errada.

**Gabarito:** D

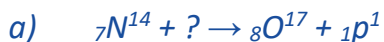
---



## 7. Lista de Questões Propostas

### 1. (TFC – 2019 – Inédita)

Complete as seguintes equações nucleares:



### 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?



### 3. (TFC – 2019 – Inédita)

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



### 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,

- 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.

## 5. (Escola Bahiana de Medicina e Saúde Pública – 2017)

O radionuclídeo  ${}^{67}_{31}\text{Ga}^*$ , cuja meia-vida é igual a três dias, é utilizado na Medicina Nuclear no tratamento de tumores linfáticos. Uma vez introduzido no corpo, as emissões de radioisótopos emitem raios gama por meio do seguinte decaimento:



Tendo em vista as informações do texto e os conhecimentos sobre radioatividade, é correto afirmar:

- a) As radiações gama,  ${}^0_0\gamma$ , são mais penetrantes, porém menos ionizantes que as partículas alfa,  ${}_{2}\alpha^{4}$ , e beta,  ${}_{-1}\beta^{0}$ .
- b) Os radionuclídeos utilizados em Medicina Nuclear devem possuir meia-vida bastante longa.
- c) As propriedades químicas do gálio 67 se modificam com as emissões radioativas.
- d) A razão próton/nêutron do radionuclídeo gálio 67 é, aproximadamente, 0,86.
- e) Ao emitir radiação gama,  ${}^0_0\gamma$ , o nuclídeo gálio 67 é desestabilizado.

## 6. (TFC – Inédita)

Com relação aos conceitos associados à radioatividade, assinale a alternativa correta.

- a) Quando um átomo é bombardeado com partículas  $\alpha$  e/ou partículas  $\beta$ , sofrendo uma desintegração nuclear, diz-se que ele sofreu um decaimento radioativo.
- b) Quando um núcleo atômico emite uma partícula  $\alpha$ , ele perde um próton e um nêutron.



- c) A radiação gama não é uma partícula propriamente dita, mas sim uma onda eletromagnética transversal.
- d) O período de semidesintegração é o tempo necessário para que todos os átomos radioativos existentes em uma certa amostra transmutem-se em átomos estáveis.
- e) A radioatividade consiste na emissão de partículas e radiações eletromagnéticas por núcleos atômicos instáveis. Esses núcleos atômicos sempre se transformam em núcleos estáveis após o primeiro decaimento radioativo.

### 7. (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) Nobelio-255,  $k = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

### 8. (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:

- 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 =  $6 \cdot 10^{23}$ .

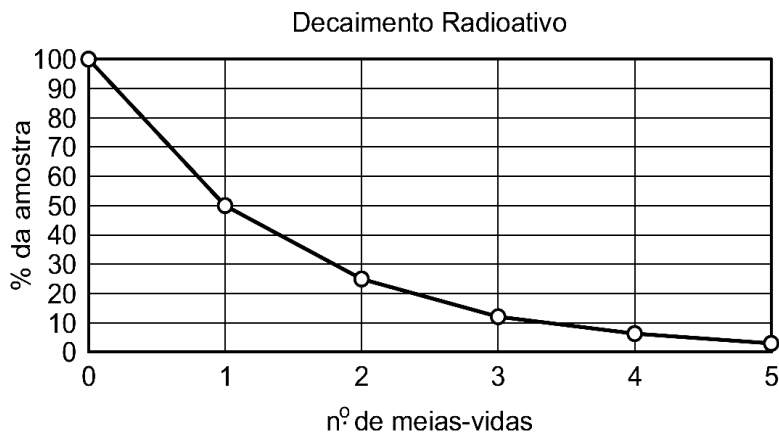
### 9. (TFC – 2019 – Inédita)

Marie e Pierre Curie descobriram que a radiação proveniente de uma fonte de rádio-226 era bem mais intensa do que a do urânio. Por causa disso, eles aprofundaram seus estudos no elemento. Determine a atividade de 1,0 g em Becquerel de uma amostra de rádio-226, sabendo que o seu tempo de meia-vida 1600 anos. Considere que a massa atômica do nuclídeo seja igual a seu número de massa.

### 10. (TFC – Inédita)

Considere o seguinte gráfico de decaimento radioativo.





As águas termais são fontes de águas aquecidas pela energia liberada no decaimento do isótopo  $^{238}\text{U}$ . Estima-se que elas tenham surgido há cerca de 3,5 bilhões de anos.

Sabendo que a meia-vida do  $^{238}\text{U}$  é 4,5 bilhões de anos e que esse isótopo é utilizado para datação da idade da Terra, a porcentagem de  $^{238}\text{U}$  atual, considerando a época de formação das fontes de águas termais, corresponde a, aproximadamente,

- a) 60,0%
- b) 75,0%
- c) 12,5%
- d) 30,0%
- e) 50,0%

### 11. (TFC – Inédita)

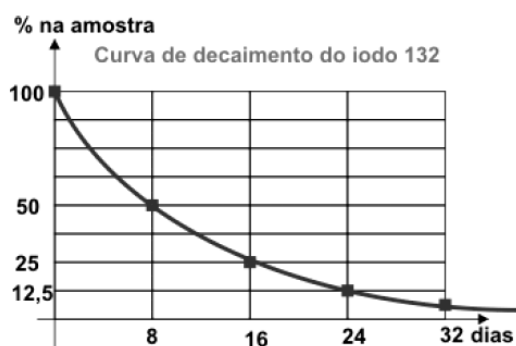
Sobre os efeitos e aplicações da radiação, assinale a única afirmação **FALSA**.

- a) A energia cinética das partículas  $\alpha$  (alfa) oriundas da desintegração do rádio-226 é convertida em energia térmica após as colisões.
- b) A radioatividade está presente em todos os seres humanos, como por exemplo, o isótopo radioativo carbono-14.
- c) Os raios gama e os nêutrons não apresentam efeitos graves nos seres humanos, por conta de sua pequena capacidade de penetração.
- d) As radiações nucleares provocam ionização com alterações moleculares, formando espécies químicas que causam danos às células.

### 12. (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.

### 13. (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 césio-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  $^{137}\text{Cs}$ ?

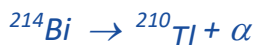
- a) 90
- b) 120
- c) 150
- d) 180
- e) 210

### 14. (TFC – Inédita)

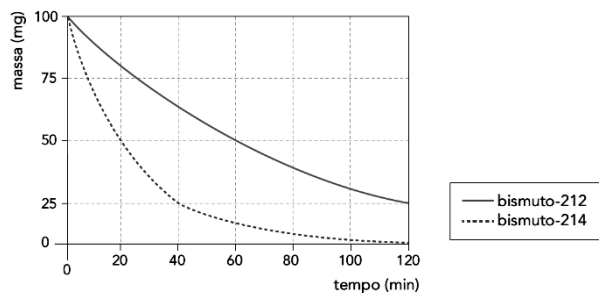




Em um experimento, foi utilizada uma amostra de 100 mg contendo partes iguais dos radioisótopos bismuto-212 e bismuto-214. Suas respectivas reações nucleares de decaimento estão indicadas abaixo:



No gráfico a seguir, foram desenhadas curvas que representam as variações das massas desses radioisótopos ao longo das duas horas de duração do experimento.



Com base nas informações apresentadas:

- Determine o tempo de meia-vida do radioisótopo  ${}^{214}\text{Bi}$ .
- Determine a velocidade média de formação de partículas  $\beta$ , em partícula  $\times h^{-1}$ , no tempo total do experimento.

## 15. (TFC – 2019 – Inédita)

Complete as equações nucleares de fissão do plutônio-239.

- ${}_{94}\text{Pu}^{239} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{42}\text{Mo}^{98} + {}_{52}\text{Te}^{138} + ?$
- ${}_{94}\text{Pu}^{239} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{43}\text{Tc}^{100} + ? + 4 {}_0n^1$
- ${}_{94}\text{Pu}^{239} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{49}\text{In}^{139} + ? + 3 {}_0n^1$

## 16. (TFC – Inédita)

A respeito dos processos de fissão e fusão nuclear, assinale a alternativa correta.

- Na fusão nuclear, núcleos atômicos menores formando núcleos atômicos maiores, absorvendo uma grande quantidade de energia.
- A fissão nuclear é o processo utilizado na produção de energia nas usinas atômicas, porque apresenta baixo impacto ambiental, sendo considerada uma energia limpa e sem riscos.
- A energia liberada pelo Sol se deve às reações de fissão nuclear que ocorrem na estrela.

- d) A equação:  ${}_0n^1 + {}_{92}U^{235} \rightarrow {}_{56}Ba^{140} + {}_{36}Kr^{93} + 3. {}_0n^1$  representa uma reação de fissão nuclear.
- e) O processo de fusão nuclear foi primeiramente dominado pelos americanos para a construção das bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki.

### 17. (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.

### 18. (IME – 2020 – 1ª Fase)

A respeito das reações abaixo:

- I.  ${}_{13}^{27}Al + {}_2^4\alpha \rightarrow {}_{15}^{30}P + {}_0^1n$
- II.  ${}_0^1n + {}_{92}^{235}U \rightarrow {}_{56}^{142}Ba + {}_y^xKr + 3{}_0^1n$
- III.  ${}_1^2H + {}_1^3H \rightarrow {}_2^4He + {}_0^1n$

Assinale a alternativa **INCORRETA**.

- a) A reação I é uma reação de transmutação artificial.
- b) A reação II é uma reação de fissão nuclear.
- c) A reação III é uma reação de fusão nuclear.
- d) O número de nêutrons do criptônio da reação II é 55.
- e) A massa atômica do criptônio da reação II é 93.

### 19. (IME – 2018 – 2ª Fase)

Sabe-se que  ${}_{22}Ti^{48}$  e  ${}_{23}V^{51}$  são, respectivamente, isóbaros e isótonos de um nuclídeo X, determine para o íon hipotético  $X^{-1}$ :

- a) a configuração eletrônica;
- b) a camada de valência;



c) todos os números quânticos do elétron mais energético.

## 20. (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)  $Ni^*$ ,  $Ni^*$ ,  $Ni$

## 21. (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.

## 22. (PM/PR – Aspirante da Polícia Militar – 2014)



Águas termais, exploradas em diversos destinos turísticos, brotam naturalmente em fendas rochosas. O aquecimento natural dessas águas, na sua grande maioria, deve-se ao calor liberado em processos radioativos de elementos presentes nos minerais rochosos que são transferidos para a água no fluxo pelas fendas. O gás radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) é o provável responsável pelo aquecimento de diversas águas termais no Brasil. O  $^{222}\text{Rn}$  se origina do rádio ( $^{226}\text{Ra}$ ), na série do urânio ( $^{238}\text{U}$ ), naturalmente presente em granitos. O tempo de meia vida ( $t_{1/2}$ ) do  $^{222}\text{Rn}$  é de 3,8 dias, e esse se converte em polônio ( $^{218}\text{Po}$ ), que por sua vez possui um  $t_{1/2}$  de 3,1 minutos.

