

**2K.1 O decaimento nuclear**

- 2K.1a As reações nucleares
- 2K.1b Os tipos de decaimento nuclear
- 2K.1c A estabilidade nuclear

2K.2 A energia nuclear

- 2K.2a A conversão massa-energia
- 2K.2b A extração da energia nuclear
- 2K.2c A química da energia nuclear
- 2K.2d Os efeitos biológicos da radiação

2K.3 A radioatividade

- 2K.3a A medida da velocidade de decaimento nuclear
- 2K.3b A datação
- 2K.3c A determinação de volumes
- 2K.3d Os usos dos radioisótopos

2K.1 O decaimento nuclear

Os núcleos atômicos são partículas extraordinárias. Eles contêm todos os prótons do átomo, comprimidos em um pequeno volume, apesar de suas cargas positivas. A maior parte dos núcleos sobrevive indefinidamente apesar das imensas forças repulsivas que existem entre os prótons, porque os nêutrons contribuem para a *força intensa* que une os núcleons (os prótons e os nêutrons). Em alguns núcleos, no entanto, as forças de repulsão exercidas pelos prótons uns sobre os outros superam essa força intensa. Ocorre, então, a ejeção de fragmentos dos núcleos, um processo chamado de **decaimento**.

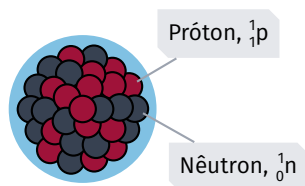


FIG. 2K.1 Um núcleo pode ser representado como uma coleção de prótons (em vermelho) e nêutrons (em cinza) fortemente ligados. O diâmetro de um núcleo é de cerca de $10 \text{ fm} = 10^{-14} \text{ m}$.

2K.1a As reações nucleares

Em 1896, o cientista francês Henri Becquerel guardou uma amostra de óxido de urânio em uma gaveta que continha algumas placas fotográficas. Ele ficou surpreso ao ver que o composto de urânio havia escurecido as placas, apesar de elas terem sido cobertas com um material opaco. Becquerel percebeu que o composto de urânio deveria estar emitindo algum tipo de radiação. Marie Sklodowska Curie, uma jovem estudante polonesa que preparava seu doutorado, mostrou que a radiação, que ela chamou de **radioatividade**, era emitida pelo urânio, independentemente do composto em que ele estava. Ela concluiu que os átomos de urânio eram a fonte da radiação. Juntamente com seu marido, Pierre, ela continuou a trabalhar e mostrou que o tório, o rádio e o polônio também eram

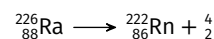
radioativos.

A origem da radioatividade foi inicialmente um mistério, porque a existência dos núcleos atômicos era desconhecida até então. Porém, em 1898, Ernest Rutherford deu o primeiro passo para a descoberta de sua origem, quando identificou três diferentes tipos de radioatividade ao observar o efeito de campos elétricos sobre as emissões radioativas. Rutherford chamou esses três tipos de radiação de alfa (α), beta (β) e gama (γ).

As reações nucleares diferem das reações químicas em alguns aspectos importantes. Nas reações químicas, os átomos preservam sua identidade e apenas redistribuem seus elétrons; nas reações nucleares, o próprio núcleo se transforma. Um átomo com determinado número atômico Z (número de prótons) e número de massa A (número total de núcleons) é chamado de **nuclídeo**. Quando um núcleo emite uma partícula, em geral muda seu número de prótons e se converte no núcleo de outro elemento — um processo chamado de **transmutação nuclear**. O núcleo resultante é o **núcleo filho**.

As variações de energia das reações nucleares são muito maiores do que as das reações químicas. A combustão de 1 g de metano libera cerca de 52 kJ, enquanto a fissão de 1 g de urânio-235 libera cerca de $8,2 \times 10^7 \text{ kJ}$ — mais de um milhão de vezes mais.

A transformação de um núcleo é descrita por uma **equação nuclear**, na qual o número de massa e o número atômico se conservam. Por exemplo, quando o rádio-226 emite uma partícula α , forma-se o radônio-222:



A soma dos números de massa ($222 + 4 = 226$) e a dos números atômicos ($86 + 2 = 88$) são as mesmas nos dois lados da equação.