Considerando as informações dadas, considere as seguintes afirmativas:

1. A conversão de  $^{222}\text{Rn}$  em  $^{218}\text{Po}$  é um processo exotérmico.
2. A conversão de  $^{226}\text{Ra}$  em  $^{222}\text{Rn}$  emite quatro partículas  $\beta^-$ .
3. Na série de decaimento, do  $^{238}\text{U}$  ao  $^{218}\text{Po}$ , cinco partículas  $\alpha$  são emitidas.
4. Após 3,8 dias da extração da água termal, a concentração de  $^{218}\text{Po}$  atingirá a metade do valor da concentração inicial de  $^{222}\text{Rn}$ .

Assinale a alternativa correta:

- a) Somente a afirmativa 1 é verdadeira.
- b) Somente as afirmativas 2 e 4 são verdadeiras.
- c) Somente as afirmativas 1 e 3 são verdadeiras.
- d) Somente as afirmativas 2 e 3 são verdadeiras.
- e) Somente as afirmativas 1, 3 e 4 são verdadeiras.

### 23. (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) 250
- b) 500
- c) 750
- d) 1000
- e) 1500

### 24. (TFC – Inédita)



Os principais produtos da fissão nuclear do urânio são: o criptônio-92 ( $^{92}\text{Kr}$ ) e o bário-141 ( $^{141}\text{Ba}$ ). Sabendo disso, podemos afirmar sobre o processo de fissão nuclear que:

- O criptônio-92 e o bário-141 são núclídeos estáveis, portanto, não sofrem novos processos de desintegração radioativa.
- Os núcleos de tempo de meia-vida muito curto (alguns segundos) são considerados pouco perigosos em processos radioativos.
- Os radioisótopos do iodo são muito perigosos para o ser humano, porque o nosso corpo absorve, mas não consegue constituir suas proteínas com os isótopos radioativos, apenas pelos isótopos estáveis.
- A fissão nuclear é uma propriedade intensiva do urânio-235, portanto, pode ser iniciada com qualquer amostra de urânio-235 pura, ainda que tenha massa muito pequena.
- O urânio-238 não sofre fissão nuclear, mas apenas uma série de decaimentos radioativos, que termina no isótopo  $^{208}\text{Pb}$ .

## 25. (ITA – 2016)

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

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

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

## 26. (IME – 2015 – 1ª Fase)

Um isótopo radioativo X transforma-se em um elemento estável Y após reações de desintegração radioativa com emissão de radiação  $\alpha$ , radiação  $\beta$  negativa e radiação  $\gamma$ . Assinale a alternativa correta.

- A diferença entre os números de massa de X e de Y será igual à diferença entre o dobro do número de partículas  $\alpha$  emitidas e o número de partículas  $\beta$  emitidas.
- A emissão da radiação  $\gamma$  altera o número atômico de X.



- c) A diferença entre os números atômicos de X e de Y será igual ao quádruplo do número de partículas  $\alpha$  emitidas.
- d) X e Y são isótonos.
- e) A diferença entre os números de nêutrons de X e de Y será igual à soma do dobro do número de partículas  $\alpha$  emitidas com o número de partículas  $\beta$  emitidas.

## 27. (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  $^{12}\text{C}$ .
- 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.

## 28. (UFES – 2016)

A emissão radioativa do polônio-218 ( $A = 218$  e  $Z = 84$ ), diante de um campo elétrico e/ou campo magnético, forma partículas  $\alpha$  e  $\beta$ .

- a) A reação de decaimento do átomo de  $_{84}\text{Po}^{218}$  se transforma na espécie estável  $_{82}\text{Pb}^{206}$ . Calcule quantas partículas  $\alpha$  e  $\beta$  são emitidas nesse processo.
- b) Calcule a quantidade residual de polônio-218 após 15 minutos de reação, partindo de uma massa inicial de 3,2 g desse isótopo radioativo. Considere que o tempo de meia-vida do polônio-218 é de 3,0 minutos.
- c) Ernest Rutherford e colaboradores, em seus experimentos com partículas  $\alpha$ , incidiram um feixe dessas partículas sobre uma lâmina de ouro e observaram que a maior parte delas atravessava diretamente a lâmina, sem sofrer desvios, e algumas sofriam grandes desvios ou até



mesmo retrocediam. Explique se é correto afirmar que Ernest Rutherford descobriu, com esses experimentos, a existência tanto do elétron quanto do núcleo atômico.

## 29. (ITA – SP)

Em relação ao tempo de meia-vida do césio-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 césio sofram desintegração radioativa).

I<sub>a</sub> – Ele decresce com o aumento da temperatura.

I<sub>b</sub> – Ele independe da temperatura.

I<sub>c</sub> – Ele cresce com o aumento da temperatura.

II<sub>a</sub> – Ele decresce com o aumento da pressão.

II<sub>b</sub> – Ele independe da pressão.

II<sub>c</sub> – Ele cresce com o aumento da pressão.

III<sub>a</sub> – Ele é o mesmo tanto no césio elementar como em todos os compostos de césio.

III<sub>b</sub> – Ele varia se são mudando os outros átomos ligados ao átomo de césio.

Dessas afirmações, são corretas:

a) I<sub>b</sub>; II<sub>c</sub>; III<sub>a</sub>.

b) I<sub>c</sub>; II<sub>a</sub>; III<sub>a</sub>.

c) I<sub>a</sub>; II<sub>b</sub>; III<sub>b</sub>.

d) I<sub>c</sub>; II<sub>c</sub>; III<sub>b</sub>.

e) I<sub>b</sub>; II<sub>b</sub>; III<sub>a</sub>.

## 30. (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?

## 31. (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 fósfil que apresentava 6000 desintegrações em 24 horas, qual é a idade da amostra de carvão?*

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

**32. (PUC – RJ)**

*As vítimas do acidente radioativo de Goiânia, que ingeriram césio-137, foram tratadas com um composto químico chamado “azul-da-prússia”. O objetivo era provocar a troca do césio por um elemento não-radioativo, de propriedades químicas muito semelhantes, contido naquele composto. Qual é esse elemento?*

- a) Ra
- b) Ca
- c) K
- d) I
- e) Fr

**33. (TFC – 2019 – Inédita)**

*O contador Geiger é um aparelho que é usado para saber o nível de:*

- a) Radioatividade
- b) Molaridade
- c) Acidez
- d) Pressão
- e) Temperatura

**34. (TFC – 2019 – Inédita)**

*O iodo-125, variedade radioativa do iodo, com aplicações medicinais, tem meia-vida de 60 dias. Quantos gramas de iodo-125 irão restar, após 6 meses, a partir de uma amostra contendo 4,00g do radioisótopo?*

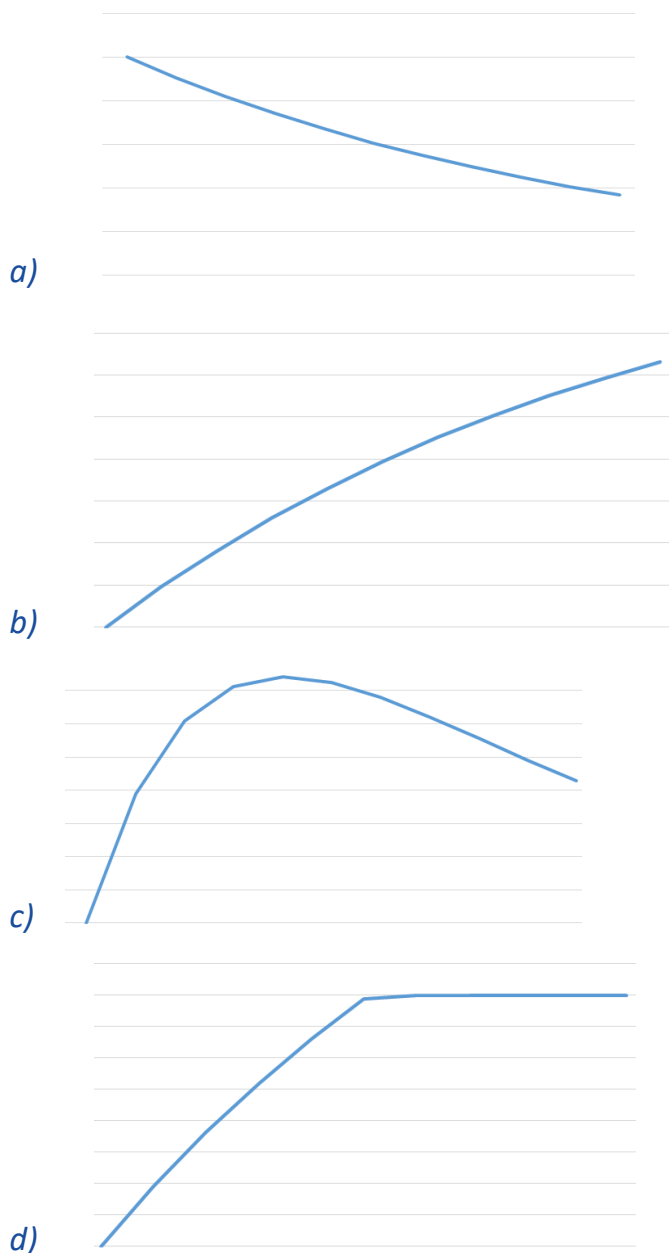
- a) 1,50 g
- b) 0,75 g
- c) 0,66 g
- d) 0,25 g
- e) 0,10 g

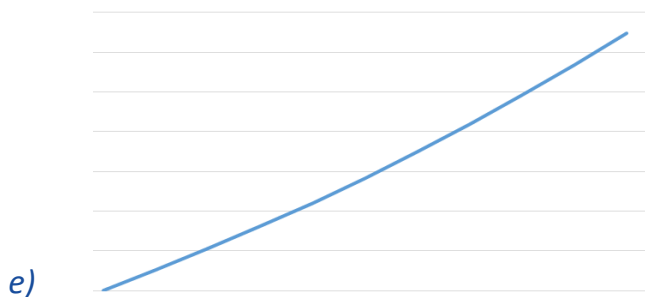




### 35. (TFC – 2019 – Inédita)

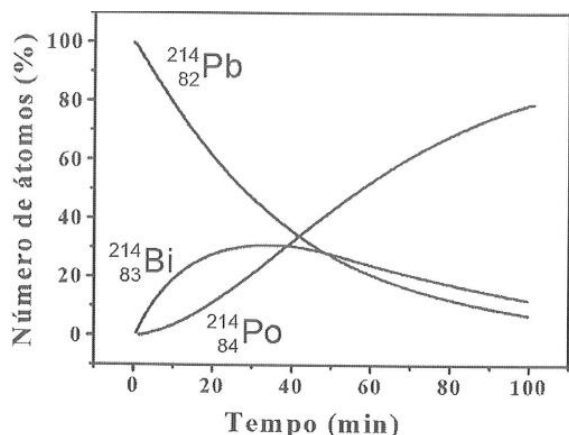
Em um laboratório de pesquisas nucleares, estudou-se o decaimento do isótopo bismuto-210, que se transforma em polônio-210, que, por sua vez, se transforma em chumbo-206, que não é radioativo. Uma certa quantidade de átomos de bismuto-210, isenta inicialmente de polônio e chumbo, foi estudada. Assinale a alternativa que mostra o gráfico do número de átomos de polônio com o tempo. Considere que as meias-vidas dos isótopos radioativos sejam aproximadamente iguais.





36. (ITA – 2004)

O  ${}_{82}\text{Pb}^{214}$  desintegra-se por emissão de partículas Beta, transformando-se em  ${}_{83}\text{Bi}^{214}$  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.

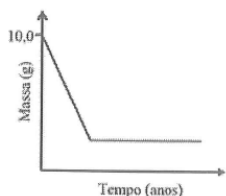
V – A constante de velocidade de decaimento do bismuto é de aproximadamente  $1 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ .

Das afirmações acima, estão **CORRETAS**

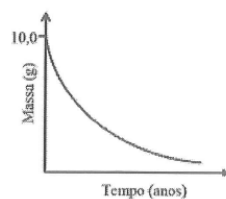
- a) apenas I, II e III.
- b) apenas I e IV.
- c) apenas II, III e V.
- d) apenas III e IV.
- e) apenas IV e V.

### 37. (ITA – 2009)

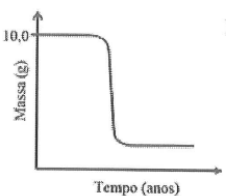
Qual o gráfico que apresenta a curva que melhor representa o decaimento de uma amostra contendo 10,0 g de um material radioativo ao longo dos anos?



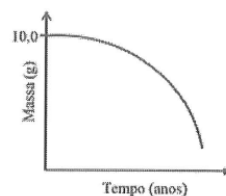
a)



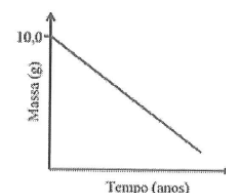
b)



c)



d)



e)

### 38. (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.

**39. (ITA – 2015)**

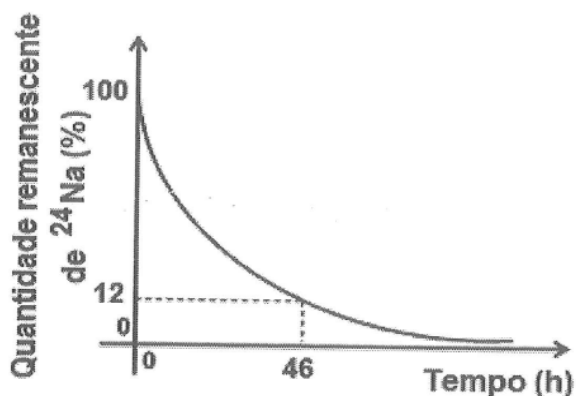
O elemento Plutônio-238 é utilizado para a geração de eletricidade em sondas espaciais.

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.

**40. (IME – 2013)**

Considere o decaimento radioativo do  $^{24}\text{Na}$  como um processo cinético de primeira ordem, conforme mostrado no gráfico abaixo.



Para esse radioisótopo, determine:

- a) a constante de decaimento,  $k$ ; e
- b) o tempo de meia-vida, em horas.

**Dados:**  $\ln 2 = 0,693$ ;  $\ln 3 = 1,099$ ;  $\ln 5 = 1,609$

**41. (IME – 2009)**

Uma amostra de massa de 1 g de determinado elemento radioativo  $zQ^{100}$  (meia-vida 23,0 anos) decai, por meio de uma emissão alfa, gerando o elemento R (meia-vida 34,5 anos). Este, por sua vez, emite uma partícula beta, dando origem ao elemento estável S.

Sabe-se que as frações molares dos elementos Q e S são funções do tempo de decaimento, expressas, respectivamente, por:

$$X_Q = e^{-k_1 t}$$
$$X_S = 1 - \frac{k_2}{k_2 - k_1} e^{-k_1 t} - \frac{k_1}{k_1 - k_2} e^{-k_2 t}$$

onde  $k_1$  e  $k_2$  são as constantes de velocidade da primeira e da segunda reação de decaimento, respectivamente. Sabendo que o máximo de uma função da forma  $f(t) = e^{at} - e^{bt}$ ,  $b < a < 0$ ,  $t > 0$ , é obtido quando  $ae^{at} - be^{bt} = 0$ , determine a máxima quantidade, em massa, que é atingida pelo elemento R.

Dado:  $\log 2 = 0,30$ ;  $\ln 2 = 0,69$ ;  $\ln 3 = 1,10$ .

#### 42. (IME – 2011)

Os isótopos do urânio  $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$  aparecem na natureza sempre juntos. Como o  $^{235}\text{U}$  não é gerado a partir do  $^{238}\text{U}$  por desintegração e admitindo que não há razão para privilegiar um em relação ao outro, podemos supor que o Criador os tenha colocado em proporções iguais no momento da formação da Terra. Considerando válida tal hipótese, calcule a idade que nosso planeta teria.

##### Dados:

Tempo de meia-vida do  $^{238}\text{U}$ :  $4,50 \times 10^9$  anos

Tempo de meia-vida do  $^{235}\text{U}$ :  $7,07 \times 10^8$  anos

Abundância isotrópica do  $^{238}\text{U}$ : 99,28%

Abundância isotrópica do  $^{235}\text{U}$ : 0,72%

$\log 0,9928 = -0,0031$

$\log 2 = 0,30$

$\log 3 = 0,48$

$\log 3,1 = 0,49$

$\ln 2 = 0,69$

$\ln 3 = 1,1$

$\ln 137,9 = 4,9$

$5^{1/2} = 2,24$



### 43. (IME – 2015)

O oxigênio 15, um isótopo radioativo, é utilizado na tomografia por emissão de pósitrons para avaliar a perfusão sanguínea e o consumo de oxigênio em distintas regiões do cérebro. Sabendo que uma amostra com 7,5 g desse isótopo radioativo ( ${}^8\text{O}^{15}$ ) produz  $1,0 \times 10^{23}$  emissões de radiação por minuto, determine o tempo para que essa amostra passe a produzir  $2,5 \times 10^{22}$  emissões de radiação por minuto.

**Dados:**  $\ln 2 = 0,693$ ; Número de Avogadro =  $6 \cdot 10^{23}$

### 44. (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.

### 45. (IME – 2016)

O trítio é produzido na atmosfera por raios cósmicos. Ao combinar-se com o oxigênio e o hidrogênio, precipita-se sob a forma de chuva. Uma vez que a incidência de raios cósmicos varia com a região da Terra, as águas pluviais de regiões diferentes terão diferentes concentrações de trítio.

Os dados abaixo correspondem às concentrações de trítio (expressas em número de desintegrações por minuto por litro) em águas pluviais de diferentes regiões do Brasil:



Estação Pluviométrica	Desintegrações do trítio (desintegrações/min.L)
Manaus	11,5
Belém	9,0
Vale do São Francisco	6,0
São Joaquim	16,0
Serra Gaúcha	25,0

Um antigo lote de garrafas de vinho foi encontrado sem rótulos, mas com a data de envasamento na rolha, conferindo ao vinho uma idade de 16 anos. Uma medida atual da concentração de trítio neste vinho indicou 6,5 desintegrações/min.L

Considerando que a concentração de trítio no momento do envasamento do vinho é igual à das águas pluviais de sua região produtora, identifique o local de procedência deste vinho, justificando sua resposta.

**Dados:** Tempos de meia vida:

${}^1_1\text{H}^3 = 12,32$  anos ;  $\ln 2 = 0,693$ ;  $\ln 1,105 = 0,1$ ;  $e = 2,72$

## 8. 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. D
6. C
7. a)  $1,3 \cdot 10^9$  anos; b) 5,32 anos; c) 179 s
8. a)  $1,3 \cdot 10^9$  anos; b) 5,32 anos; c) 179 s
9.  $3,6 \cdot 10^{10}$  Bq
10. A
11. C
12. C
13. C
14. 20 minutos;  $1,06 \cdot 10^{20}$
15. a)  $4 \text{ on}^1$ ; b)  ${}_{51}\text{Sb}^{136}$ ; c)  ${}_{45}\text{Rh}^{98}$
16. D
17. discursiva
18. E
19. discursiva
20. E
21. E
22. C
23. D
24. B
25. b) 20 bilhões de anos; c) discursiva
26. E
27. C
28. discursiva
29. E
30. 4,7%
31. 4,7%
32. C
33. A
34. D
35. C
36. A
37. B
38. B
39. C
40. a)  $0,046 \text{ h}^{-1}$ ; b) 15 h
41. 0,43 g
42. 5,97 bilhões de anos
43. 4,16 min
44. 4,2 bilhões de anos
45. São Joaquim





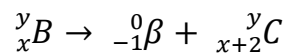
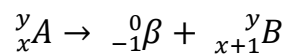
## 9. Lista de Questões Comentadas

### 17. (ITA – 2020 – 2ª Fase)

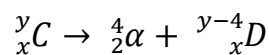
A partir do isótopo  ${}^x_yA$  ocorrem três processos sucessivos de decaimento radioativo que levam à formação do isótopo final D. A partir de  ${}^x_yA$  há emissão de uma partícula beta, produzindo o nuclídeo B. Este, por sua vez, libera uma partícula beta formando o nuclídeo C. O nuclídeo D é produzido 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:

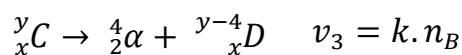
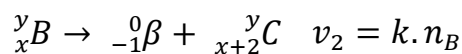
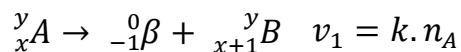
O decaimento por partícula beta provoca aumento do número atômico, mas preserva o número de massa.