As reações nucleares podem levar à formação de diferentes elementos. A transmutação de um núcleo pode ser predita com base nos números atômicos e nos números de massa da equação nuclear do processo.

2K.1b Os tipos de decaimento nuclear**A emissão de partículas alfa**

Quando Rutherford fez passar a radiação entre dois eletrodos com carga elétrica, ele observou que um dos tipos de radiação era atraído para o eletrodo com carga negativa. Ele propôs que aquele tipo de radiação envolvia partículas com carga positiva, que chamou de partículas α . Assim que ele identificou o núcleo atômico em 1908, Rutherford percebeu que a partícula α deveria ser o núcleo do hélio, He^{2+} . Uma partícula α é representada por ${}^4_2\text{He}$, ou, simplesmente, α . Você pode imaginá-la como sendo formada por dois prótons e dois nêutrons fortemente ligados.

A emissão de partículas beta

Rutherford mostrou que um segundo tipo de radiação era atraído pelo eletrodo com carga positiva e propôs que aquele tipo de radiação era formado por um feixe de partículas com carga negativa. A partir da medida da carga e da massa dessas partículas, ele mostrou que elas eram elétrons. Os elétrons de alta velocidade emitidos pelos núcleos foram chamados de partículas β e representados

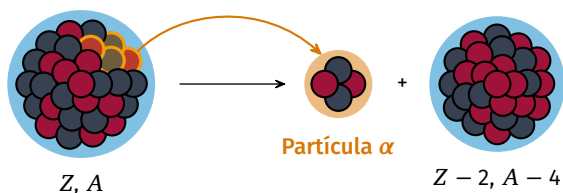


FIG. 2K.2 Quando um núcleo ejeta uma partícula α , o número atômico do átomo diminui 2 unidades e o número de massa diminui 4 unidades. Os núcleons ejetados do núcleo que está acima estão indicados pela linha dourada.

por β^- . Como a partícula β não tem prótons ou nêutrons, seu número de massa é zero e ela pode ser escrita como ${}_{-1}^0e$. Na emissão β , um nêutron do núcleo se converte em um próton, de modo que o número atômico aumenta uma unidade, mas o número de massa permanece o mesmo.

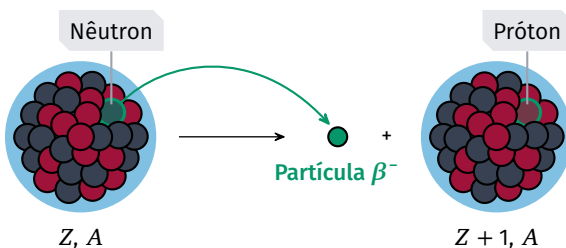


FIG. 2K.3 Quando um núcleo ejeta uma partícula β , o número atômico aumenta uma unidade e o número de massa permanece o mesmo. O nêutron que consideramos como a origem do elétron está indicado pela linha dourada no núcleo que está acima no diagrama.

ATENÇÃO

É importante distinguir:

- Na **emissão β** , os elétrons são emitidos pelo núcleo.
- Na **ionização**, os elétrons são removidos da eletrosfera.

A emissão de pósitrons

Alguns núcleos emitem **antipartículas** — partículas com a mesma massa de uma partícula subatômica, mas com carga oposta. O **pósitron** é a antipartícula do elétron: tem a massa do elétron, mas carga positiva. Ele é representado por ${}_{+1}^0e$ ou β^+ . Na emissão de pósitron, um próton do núcleo se converte em um nêutron. Como resultado, o número atômico diminui uma unidade, mas o número de massa permanece o mesmo. Quando um pósitron encontra um elétron, ambos se aniquilam e sua massa é completamente convertida em energia.

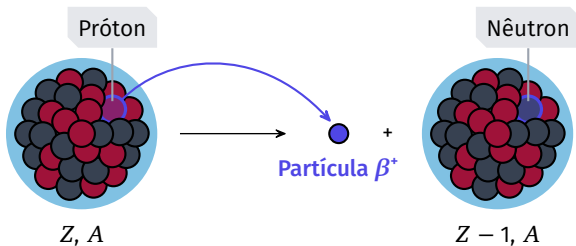


FIG. 2K.4 Na emissão de pósitrons, o núcleo ejeta um pósitron. O efeito é a conversão de um próton em um nêutron. Como resultado, o número atômico diminui uma unidade, mas o número de massa permanece o mesmo.