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:

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

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

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

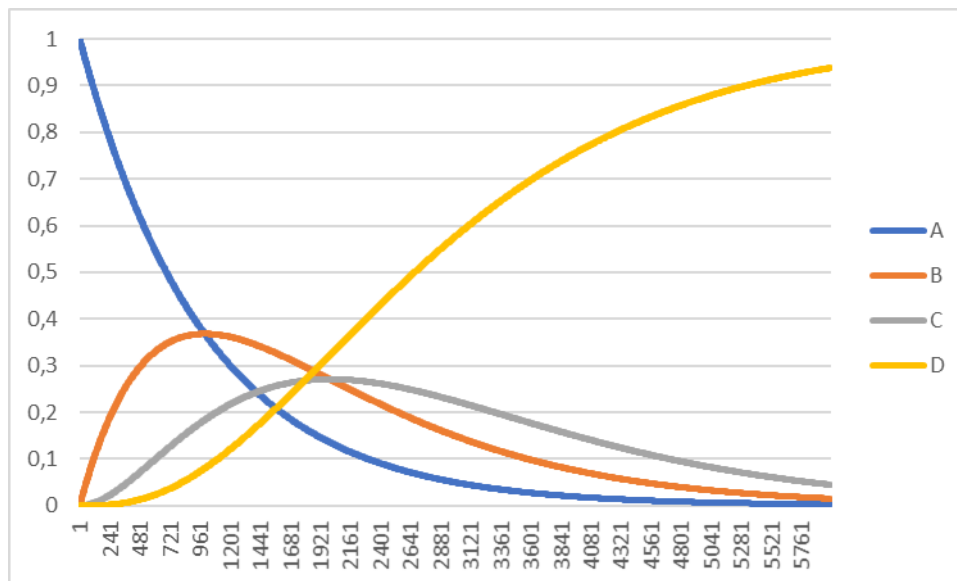
$$\therefore n_A = n_B$$

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.



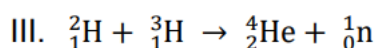
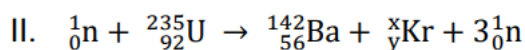
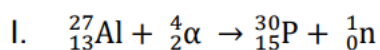


Esse gráfico foi construído com uma simulação computacional considerando  $k = 1$  e variações de unidade de tempo equivalentes a  $t = 0,01$ .

**Gabarito: discursiva**

### 18. (IME – 2020 – 1ª Fase)

A respeito das reações abaixo:



Assinale a alternativa **INCORRETA**.

- a) A reação I é uma reação de transmutação artificial.
- b) A reação II é uma reação de fissão nuclear.
- c) A reação III é uma reação de fusão nuclear.
- d) O número de nêutrons do criptônio da reação II é 55.
- e) A massa atômica do criptônio da reação II é 93.

### Comentários

Vamos analisar todas as afirmações:



- (A) – A reação I é, de fato, uma reação de transmutação artificial, visto que, no processo descrito, o núcleo de um átomo é bombardeado por uma partícula para ser transformado em outro átomo.
- (B) – A reação II é de fissão nuclear pois ela apresenta um núcleo pesado que se desmembra formando núcleos mais leves e mais estáveis. Essa quebra ocorre, regra geral, a partir do bombardeamento de nêutrons.
- (C) – A reação III é de fusão nuclear pois ela apresenta dois núcleos leves que se juntam para formar núcleos mais pesados e mais estáveis.
- (D) – Em uma reação nuclear, devemos ter a conservação do número de massa, bem como a conservação do número de prótons. Assim, conservando o número de massa na reação II, temos:

$$A_{reagentes} = A_{produtos}$$
$$1 + 235 = 142 + x + 3 \cdot 1$$
$$236 = 145 + x$$
$$x = 236 - 145$$
$$x = 91$$

Por sua vez, conservando o número de prótons, temos:

$$Z_{reagentes} = Z_{produtos}$$
$$0 + 92 = 56 + y + 3 \cdot 0$$
$$y + 56 = 92$$
$$y = 92 - 56$$
$$y = 36$$

Ora, o número de massa de um núcleo é dado por:

$$A = Z + N$$

Logo:

$$x = y + N$$
$$91 = 36 + N$$
$$N = 91 - 36$$
$$N = 55$$

Assim, a afirmativa está correta.

- (E) – A afirmativa possui dois erros.

Primeiramente, devemos falar, nesse contexto, em número de massa, um conceito sutilmente diferente de massa atômica (a massa atômica é a média ponderada dos isótopos

de um átomo, enquanto o número de massa é, simplesmente, a soma do número de nêutrons com o número de prótons de um núcleo).

Além disso, vemos que  $x$  é o número de massa do criptônio. Como já calculado no item “d”, teríamos  $x = 91$  e não 93 como sugerido pela afirmativa. Portanto, afirmativa incorreta.

## Gabarito: E

---

### 19. (IME – 2018 – 2ª Fase)

Sabe-se que  ${}_{22}\text{Ti}^{48}$  e  ${}_{23}\text{V}^{51}$  são, respectivamente, isóbaro e isótono de um nuclídeo X, determine para o íon hipotético  $X^{-1}$ :

- a) a configuração eletrônica;
- b) a camada de valência;
- c) todos os números quânticos do elétron mais energético.

### Comentários

O nuclídeo X tem o mesmo número de massa do titânio-48 e o mesmo número de nêutrons do vanádio-51. Portanto, já sabemos que o número de massa de X é 48.

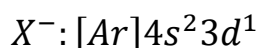
O número de nêutrons do vanádio-51 pode ser calculado pela diferença entre o número de massa e o número atômico.

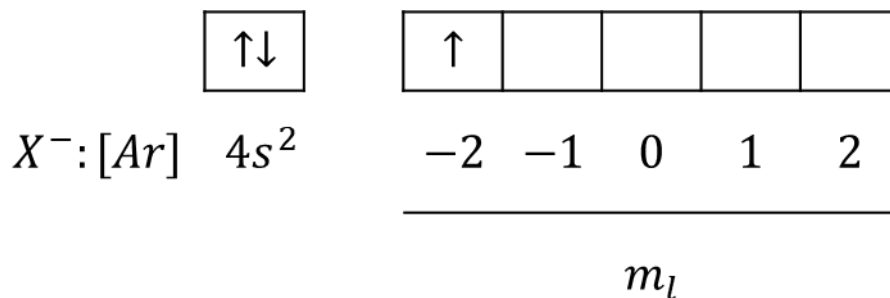
$$N = A - Z = 51 - 23 = 28$$

Como X tem 28 nêutrons, podemos calcular o seu número atômico.

$$Z = A - N = 48 - 28 = 20$$

O íon hipotético  $X^{-1}$  tem um elétron a mais que o número de prótons, portanto, tem 21 elétrons. Lembrando-nos que o gás nobre anterior é o Argônio, cujo número atômico é igual a 18. Portanto, a configuração eletrônica do íon é.





A camada de valência é a quarta. O elétron mais energético está no subnível **3d**. Seus números quânticos são:

- **Principal:**  $n = 3$
- **Secundário:**  $l = 2$  (d)

Não é possível afirmar categoricamente quais os números quânticos magnético e de spin, porque variar o orbital dentro do mesmo subnível ou mudar o número de spin não afeta a energia da configuração. Porém, do jeito que representamos a configuração eletrônica de  $X^-$ , temos:

- **Magnético:**  $m = -2$
- **Spin:**  $-1/2$

**Gabarito: discursiva**

---

## 20. (ITA – 2019 – 1ª fase)

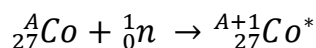
Sabe-se que um determinado nuclídeo, estável ou instável, em seu estado fundamental é designado por  $X$  e, em seu estado excitado, por  $X^*$ . Considere o bombardeamento do átomo estável de cobalto no estado fundamental por um nêutron. O nuclídeo gerado por essa reação sofre três decaimentos radioativos 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.



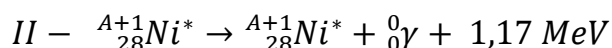
Muito cuidado, porque, até o presente momento, não houve nenhum decaimento. Houve apenas a formação de um nuclídeo instável. Por conta disso, não podemos marcar nenhuma das letras de “a” a “c”.

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



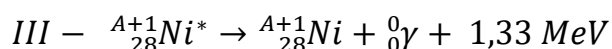
O nuclídeo de níquel formado nesse primeiro decaimento é instável, por isso, deve ser marcado. A prova de que o nuclídeo formado é instável é justamente que ele sofre outros decaimentos.

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**

---

## 21. (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.

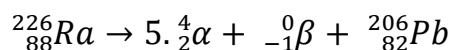
### Comentários

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**

---

### 22. (PM/PR – Aspirante da Polícia Militar – 2014)

Águas termais, exploradas em diversos destinos turísticos, brotam naturalmente em fendas rochosas. O aquecimento natural dessas águas, na sua grande maioria, deve-se ao calor liberado em processos radioativos de elementos presentes nos minerais rochosos que são transferidos para a água no fluxo pelas fendas. O gás radônio ( ${}^{222}\text{Rn}$ ) é o provável responsável pelo aquecimento de diversas águas termais no Brasil. O  ${}^{222}\text{Rn}$  se origina do rádio ( ${}^{226}\text{Ra}$ ), na série do urânio ( ${}^{238}\text{U}$ ), naturalmente presente em granitos. O tempo de meia vida ( $t_{1/2}$ ) do  ${}^{222}\text{Rn}$  é de 3,8 dias, e esse se converte em polônio ( ${}^{218}\text{Po}$ ), que por sua vez possui um  $t_{1/2}$  de 3,1 minutos. Considerando as informações dadas, considere as seguintes afirmativas:

1. A conversão de  ${}^{222}\text{Rn}$  em  ${}^{218}\text{Po}$  é um processo exotérmico.
2. A conversão de  ${}^{226}\text{Ra}$  em  ${}^{222}\text{Rn}$  emite quatro partículas  $\beta$ .
3. Na série de decaimento, do  ${}^{238}\text{U}$  ao  ${}^{218}\text{Po}$ , cinco partículas  $\alpha$  são emitidas.
4. Após 3,8 dias da extração da água termal, a concentração de  ${}^{218}\text{Po}$  atingirá a metade do valor da concentração inicial de  ${}^{222}\text{Rn}$ .

Assinale a alternativa correta:





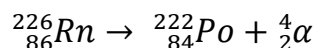
- a) Somente a afirmativa 1 é verdadeira.
- b) Somente as afirmativas 2 e 4 são verdadeiras.
- c) Somente as afirmativas 1 e 3 são verdadeiras.
- d) Somente as afirmativas 2 e 3 são verdadeiras.
- e) Somente as afirmativas 1, 3 e 4 são verdadeiras.

### Comentários

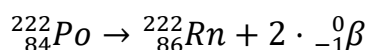
Vamos analisar as alternativas.

1 – Os decaimentos radioativos espontâneos são processos exotérmicos e liberam bastante energia. Afirmativa verdadeira.

2 – Como ocorreu uma redução do número de massa, concluímos que houve emissão de partícula alfa.



Houve também uma redução no número atômico. Para seguir ao isótopo  ${}^{226}_{86}\text{Rn}$ , será necessário aumentar o número atômico em duas unidades, o que pode ser feito pela emissão de partículas.



Ocorre, portanto, a emissão de duas partículas beta, não quatro, como afirmado pelo enunciado. Afirmativa falsa.

3 – Cada emissão de partícula alfa causa redução do número de massa em 4 unidades. Assim, podemos calcular a quantidade de partículas alfa emitidas dividindo-se a redução do número de massa por 4.

$$n = \frac{238 - 218}{4} = \frac{20}{4} = 5$$

Afirmativa verdadeira.