A emissão de radiação gama

A radiação γ não é afetada por campos elétricos. Como a luz, os raios γ são uma forma de radiação eletromagnética, mas de frequência muito mais alta. Eles podem ser vistos como um feixe de fótons de energia muito alta, cada fóton sendo emitido por um núcleo que descarrega o excesso de energia. A frequência ν do raio γ está relacionada com a energia liberada pelo núcleo, ΔE , pela relação $\nu = \Delta E/h$. A emissão γ frequentemente acompanha as emissões α e β : o novo núcleo é formado com seus núcleons em um estado de alta energia e libera um fóton γ quando eles se reorganizam em um arranjo de energia mais baixa.

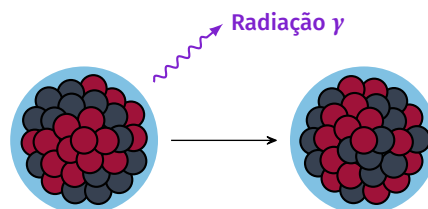


FIG. 2K.5 Depois que o núcleo decai, os núcleons que permanecem no núcleo podem estar em um estado de alta energia, como se pode ver no arranjo expandido da parte superior da ilustração. Quando os núcleons se ajustam em um arranjo de energia mais baixa, o excesso de energia é liberado como um fóton de raios γ .

A captura de elétrons

Na **captura de elétron**, um elétron de um orbital atômico é capturado pelo núcleo, e um próton é convertido em um nêutron. O efeito sobre o núcleo é o mesmo da emissão de pósitron: o número atômico diminui uma unidade, mas o número de massa permanece o mesmo.

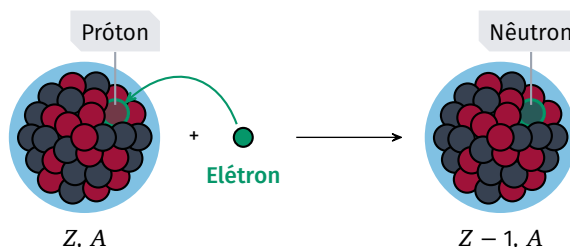


FIG. 2K.6 Na captura de um elétron, um núcleo captura um elétron da vizinhança. O efeito é a conversão de um próton (marcado em dourado, no alto) em um nêutron (marcado em dourado, na parte inferior). Como resultado, o número atômico diminui uma unidade, mas o número de massa permanece o mesmo.

TAB. 2K.1 Radiação nuclear

Tipo	Partícula	Penetração	Velocidade
α	Hélio-4, ${}_{2}^4\text{He}$	Baixa	$\approx 0,1 c$
β^-	Elétron, ${}_{-1}^0e$	Moderada	$< 0,9 c$
β^+	Pósitron, ${}_{+1}^0e$	Moderada	$< 0,9 c$
γ	Fóton, γ	Alta	c
p	Próton, ${}_{1}^1p$	Moderada/baixa	$\approx 0,1 c$
n	Nêutron, ${}_{0}^1n$	Alta	$< 0,1 c$

Os tipos mais comuns de radiação emitidos pelos núcleos radioativos são as partículas α (núcleos de átomos de hélio), as partículas β (elétrons rápidos ejetados pelos núcleos) e raios γ (radiação eletromagnética de alta energia).

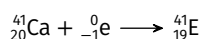
EX. 2K.1 Predição do núcleo filho

Quando núclídeos radioativos são usados na medicina e na indústria, é importante conhecer o núclídeo filho formado.

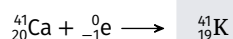
Determine o núclídeo produzido quando (a) o cálcio-41 captura um elétron; (b) o oxigênio-15 emite um pósitron.

Etapa 1. (a) Captura de elétron pelo cálcio-41.

Na captura de elétron, o número de massa não muda e o número atômico diminui uma unidade. Conservando o número de massa A e o número atômico Z :

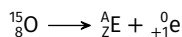


Como $A = 41$ e $Z = 20 - 1 = 19$, o elemento é o potássio:

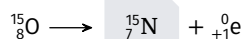


Etapa 2. (b) Emissão de pósitron pelo oxigênio-15.

Na emissão de pósitron, o número de massa não muda e o número atômico diminui uma unidade:



Como $A = 15$ e $Z = 8 - 1 = 7$, o elemento é o nitrogênio:



2K.1c A estabilidade nuclear

O padrão da estabilidade nuclear

Os núcleos de alguns elementos são estáveis, mas outros decaem assim que formados. Saber prever a estabilidade permite antecipar os caminhos de decaimento. Uma primeira pista é que os elementos de número atômico par são quase sempre mais abundantes do que os de número atômico ímpar.

Os núcleos com números **pares** de prótons e de nêutrons são os mais estáveis; os menos estáveis são os que têm números ímpares de ambos. Os núcleos também têm maior probabilidade de ser estáveis quando são formados por certos números de núcleons, chamados de **números mágicos**: 2, 8, 20, 50, 82, 114, 126 e 184. Por exemplo, existem dez isótopos estáveis de estanho ($Z = 50$), o máximo que um elemento atinge. Esse padrão lembra a estabilidade especial dos gases nobres, cujos átomos têm 2, 10, 18, 36, 54 ou 86 elétrons. A partícula α , com dois prótons e dois nêutrons, é um núcleo *duplamente mágico*.

Quando se representa o número de nêutrons N em função do número de prótons Z , os núcleos estáveis ficam reunidos em uma estreita **banda de estabilidade**, cercada por um **mar de instabilidade** — a região dos núclídeos que decaem por emissão de radiação. Para os elementos leves, o número de prótons e o de nêutrons dos núcleos estáveis são aproximadamente iguais ($A \approx 2Z$). Para

os elementos mais pesados, os núcleos estáveis têm mais nêutrons do que prótons ($A > 2Z$).

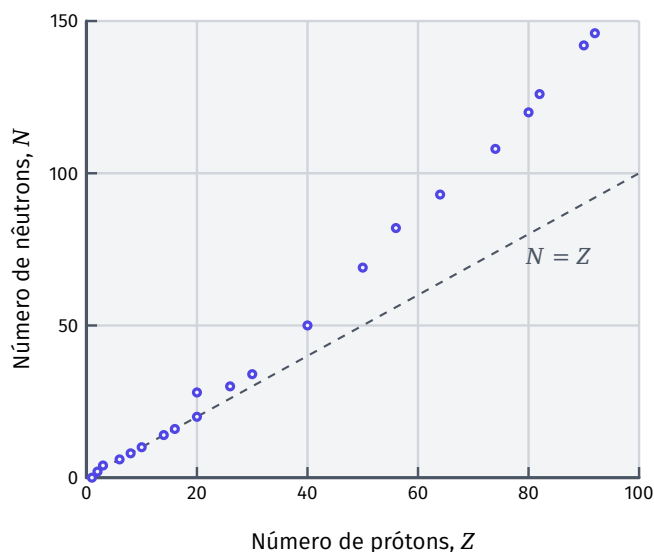


FIG. 2K.7 A banda de estabilidade: número de nêutrons N em função do número de prótons Z dos núclídeos estáveis. A reta tracejada corresponde a $N = Z$. Para os núcleos leves, $N \approx Z$; para os mais pesados, são necessários cada vez mais nêutrons, e a banda se afasta dessa reta.

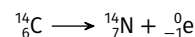
O aumento da proporção de nêutrons com o número atômico é explicado pelo papel dos nêutrons. A força intensa que mantém os núcleons unidos só age a distâncias muito curtas, da ordem do diâmetro do núcleo, ao passo que a repulsão elétrica entre os prótons atua a distâncias maiores. Como os nêutrons não têm carga, eles contribuem para a força intensa sem aumentar a repulsão. À medida que o número de prótons cresce, são necessários cada vez mais nêutrons para superar a repulsão — por isso a banda de estabilidade é ascendente.

Os núcleos que têm números pares de prótons e de nêutrons são os mais estáveis.

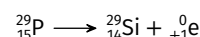
A previsão do tipo de decaimento nuclear

A posição de um núclídeo em relação à banda de estabilidade indica o tipo mais provável de decaimento.