4 – De fato, a concentração de  ${}^{222}\text{Rn}$  se reduzirá à metade e todo esse isótopo se transformará em  ${}^{218}\text{Po}$ . Porém, o  ${}^{218}\text{Po}$  também é radioativo e apresenta um tempo de meia-vida muito curto, portanto, após 3,8 dias, não restará praticamente nenhum nuclídeo  ${}^{218}\text{Po}$ .



Vale ressaltar, ainda, que, se o isótopo  $^{218}\text{Po}$  fosse estável, a afirmação seria verdadeira.  
Afirmação falsa.

**Gabarito: C**

---

### 23. (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) 250
- b) 500
- c) 750
- d) 1000
- e) 1500

### 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.

$$E = Pt = 25 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 = 78840000 \cong 7,9 \cdot 10^7 J$$

A energia liberada na fusão nuclear do urânio-235 é igual a  $8 \cdot 10^{10}$  g. Essa energia é suficiente para manter acesas um total de:

$$N = \frac{8 \cdot 10^{10}}{7,9 \cdot 10^7} \cong 10^3 = 1000$$

**Gabarito: D**

---

### 24. (TFC – Inédita)



Os principais produtos da fissão nuclear do urânio são: o criptônio-92 ( $^{92}\text{Kr}$ ) e o bário-141 ( $^{141}\text{Ba}$ ). Sabendo disso, podemos afirmar sobre o processo de fissão nuclear que:

- O criptônio-92 e o bário-141 são núclídeos estáveis, portanto, não sofrem novos processos de desintegração radioativa.
- Os núcleos de tempo de meia-vida muito curto (alguns segundos) são considerados pouco perigosos em processos radioativos.
- Os radioisótopos do iodo são muito perigosos para o ser humano, porque o nosso corpo absorve, mas não consegue constituir suas proteínas com os isótopos radioativos, apenas pelos isótopos estáveis.
- A fissão nuclear é uma propriedade intensiva do urânio-235, portanto, pode ser iniciada com qualquer amostra de urânio-235 pura, ainda que tenha massa muito pequena.
- O urânio-238 não sofre fissão nuclear, mas apenas uma série de decaimentos radioativos, que termina no isótopo  $^{208}\text{Pb}$ .

## Comentários

Vamos analisar as afirmações.

- Podemos consultar os dados de massas atômicas fornecidos no começo da lista. Temos que:

$$Kr = 84 u$$

$$Ba = 137 u$$

Logo, podemos concluir que os isótopos  $^{92}\text{Kr}$  e  $^{141}\text{Ba}$  possuem uma massa bem superior à massa atômica dos elementos, logo, eles não devem ser os isótopos mais estáveis. Portanto, é bastante provável que eles sejam radioativos. Afirmação errada.

- Se um radioisótopo tem um tempo de meia-vida muito curto, de apenas alguns segundos, em poucos minutos, a sua atividade se reduzirá a uma porcentagem ínfima da original. Portanto, esses radioisótopos não tendem a ser perigosos, pois eles rapidamente se dissipam. Afirmação correta.
- As propriedades químicas de todos os isótopos de um elemento são iguais. Portanto, o corpo humano será capaz de utilizar o iodo radioativo da mesma forma que utiliza o iodo estável na constituição das proteínas da tireóide. Afirmação errada.
- É preciso uma quantidade mínima do isótopo físsil em massa para produzir a fissão nuclear. Essa quantidade é denominada **massa crítica**. Afirmação errada.
- De fato, o isótopo  $^{238}\text{U}$  não sofre fissão nuclear, mas sim uma série de decaimentos por emissão de partículas alfa e beta. Nesse tipo de decaimento, a variação do número de massa é necessariamente um múltiplo de 4.

$$\Delta n = 238 - 208 = 30 \neq 4n$$



**Gabarito: B**

**25. (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**

## 26. (IME – 2015 – 1ª Fase)

Um isótopo radioativo X transforma-se em um elemento estável Y após reações de desintegração radioativa com emissão de radiação  $\alpha$ , radiação  $\beta$  negativa e radiação  $\gamma$ . Assinale a alternativa correta.

- a) A diferença entre os números de massa de X e de Y será igual à diferença entre o dobro do número de partículas  $\alpha$  emitidas e o número de partículas  $\beta$  emitidas.
- b) A emissão da radiação  $\gamma$  altera o número atômico de X.
- c) A diferença entre os números atômicos de X e de Y será igual ao quádruplo do número de partículas  $\alpha$  emitidas.
- d) X e Y são isótonos.
- e) A diferença entre os números de nêutrons de X e de Y será igual à soma do dobro do número de partículas  $\alpha$  emitidas com o número de partículas  $\beta$  emitidas.

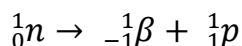
## Comentários

A questão fala sobre uma série de desintegrações radioativas. Para saber a influências das partículas alfa e beta sobre o isótopo formado, devemos nos lembrar da composição dessas partículas, que é  ${}^4_2\alpha$  e  ${}^0_{-1}\beta$ . As partículas beta, portanto, não influenciam a variação do número de massa.

- a) O número de massa decresce 4 unidades a cada emissão de partículas alfa. A emissão de partículas beta não exerce nenhuma influência, portanto, a alternativa está incorreta.
- b) A radiação gama é composta unicamente por energia, logo, não exerce qualquer influência sobre o número atômico do elemento. Alternativa incorreta.
- c) O número de massa, e não o número atômico, é que decresce 4 unidades a cada partícula alfa. Alternativa incorreta.



- d) O número de nêutrons é modificado tanto pela emissão de partículas alfa como de partículas beta. Portanto, X e Y não são isótonos. Alternativa incorreta.
- e) O gabarito é mais profundo. Já vimos que a emissão de uma partícula beta corresponde à transformação de um nêutron em um próton.



Sendo assim, o número de nêutrons diminui 1 unidade a cada emissão de partícula beta.

A partícula alfa, por sua vez, é formada por 2 prótons e 2 nêutrons. Portanto, cada emissão de partícula alfa diminui em 2 unidades o número de nêutrons no isótopo.

Sendo assim, a redução do número de nêutrons na série radioativa é, de fato, a soma do dobro das partículas alfa com o número de partículas beta.

**Gabarito: E**

---

## 27. (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  $^{12}\text{C}$ .
- 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  $^{12}\text{C}$ . 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**

---

## 28. (UFES – 2016)

A emissão radioativa do polônio-218 ( $A = 218$  e  $Z = 84$ ), diante de um campo elétrico e/ou campo magnético, forma partículas  $\alpha$  e  $\beta$ .

a) A reação de decaimento do átomo de  ${}_{84}\text{Po}^{218}$  se transforma na espécie estável  ${}_{82}\text{Pb}^{206}$ . Calcule quantas partículas  $\alpha$  e  $\beta$  são emitidas nesse processo.

b) Calcule a quantidade residual de polônio-218 após 15 minutos de reação, partindo de uma massa inicial de 3,2 g desse isótopo radioativo. Considere que o tempo de meia-vida do polônio-218 é de 3,0 minutos.

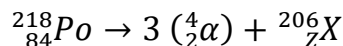
c) Ernest Rutherford e colaboradores, em seus experimentos com partículas  $\alpha$ , incidiram um feixe dessas partículas sobre uma lâmina de ouro e observaram que a maior parte delas atravessava diretamente a lâmina, sem sofrer desvios, e algumas sofriram grandes desvios ou até mesmo retrocediam. Explique se é correto afirmar que Ernest Rutherford descobriu, com esses experimentos, a existência tanto do elétron quanto do núcleo atômico.

## Comentários

- a) A diferença entre os números de massa do polônio-218 e do chumbo-206 é igual a 12. A redução do número de massa se deve apenas às partículas alfa, pois a emissão de partículas beta não o modifica.

Como o número de massa das partículas alfa é igual a 4, foram emitidas exatamente 3 partículas. Vamos calcular, agora qual nuclídeo X seria obtido pelo decaimento do polônio somente com 3 partículas alfa.

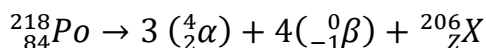




Pela Conservação da Carga, temos:

$$84 = 3 \cdot 2 + Z \therefore Z = 84 - 6 = 78$$

Ainda é preciso aumentar o número atômico do elemento em 4 unidades. Para isso, precisamos da emissão de 4 partículas beta.



Portanto, são emitidas 3 partículas alfa e 4 partículas beta.

- b) Passaram-se, portanto, 5 tempos de meia-vida. Logo, a massa residual do isótopo pode ser calculada pela equação de decaimento radioativo.

$$m = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^5 = 3,2 \cdot \left(\frac{1}{32}\right) = 0,1 \text{ g}$$

- c) No Experimento de Rutherford, as partículas alfa sofrem desvios quando encontram uma massa mais densa. Ao descobrir que a maioria delas atravessava, Rutherford concluiu sobre a existência do núcleo atômico.

Nesse experimento, não há nenhum indício sobre a existência do elétron, tendo em vista que não há nenhuma interação das partículas alfa com eles. Portanto, Rutherford só pode ser capaz de concluir sobre a existência do núcleo.

O elétron havia sido descoberto anteriormente por Thomson com o experimento da Ampola de Crookes.

### Gabarito: discursiva

---

### 29. (ITA – SP)

Em relação ao tempo de meia-vida do céσιο-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 céσιο sofram desintegração radioativa).

I<sub>a</sub> – Ele decresce com o aumento da temperatura.

I<sub>b</sub> – Ele independe da temperatura.

I<sub>c</sub> – Ele cresce com o aumento da temperatura.

II<sub>a</sub> – Ele decresce com o aumento da pressão.

II<sub>b</sub> – Ele independe da pressão.

II<sub>c</sub> – Ele cresce com o aumento da pressão.

III<sub>a</sub> – Ele é o mesmo tanto no céσιο elementar como em todos os compostos de céσιο.

III<sub>b</sub> – Ele varia se são mudando os outros átomos ligados ao átomo de céσιο.

Dessas afirmações, são corretas:

- a) I<sub>b</sub>; II<sub>c</sub>; III<sub>a</sub>.





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

### 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 (Ib), independe da pressão (IIb) e é o mesmo tanto no céσιο elementar como em todos os compostos do metal (IIIa).

### Gabarito: E

---

### 30. (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 porcentagem 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%**

**31. (TFC – 2019 – Inédita)**

Uma amostra recente de 1,00g de carbono mostra 900 desintegrações por hora, principalmente devidas ao isótopo  $^{14}\text{C}$ , 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  $^{14}\text{C}$  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:

$$\begin{aligned} A(t) &= A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \\ \therefore 250 &= 900 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5730}} \\ \therefore \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5730}} &= \frac{250}{900} = \frac{25}{90} \\ \therefore 2^{\frac{t}{5730}} &= \frac{90}{25} = 3,6 \end{aligned}$$

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%**

---

### 32. (PUC – RJ)

As vítimas do acidente radioativo de Goiânia, que ingeriram céσιο-137, foram tratadas com um composto químico chamado “azul-da-prússia”. O objetivo era provocar a troca do céσιο por um elemento não-radioativo, de propriedades químicas muito semelhantes, contido naquele composto. Qual é esse elemento?