Os **núcleos ricos em nêutrons** — acima da banda de estabilidade — tendem a reduzir o número de nêutrons. Eles decaem por emissão β^- , na qual um nêutron se converte em um próton, aproximando a razão entre nêutrons e prótons da banda de estabilidade. Por exemplo:



Os **núcleos ricos em prótons** — abaixo da banda — tendem a reduzir o número de prótons, por emissão de pósitron ou por captura de elétron. Por exemplo:



Poucos núclídeos com $Z < 60$ emitem partículas α . Já praticamente todos os núcleos com $Z > 82$ são instáveis e decaem principalmente por emissão α , eliminando prótons e nêutrons de uma vez. Em geral, esses núcleos pesados não atingem a estabilidade em uma única etapa: eles decaem por uma sequência de emissões, formando uma **série radioativa**, que termina em um isótopo estável do chumbo (de número atômico mágico 82). A série do urânio-238 termina no chumbo-206; a do urânio-235, no chumbo-207; e a do tório-232, no chumbo-208.

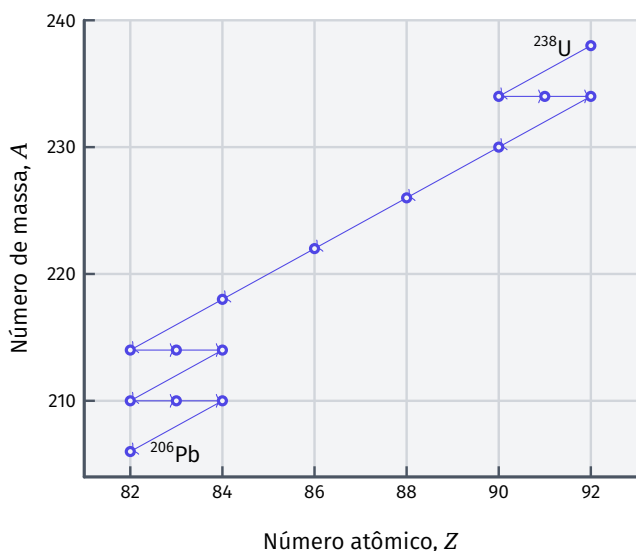


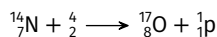
FIG. 2K.8 Série radioativa do urânio-238: cada etapa é uma emissão α (que reduz o número de massa em 4 e o número atômico em 2) ou uma emissão β (que aumenta o número atômico em 1). A série termina no chumbo-206, estável.

O padrão de estabilidade nuclear pode ser usado para prever o modo de decaimento radioativo. Os núcleos ricos em nêutrons tendem a reduzir o número de nêutrons, e os núcleos ricos em prótons tendem a reduzir o número de prótons. Em geral, somente os núclídeos pesados emitem partículas α .

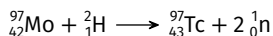
A nucleossíntese

A **nucleossíntese** é o processo de formação dos elementos. O hidrogênio e o hélio foram produzidos no Big Bang; todos os demais elementos descendem desses dois, formados nas estrelas. Alguns elementos só existem em traços na Terra: embora tenham sido produzidos nas estrelas, seu tempo de vida curto impediu que sobrevivessem em quantidade até a formação do planeta. Muitos desses núclídeos podem, no entanto, ser produzidos artificialmente.

Para superar a repulsão elétrica e provocar a fusão dos núcleos, as partículas precisam colidir em alta velocidade. A transmutação artificial de um elemento em outro foi obtida pela primeira vez por Rutherford, em 1919, ao bombardear núcleos de nitrogênio-14 com partículas α :



As partículas incidentes podem ser aceleradas em um acelerador de partículas. Por exemplo, o tecnécio foi sintetizado pela reação entre núcleos de molibdênio e dêuterons (${}^2_1\text{H}$):



Esses processos costumam ser escritos de forma abreviada como alvo(partícula incidente, partícula ejetada)produto; a reação acima é ${}^{97}_{42}\text{Mo}(d, 2n){}^{97}_{43}\text{Tc}$, em que d denota o dêuteron.

Os **elementos transurânicos** são os que seguem o urânio na tabela periódica. Os elementos além do meitnério ($Z = 109$) — os **transmeitnérios** — recebem nomes sistemáticos provisórios até serem oficialmente reconhecidos. A nomenclatura sistemática usa prefixos para cada algarismo do número atômico (0 = *nil*, 1 = *un*, 2 = *bi*, 3 = *tri*, e assim por diante), com a terminação *-io*. Assim, o elemento de $Z = 110$ foi chamado de *ununnilio* até receber o nome darmstádio (Ds), em 2003.

Novos elementos e isótopos de elementos conhecidos são produzidos por nucleossíntese. As forças elétricas repulsivas das partículas com cargas de mesmo nome são superadas quando partículas colidem em alta velocidade.

2K.2 A energia nuclear

Quando os núcleos decaem, os núcleons adotam novas configurações, de energia menor. O problema tecnológico diante da energia nuclear diz respeito ao aproveitamento dessa diferença de energia e seu uso na geração de energia elétrica. O problema associado é que o material que permanece após o combustível ter se esgotado é altamente radioativo e precisa ser isolado do meio ambiente. Os dois problemas podem ser abordados com a química.

2K.2a A conversão massa-energia

A energia liberada quando um núcleo radioativo decai pode ser calculada comparando-se as massas dos reagentes e dos produtos nucleares. A teoria da relatividade de Einstein diz que a massa de um objeto é uma medida de seu conteúdo de energia. Quanto maior for a massa de um objeto, maior será sua energia. Mais especificamente, a energia total, E , e a massa, m , relacionam-se pela famosa equação de Einstein.

$$E = mc^2$$

em que c é a velocidade da luz, $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Essa relação mostra que a perda de energia é sempre acompanhada de perda de massa.

A perda de massa que sempre acompanha a perda de energia é normalmente muito pequena para ser detectada. Mesmo nas reações químicas fortemente exotérmicas, como uma que libera 1000 kJ de energia, a diferença entre as massas dos produtos e reagentes é somente 10 ng. Em uma reação nuclear, em que as trocas de energia são muito grandes, a perda de massa é mensurável, e podemos calcular a energia liberada a partir da variação observada na massa.

Um núcleo pode ser visto como o resultado da união de núcleons (prótons e nêutrons). A **energia de ligação nuclear**, E_{lig} , é a energia liberada nesse processo. Todas as energias de ligação são positivas, isto é, o núcleo tem energia mais baixa do que a dos núcleons que o formam. Quanto maior for a energia de ligação, menor será a energia do núcleo.

A equação de Einstein pode ser usada para calcular a energia de ligação nuclear a partir da diferença de massa, Δm , entre o núcleo e os núcleons separados.

$$\Delta m = m_{\text{núcleo}} - \sum m_{\text{núcleons}}$$

Por exemplo, o ferro-56 tem 26 prótons, cada um com massa m_p , e 30 nêutrons, cada um com massa m_n . A diferença de massa entre o núcleo e os núcleons separados é

$$\Delta m = m_{\text{Fe-56}} - (26m_p + 30m_n)$$

As massas dos núcleos isolados não são obtidas com facilidade, e em muitos casos são substituídas pelas massas dos núclídeos. Essa massa inclui a massa total de todos os Z elétrons em um átomo com número atômico Z , mas pode ser cancelada substituindo-se os Z prótons por Z átomos de hidrogênio, com seus Z elétrons. Existe uma pequena discrepância no valor da energia de ligação calculada desta maneira, porque as contribuições das energias dos elétrons no átomo são ligeiramente diferentes, comparadas com as dos átomos de hidrogênio. Porém, esta contribuição é tão pequena que pode ser ignorada (exceto em cálculos mais detalhados). A energia de ligação é calculada a partir da diferença de massa:

$$E_{\text{lig}} = -\Delta m \times c^2$$

O sinal negativo está presente porque uma perda de massa ($\Delta m < 0$) corresponde a uma energia de ligação positiva. As energias de ligação são apresentadas em elétron-volts ou, mais especificamente, milhões de elétron-volts:

$$1 \text{ MeV} = 1,60 \times 10^{-13} \text{ J}$$

Como as massas dos núclídeos são muito pequenas, elas são normalmente dadas como múltiplos da constante de massa atômica:

$$m_u = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

A constante de massa atômica é definida como exatamente 1/12 da massa de um átomo de carbono-12.

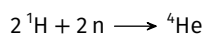
EX. 2K.2 Cálculo da energia de ligação nuclear

As massas, em múltiplos da constante de massa atômica m_u , são $m(^4\text{He}) = 4,0026$, $m(^1\text{H}) = 1,0078$ e $m(n) = 1,0087$.

Calcule a energia de ligação do núcleo de hélio-4, em milhões de elétron-volts.

Etapa 1. Escreva a formação do núcleo a partir dos núcleons.