- a) Ra
- b) Ca
- c) K
- d) I
- e) Fr

### Comentários

O elemento que apresenta as mesmas propriedades do céσιο é aquele que pertence à sua mesma família. Lembrando-nos da frase dos metais alcalinos (família I-A).

**Hoje Li Na Karas que Roberto Carlos está na França**

Dessa maneira, o céσιο (Cs) é um metal alcalino e deve ser substituído por outro metal alcalino, com o potássio (K).

**Gabarito: C**

---

### 33. (TFC – 2019 – Inédita)



O contador Geiger é um aparelho que é usado para saber o nível de:

- a) Radioatividade
- b) Molaridade
- c) Acidez
- d) Pressão
- e) Temperatura

### Comentários

O Contador Geiger é um importante instrumento de laboratório, utilizado para a medida dos níveis de radioatividade de uma amostra, como visto nesse capítulo

**Gabarito: A**

---

### 34. (TFC – 2019 – Inédita)

O iodo-125, variedade radioativa do iodo, com aplicações medicinais, tem meia-vida de 60 dias. Quantos gramas de iodo-125 irão restar, após 6 meses, a partir de uma amostra contendo 4,00g do radioisótopo?

- a) 1,50 g
- b) 0,75 g
- c) 0,66 g
- d) 0,25 g
- e) 0,10 g

### Comentários

A atividade radioativa segue o decaimento exponencial.

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

Vamos calcular o número de meias vidas que se passaram:

$$\frac{t}{t_{1/2}} = \frac{6}{2} = 3$$

Como a amostra inicial era de 2,0g, temos que a amostra final será:

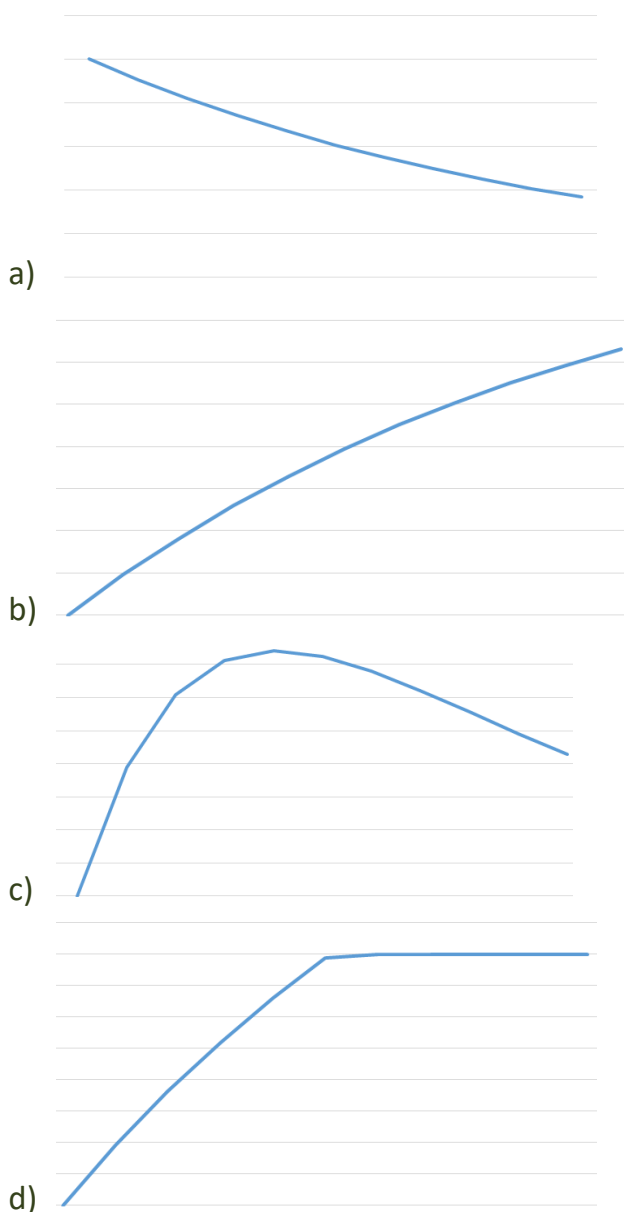


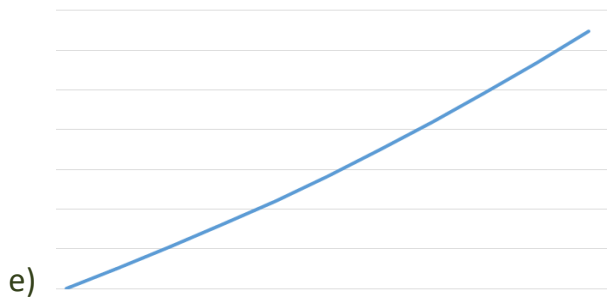
$$m = m_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}} = 2 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 = 2 \cdot \left(\frac{1}{8}\right) = \frac{1}{4} = 0,25 \text{ g}$$

**Gabarito: D**

**35. (TFC – 2019 – Inédita)**

Em um laboratório de pesquisas nucleares, estudou-se o decaimento do isótopo bismuto-210, que se transforma em polônio-210, que, por sua vez, se transforma em chumbo-206, que não é radioativo. Uma certa quantidade de átomos de bismuto-210, isenta inicialmente de polônio e chumbo, foi estudada. Assinale a alternativa que mostra o gráfico do número de átomos de polônio com o tempo. Considere que as meias-vidas dos isótopos radioativos sejam aproximadamente iguais.





### Comentários

No início do processo, não existe polônio, pois ele é formado a partir do bismuto-210. Sendo assim, a massa de polônio parte do zero e vai crescendo até que a desintegração desse elemento comece a ser mais significativa que a sua produção por chumbo.

À medida que o tempo passa, a atividade de chumbo diminui, o que gera menos polônio. Mas esse elemento vai começando a ser cada vez mais consumido, se transformando no chumbo-206. A situação que condiz que o foi apresentado é a letra C.

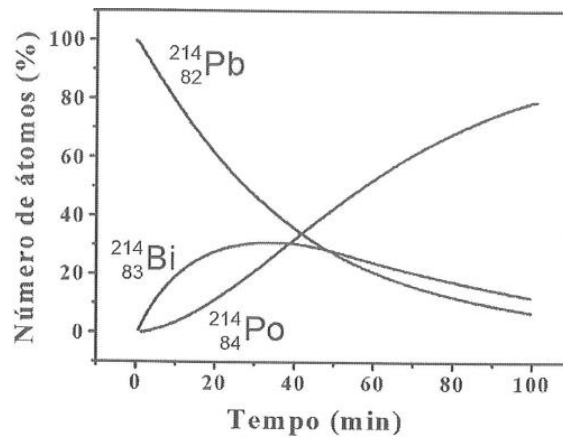
O erro da letra **a)** é que ela parte de uma situação em que se tem muito polônio no início, o que não é verdade, pois esse isótopo precisa ser primeiro formado pelo decaimento do bismuto. O erro das letras **b)**, **d)** e **e)** é considerar que a quantidade de polônio sempre aumenta, o que não é verdade, porque esse isótopo também é radioativo.

**Gabarito: C**

---

### 36. (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.

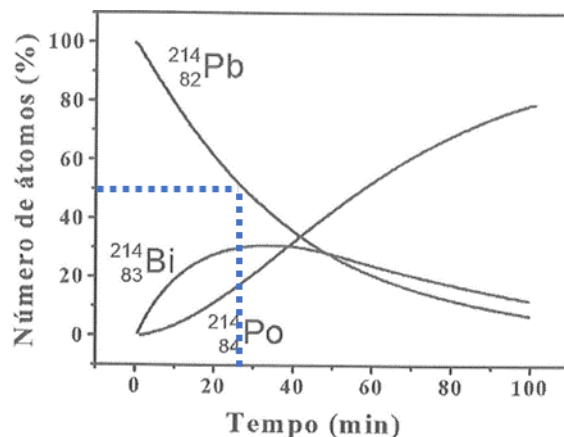
V – A constante de velocidade de decaimento do bismuto é de aproximadamente  $1 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ .

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:

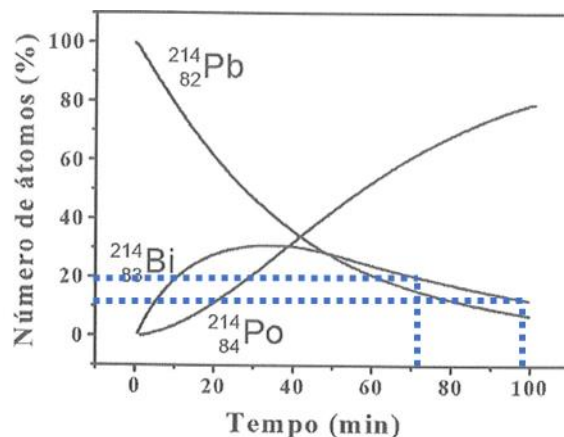
$$k = \frac{0,693}{t_{1/2}} = \frac{0,693}{27} = 0,0257 \text{min}^{-1} = 2,57 \cdot 10^{-2} \text{min}^{-1} \cong 3 \cdot 10^{-2} \text{min}^{-1}$$

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.

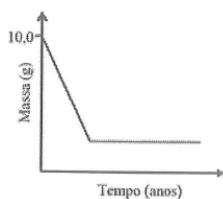
V – Como o tempo de meia-vida do bismuto é aproximadamente o mesmo do chumbo-214, então a sua constante de desintegração deve ser aproximadamente igual. Item errado.

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

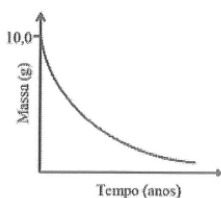
**Gabarito: A**

### 37. (ITA – 2009)

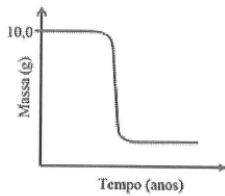
Qual o gráfico que apresenta a curva que melhor representa o decaimento de uma amostra contendo 10,0 g de um material radioativo ao longo dos anos?



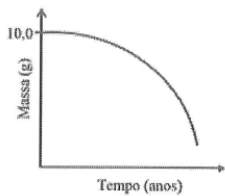
a)



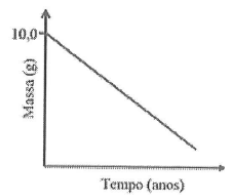
b)



c)



d)



e)

### 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

---

### 38. (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**



### 39. (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.

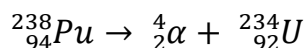
Portanto, é preciso que o radioisótopo utilizado na geração de eletricidade apresente tempo de meia-vida relativamente longo. No caso, o plutônio-239 apresenta tempo de meia-vida de 87,7 anos.

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.



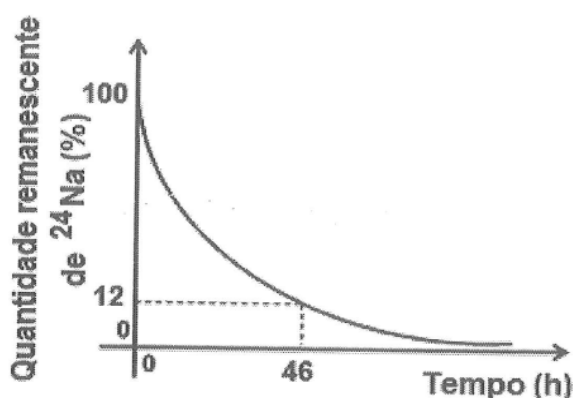
Porém, como técnica de resolver provas, o aluno deve identificar a emissão principal do plutônio, que é a partícula alfa, com objetivo de diminuir o tamanho do seu núcleo. Os raios gama são apenas acessórios e, por isso, não devem ser marcados.



**Gabarito: C**

#### 40. (IME – 2013)

Considere o decaimento radioativo do  ${}^{24}\text{Na}$  como um processo cinético de primeira ordem, conforme mostrado no gráfico abaixo.



Para esse radioisótopo, determine:

- a constante de decaimento,  $k$ ; e
- o tempo de meia-vida, em horas.

**Dados:**  $\ln 2 = 0,693$ ;  $\ln 3 = 1,099$ ;  $\ln 5 = 1,609$

#### Comentários

O decaimento do sódio é exponencial, como em qualquer processo radioativo. Podemos escrever que a quantidade de sódio remanescente na amostra é dada por:

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

Depois de 46 horas, podemos escrever:

$$n(46) = n_0 \cdot e^{-46k}$$

$$0,12n_0 = n_0 \cdot e^{-46k}$$

Podemos simplificar a quantidade inicial de sódio.

$$0,12 = e^{-46k} = \frac{12}{100}$$

Podemos aplicar o logaritmo natural de ambos os lados.

$$-46k = \ln\left(\frac{12}{100}\right) = \ln(12) - \ln(100)$$

Os logaritmos naturais de 12 e 100 podem ser calculados a partir de suas fatorações. Vejamos.

$$12 = 3 \cdot 4 = 3 \cdot 2^2 \therefore \ln(12) = \ln 3 + 2 \ln 2 = 1,099 + 2 \cdot 0,693 = 2,485$$

$$100 = 4 \cdot 25 = 2^2 \cdot 5^2 \therefore \ln(100) = 2 \cdot \ln(2) + 2 \cdot \ln(5) = 2 \cdot 0,693 + 2 \cdot 1,609 = 4,604$$

Agora, podemos substituir os valores encontrados na equação original.

$$-46k = 2,485 - 4,604 = -2,119$$

$$\therefore k = \frac{2,119}{46} = 0,046 \text{ h}^{-1}$$

O tempo de meia vida pode ser obtido a partir da constante de desintegração.

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0,693}{0,046} \cong \frac{690}{46} = \frac{30}{2} = 15 \text{ h}$$

**Gabarito: a) 0,046 h<sup>-1</sup>; b) 15 h**

#### 41. (IME – 2009)

Uma amostra de massa de 1 g de determinado elemento radioativo  ${}^Z\text{Q}^{100}$  (meia-vida 23,0 anos) decai, por meio de uma emissão alfa, gerando o elemento R (meia-vida 34,5 anos). Este, por sua vez, emite uma partícula beta, dando origem ao elemento estável S.

Sabe-se que as frações molares dos elementos Q e S são funções do tempo de decaimento, expressas, respectivamente, por:

$$X_Q = e^{-k_1 t}$$
$$X_S = 1 - \frac{k_2}{k_2 - k_1} e^{-k_1 t} - \frac{k_1}{k_1 - k_2} e^{-k_2 t}$$

onde  $k_1$  e  $k_2$  são as constantes de velocidade da primeira e da segunda reação de decaimento, respectivamente. Sabendo que o máximo de uma função da forma  $f(t) = e^{at} - e^{bt}$ ,  $b < a < 0$ ,  $t > 0$ , é obtido quando  $ae^{at} - be^{bt} = 0$ , determine a máxima quantidade, em massa, que é atingida pelo elemento R.

Dado:  $\log 2 = 0,30$ ;  $\ln 2 = 0,69$ ;  $\ln 3 = 1,10$ .



## Comentários

Essa questão tive o prazer de resolver ao vivo na prova do IME – 2009. Apesar do enunciado gigante, do ponto de vista químico, não é uma questão difícil, porém, requer muito trabalho matemático por parte do aluno. E essa é uma característica da prova IME.

Basta ter em mente que a fração molar corresponde ao teor de determinado elemento em uma mistura. Por exemplo, a fração molar de Q corresponde à porção de Q dentro o total de núcleos.

$$x_Q = \frac{n_Q}{n_Q + n_R + n_S} = \frac{\text{porção de Q}}{\text{total de núcleos}}$$

Dessa maneira, a soma das frações molares dos três compostos é igual a 1.

$$x_Q + x_R + x_S = 1$$

$$e^{-k_1 t} + x_R + \left(1 - \frac{k_2}{k_2 - k_1} e^{-k_1 t} - \frac{k_1}{k_1 - k_2} e^{-k_2 t}\right) = 1$$

Podemos simplificar o 1 dos dois lados e agrupar os termos com  $e^{-k_1 t}$ .

$$e^{-k_1 t} \left[1 - \frac{k_2}{k_2 - k_1}\right] + x_R - \frac{k_1}{k_1 - k_2} e^{-k_2 t} = 0$$

$$e^{-k_1 t} \left[\frac{(k_2 - k_1) - k_2}{k_2 - k_1}\right] - \frac{k_1}{k_1 - k_2} e^{-k_2 t} + x_R = 0$$

$$-\frac{k_1}{k_2 - k_1} e^{-k_1 t} - \frac{k_1}{k_1 - k_2} e^{-k_2 t} = -x_R$$

Trocando o sinal de todos os termos, temos:

$$x_R = \frac{k_1}{k_2 - k_1} e^{-k_1 t} + \frac{k_1}{k_1 - k_2} e^{-k_2 t}$$

Podemos ver que conseguimos deixar na forma  $f(t) = e^{at} - e^{bt}$  fornecida no enunciado.

$$x_R = -\frac{k_1}{k_1 - k_2} e^{-k_1 t} + \frac{k_1}{k_1 - k_2} e^{-k_2 t} = \frac{k_1}{k_1 - k_2} [e^{-k_2 t} - e^{-k_1 t}]$$

Nesse momento, podemos calcular os tempos de meia-vida para substituir na expressão a que chegamos:



$$t_1 = 23 \text{ anos} \therefore k_1 = \frac{0,69}{23} = \frac{69}{2300} = \frac{3}{100} = 0,03$$

$$t_2 = 34,5 \text{ anos} \therefore k_2 = \frac{0,69}{34,5} = 0,02$$

Temos, portanto, que  $k_1 > k_2$ .

$$x_R = \frac{0,03}{0,02 - 0,03} [e^{-0,02t} - e^{-0,03t}]$$

$$x_R = 3(e^{-0,02t} - e^{-0,03t})$$

Podemos calcular o ponto de máximo da função entre parênteses pela técnica ensinada pelo enunciado.

Temos uma função

$$f(t) = e^{at} - e^{bt}, \text{ em que } a = -0,02 \text{ e } b = -0,03$$

Portanto, fazendo a conta

$$ae^{at} - be^{bt} = 0$$

$$(-0,02)e^{-0,02t} - (-0,03) \cdot e^{-0,03t} = 0$$

$$(0,03) \cdot e^{-0,03t} = 0,02 \cdot e^{-0,02t}$$

Isolando o t do lado esquerdo, temos:

$$\therefore \frac{e^{-0,03t}}{e^{-0,02t}} = \frac{0,02}{0,03} = \frac{2}{3}$$

$$e^{-0,03t+0,02t} = \frac{2}{3}$$

$$e^{-0,01t} = \frac{2}{3}$$

Aplicando o logaritmo natural de ambos os lados, temos:

$$-0,01t = \ln\left(\frac{2}{3}\right) = \ln(2) - \ln(3) = 0,69 - 1,10 = -0,41$$

$$\therefore t_{max} = \frac{-0,41}{-0,01} = 41$$

Sendo assim, o máximo da fração molar de R é obtida em  $t = 41$  anos. Agora, basta substituir:

$$x_R = 3(e^{-0,02 \cdot 41} - e^{-0,03 \cdot 41}) = 3 \cdot (e^{-0,82} - e^{-1,23})$$





As potências podem ser calculadas, se nós notarmos que tanto 0,82 como 1,23 são múltiplos de 0,41, que é igual à diferença  $1,10 - 0,69 = 0,41$ .

$$e^{-0,41} = \frac{e^{0,69}}{e^{1,10}} = \frac{2}{3}$$

$$e^{-0,82} = \left(\frac{2}{3}\right)^2 = \frac{4}{9}$$

$$e^{-1,23} = \left(\frac{2}{3}\right)^3 = \frac{8}{27}$$

Substituindo os valores calculados na expressão da fração molar, temos:

$$x_R = 3 \cdot (e^{-0,82} - e^{-1,23}) = 3 \left( \frac{4}{9} - \frac{8}{27} \right) = 3 \left( \frac{12 - 8}{27} \right) = \frac{3 \cdot 4}{27} = \frac{4}{9}$$

Agora que já calculamos a fração molar de R, podemos obter o seu número de mols e, conseqüentemente, a sua massa obtida.

Para isso, precisamos calcular a quantidade inicial em mols de Q presentes na amostra. Da Estequiometria:

$$n_Q = \frac{\text{massa de } Q}{\text{massa molar de } Q} = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ mol}$$

Havia 0,01 mol de Q antes do início do decaimento. No instante em que a fração molar de R era máxima, o número de mols desse isótopo equivalia a  $\frac{4}{9}$  de 0,01 mol. Com isso, podemos escrever:

$$n_R = \frac{4}{9} \cdot \frac{1}{100} = \frac{4}{900}$$

Finalmente, podemos calcular a massa multiplicando o número de mols obtido pela massa molar do isótopo, que pode ser considerada numericamente como aproximadamente igual ao seu número de massa, que 96.

$$m_R = \frac{4}{900} \cdot 96 \cong 0,43 \text{ g}$$

**Gabarito: 0,43 g**

42. (IME – 2011)



Os isótopos do urânio  $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$  aparecem na natureza sempre juntos. Como o  $^{235}\text{U}$  não é gerado a partir do  $^{238}\text{U}$  por desintegração e admitindo que não há razão para privilegiar um em relação ao outro, podemos supor que o Criador os tenha colocado em proporções iguais no momento da formação da Terra. Considerando válida tal hipótese, calcule a idade que nosso planeta teria.