Um núcleo de hélio-4 é formado por dois prótons e dois nêutrons. Substituindo os prótons por átomos de hidrogênio, para cancelar a massa dos elétrons:



Etapa 2. Calcule a variação de massa.

A diferença entre a massa do núcleo e a dos núcleons separados é

$$\Delta m = m(^4\text{He}) - (2m_{\text{H}} + 2m_{\text{n}}) = [4,0026 - 2(1,0078) - 2(1,0087)] m_u = -0,0304 m_u$$

Em quilogramas, com $m_u = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$:

$$\Delta m = -0,0304 \times 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg} = -5,05 \times 10^{-29} \text{ kg}$$

Etapa 3. Calcule a energia de ligação.

De $E_{\text{lig}} = -\Delta m \times c^2$:

$$E_{\text{lig}} = 5,05 \times 10^{-29} \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})^2 = 4,54 \times 10^{-12} \text{ J}$$

Convertendo para milhões de elétron-volts, com $1 \text{ MeV} = 1,60 \times 10^{-13} \text{ J}$:

$$E_{\text{lig}} = 4,54 \times 10^{-12} \text{ J} \times \frac{1 \text{ MeV}}{1,60 \times 10^{-13} \text{ J}} = 28,4 \text{ MeV}$$

A Figura 1 mostra a energia de ligação por núcleon, E_{lig}/A , dos elementos. O gráfico mostra que os núcleons estão mais fortemente ligados nos elementos próximos do ferro e do níquel. Essa energia de ligação elevada é uma das razões pelas quais o ferro e o níquel são tão abundantes em meteoritos e em planetas rochosos como a Terra. Os núcleos dos átomos leves ficam mais estáveis quando se “fundem” e os núcleos pesados liberam mais energia quando sofrem “fissão” e se dividem em núcleos mais leves.

As energias de ligação nucleares são determinadas pela aplicação da fórmula de Einstein à diferença de massa entre o núcleo e seus componentes. O ferro e o níquel têm a energia de ligação mais alta por núcleon.

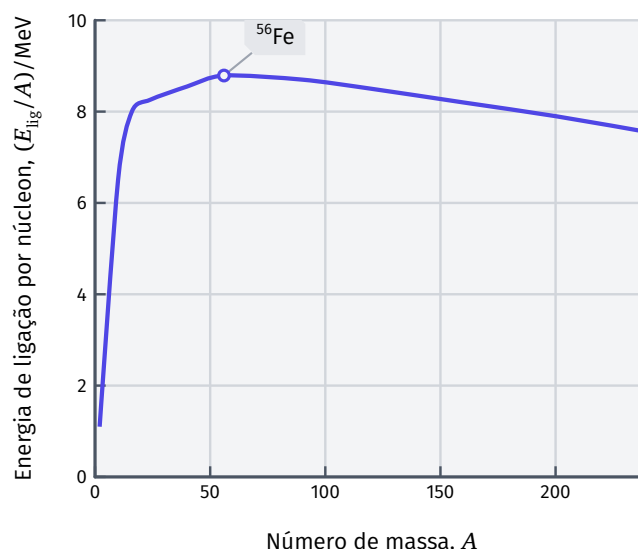


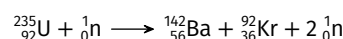
FIG. 2K.9 A energia de ligação por núcleon, E_{lig}/A , em função do número de massa A . A ligação é máxima nos núcleos próximos do ferro e do níquel ($A \approx 56$), que são, por isso, os mais estáveis.

2K.2b A extração da energia nuclear

Na **fissão nuclear**, um núcleo volumoso quebra-se em fragmentos. Na **fusão nuclear**, um núcleo maior é formado a partir de núcleos pequenos. Em 1938, Lise Meitner, Otto Hahn e Fritz Strassman perceberam que, ao bombardear átomos pesados, como o urânio, com nêutrons, eles podiam *quebrar* o átomo em fragmentos menores em reações de fissão e liberar quantidades muito grandes de energia. A energia liberada pode ser estimada usando a equação de Einstein. Dito de outro modo, a variação de energia nos processos de fissão ou fusão está relacionada com a diferença das energias de ligação dos núcleos no estado inicial e final e, portanto, a suas massas.