### Dados:

Tempo de meia-vida do  $^{238}\text{U}$ :  $4,50 \times 10^9$  anos

Tempo de meia-vida do  $^{235}\text{U}$ :  $7,07 \times 10^8$  anos

Abundância isotrópica do  $^{238}\text{U}$ : 99,28%

Abundância isotrópica do  $^{235}\text{U}$ : 0,72%

$\log 0,9928 = -0,0031$

$\log 2 = 0,30$

$\log 3 = 0,48$

$\log 3,1 = 0,49$

$\ln 2 = 0,69$

$\ln 3 = 1,1$

$\ln 137,9 = 4,9$

$5^{1/2} = 2,24$

### Comentários

Consideremos que, no momento da criação da Terra, as abundâncias dos isótopos eram iguais a  $n_0$ . Podemos escrever as suas equações de decaimento.

$$^{238}\text{U} \quad n_1(t) = n_0 \cdot e^{-k_1 t} \quad t_1 = 7,07 \cdot 10^8$$

$$^{235}\text{U} \quad n_2(t) = n_0 \cdot e^{-k_2 t} \quad t_2 = 7,07 \cdot 10^8$$

No momento presente, temos a razão entre as quantidades dos dois isótopos.

$$\frac{n_1(t)}{n_2(t)} = \frac{0,9928}{0,072}$$

Podemos trabalhar a razão agora empregando

$$\frac{n_1(t)}{n_2(t)} = \frac{n_0 e^{-k_1 t}}{n_0 e^{-k_2 t}} = e^{-k_1 t + k_2 t} = e^{(k_2 - k_1)t}$$

Agora, basta igualar as duas equações.



$$e^{(k_2 - k_1)t} = \frac{0,9928}{0,0072}$$

Podemos tirar o logaritmo natural de ambos os lados e teremos:

$$\therefore (k_2 - k_1)t = \ln\left(\frac{0,9928}{0,0072}\right) = \ln(0,9928) - \ln(0,0072)$$

Podemos substituir as expressões das constantes de decaimento em função do tempo de meia-vida.

$$\therefore \left(\frac{\ln 2}{t_2} - \frac{\ln 2}{t_1}\right)t = \ln(0,9928) - \ln(0,0072)$$

Como foram fornecidos os logaritmos na base 10, podemos realizar a mudança de base simplesmente dividindo por  $\ln 10$ .

$$\therefore \left(\frac{\log 2}{t_2} - \frac{\log 2}{t_1}\right)t = \log(0,9928) - \log(0,0072)$$

Podemos calcular o logaritmo natural de 0,0072 pelos dados fornecidos do enunciado notando que:

$$0,0072 = \frac{72}{10000} = \frac{8 \cdot 9}{10000} = \frac{2^3 \cdot 3^2}{10^4}$$

Tirando o logaritmo dessa decomposição, temos:

$$\log(0,0072) = 3 \cdot \log(2) + 2 \cdot \log(3) - 4 = 3 \cdot 0,30 + 2 \cdot 0,48 - 4 = 0,90 + 0,96 - 4 = -2,14$$

Substituindo esse logaritmo na equação previamente encontrada, temos:

$$\left(\frac{\log 2}{t_2} - \frac{\log 2}{t_1}\right)t = \log(0,9928) - \log(0,0072)$$

$$\therefore \left(\frac{0,30}{t_2} - \frac{0,30}{t_1}\right)t = \log(0,9928) - \log(0,0072) = -0,0031 + 2,14 = 2,1369$$

Agora, basta substituir os tempos de meia-vida.

$$0,30t \cdot \left(\frac{1}{7,07 \cdot 10^8} - \frac{1}{4,5 \cdot 10^9}\right) = 2,1369$$

Multiplicando por  $10^9$  ambos os lados, temos:



$$0,30t. \left( \frac{10}{7,07} - \frac{1}{4,5} \right) = 2,1369.10^9$$

$$0,30t. \left( \frac{45 - 7,07}{7,07.4,5} \right) = 2,1369.10^9$$

$$0,30t. \left( \frac{37,93}{7,07.4,5} \right) = 2,1369.10^9$$

Fazendo o meio pelos extremos.

$$\therefore t = \frac{2,1369.10^9}{0,30} \cdot \frac{7,07.4,5}{37,93} \cong 5,97.10^9 = 5,97 \text{ bilhões de anos}$$

**Gabarito: 5,97 bilhões de anos**

### 43. (IME – 2015)

O oxigênio 15, um isótopo radioativo, é utilizado na tomografia por emissão de pósitrons para avaliar a perfusão sanguínea e o consumo de oxigênio em distintas regiões do cérebro. Sabendo que uma amostra com 7,5 g desse isótopo radioativo ( ${}^8\text{O}^{15}$ ) produz  $1,0 \times 10^{23}$  emissões de radiação por minuto, determine o tempo para que essa amostra passe a produzir  $2,5 \times 10^{22}$  emissões de radiação por minuto.

**Dados:**  $\ln 2 = 0,693$ ; Número de Avogadro =  $6.10^{23}$

### Comentários

Devemos nos lembrar que a atividade do isótopo se relaciona com o número de núcleos presentes na amostra através da constante de decaimento radioativo.

$$A = kN$$

O número de núcleos radioativos pode ser calculado pela Estequiometria, dividindo a massa fornecida pela massa molar do isótopo.

$$n = \frac{\text{massa de } \text{O}^{15}}{\text{massa molar de } \text{O}^{15}} = \frac{7,5}{15} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ mol}$$

O número de núcleos pode ser obtido multiplicando o número de mols pelo número de Avogadro.

$$N = 0,5.6.10^{23} = 3.10^{23} \text{ núcleos}$$

Agora, podemos obter a constante de decaimento radioativo.



$$A = kN \therefore k = \frac{A}{N}$$

$$k = \frac{1 \cdot 10^{23}}{3 \cdot 10^{23}} = \frac{1}{3} \text{ min}^{-1}$$

Com base na constante de decaimento, podemos calcular o tempo de meia-vida do  $^{15}\text{O}$ .

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0,693}{1/3} = 0,693 \cdot 3 \cong 2,08 \text{ min}$$

Por fim, podemos calcular o tempo necessário para a redução na atividade desejada na questão levando em conta que o decaimento é exponencial.

$$A(t) = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

$$2,5 \cdot 10^{22} = 1,0 \cdot 10^{23} \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}}$$

$$\therefore \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_{1/2}} = \frac{2,5 \cdot 10^{22}}{1,0 \cdot 10^{23}} = \frac{1}{4} = \left(\frac{1}{2}\right)^2$$

Dessa forma, temos:

$$\frac{t}{t_{1/2}} = 2 \therefore t = 2t_{1/2} = 2 \cdot 2,08 = 4,16 \text{ min}$$

**Gabarito: 4,16 min**

---

#### 44. (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.

#### 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.

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

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

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

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.

$$\begin{aligned} \frac{m_{Ar}}{m_K} &= 0,107 \cdot (e^{kt} - 1) = 0,95 \\ \therefore e^{kt} - 1 &= \frac{0,95}{0,107} = 8,9 \therefore e^{kt} = 9,9 \end{aligned}$$

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

$$kt = \ln(9,8) \therefore t = \frac{\ln(9,8)}{k} = \frac{\ln(9,8)}{\ln 2} \cdot t_{1/2}$$

Aplicando a propriedade da mudança de base, temos:

$$t = \log_2(9,8) \cdot 1,27 \cdot 10^9 \text{ anos}$$

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.



$$t = 3,3.1,27.10^9 \cong 4,2 \text{ bilhões}$$

**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**

#### 45. (IME – 2016)

O trítio é produzido na atmosfera por raios cósmicos. Ao combinar-se com o oxigênio e o hidrogênio, precipita-se sob a forma de chuva. Uma vez que a incidência de raios cósmicos varia com a região da Terra, as águas pluviais de regiões diferentes terão diferentes concentrações de trítio.

Os dados abaixo correspondem às concentrações de trítio (expressas em número de desintegrações por minuto por litro) em águas pluviais de diferentes regiões do Brasil:

Estação Pluviométrica	Desintegrações do trítio (desintegrações/min.L)
Manaus	11,5
Belém	9,0
Vale do São Francisco	6,0
São Joaquim	16,0
Serra Gaúcha	25,0

Um antigo lote de garrafas de vinho foi encontrado sem rótulos, mas com a data de envasamento na rolha, conferindo ao vinho uma idade de 16 anos. Uma medida atual da concentração de trítio neste vinho indicou 6,5 desintegrações/min.L

Considerando que a concentração de trítio no momento do envasamento do vinho é igual à das águas pluviais de sua região produtora, identifique o local de procedência deste vinho, justificando sua resposta.

**Dados:** Tempos de meia vida:

$${}^3_1\text{H} = 12,32 \text{ anos} ; \ln 2 = 0,693 ; \ln 1,105 = 0,1 ; e = 2,72$$



## Comentários

Para obter a origem do vinho, devemos calcular a sua atividade há 16 anos. Utilizando a equação de decaimento exponencial.

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

A constante de decaimento pode ser obtida a partir do tempo de meia vida que foi fornecido.

$$k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0,693}{12,32} = \frac{693}{12320}$$

Podemos fazer algumas simplificações.

$$k = \frac{693}{12320} \xrightarrow{\text{por 7}} \frac{99}{1760} \xrightarrow{\text{por 11}} \frac{9}{160}$$

Agora, podemos aplicar esse valor calculado na equação de decaimento.

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

$$6,5 = A_0 \cdot e^{-\frac{9}{160} \cdot 16} = A_0 e^{-0,9} \therefore A_0 = 6,5 \cdot e^{0,9}$$

A exponencial encontrada pode ser calculada com base nos dados fornecidos no enunciado.

Vejamos:

$$e^{0,9} = e^{1-0,1} = \frac{e}{e^{0,1}} = \frac{2,72}{1,105}$$

Sendo assim, a atividade inicial do trítio no vinho era.

$$A_0 = \frac{6,5 \cdot 2,72}{1,105}$$

Quando o denominador termina em 5, é interessante multiplicar por 2 para facilitar as contas.

$$A_0 = \frac{13,272}{2,21} = \frac{13,272}{221}$$

Felizmente, 221 pode ser simplificado por 13.

$$A_0 = \frac{272}{17} = 16$$

Como a atividade inicial no vinho era de 16 desintegrações/min.L, esse vinho é proveniente de São Joaquim.





## Gabarito: São Joaquim

---