EX. 2K.3 Cálculo da energia liberada durante a fissão

Quando o urânio-235 é bombardeado com nêutrons, um dos processos de fissão possíveis é



As massas, em múltiplos de m_u , são $m(^{235}\text{U}) = 235,04$, $m(^{142}\text{Ba}) = 141,92$, $m(^{92}\text{Kr}) = 91,92$ e $m(n) = 1,0087$.

Calcule a energia liberada quando 1,0 g de urânio-235 sofre essa fissão.

Etapa 1. Calcule a variação de massa.

A massa total dos produtos e a dos reagentes são

$$m_{\text{produtos}} = [141,92 + 91,92 + 2(1,0087)] m_u = 235,86 m_u$$

$$m_{\text{reagentes}} = [235,04 + 1,0087] m_u = 236,05 m_u$$

A variação de massa do processo, em quilogramas, é

$$\Delta m = (235,86 - 236,05) m_u = -0,19 m_u = -3,15 \times 10^{-28} \text{ kg}$$

Etapa 2. Calcule a energia liberada por núcleo.

De $\Delta E = \Delta m \times c^2$:

$$\Delta E = 3,15 \times 10^{-28} \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})^2 = 2,84 \times 10^{-11} \text{ J}$$

Etapa 3. Calcule o número de núcleos na amostra.

A massa de um átomo de urânio-235 é $235,04 m_u$. Em 1,0 g:

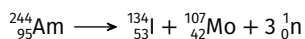
$$N = \frac{1,0 \times 10^{-3} \text{ kg}}{235,04 \times 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}} = 2,56 \times 10^{21}$$

Etapa 4. Calcule a energia total liberada.

$$\Delta E_{\text{total}} = N \times \Delta E = 2,56 \times 10^{21} \times 2,84 \times 10^{-11} \text{ J} = 73 \text{ GJ}$$

Essa energia é cerca de 1,3 milhão de vezes maior do que a liberada na combustão de 1,0 g de metano.

A fissão nuclear espontânea ocorre quando as oscilações naturais de núcleos pesados fazem com que eles se quebrem em dois núcleos de massa semelhante. Um exemplo é a desintegração do amerício-244 em iodo e molibdênio:



A fissão não ocorre sempre da mesma forma. Por exemplo, mais de 200 isótopos de 35 elementos diferentes foram identificados entre os produtos de fissão do urânio-235, a maior parte dos quais com números de massa próximos de 95 ou 137.

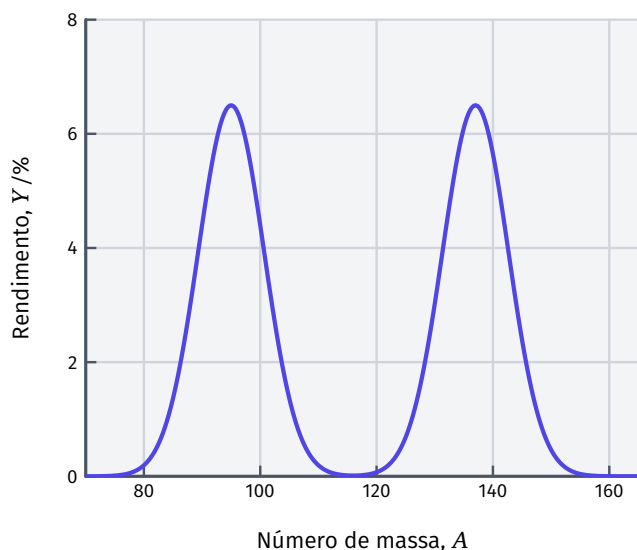
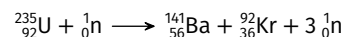


FIG. 2K.10 Rendimento da fissão do urânio-235 em função do número de massa A dos fragmentos. A maior parte dos produtos concentra-se em torno de $A \approx 95$ e $A \approx 137$; a fissão simétrica, em dois fragmentos de massa próxima de $A \approx 117$, é relativamente rara.

A **fissão nuclear induzida** é a fissão causada pelo bombardeamento de núcleos pesados com nêutrons. O núcleo quebra-se em dois fragmentos quando atingido por um projétil. Os núcleos que podem sofrer fissão induzida são chamados de **fissionáveis**. Para a maior parte dos núcleos, a fissão só ocorre se os nêutrons que colidem viajam com rapidez suficiente para atingir os núcleos e quebrá-los pelo impacto. O urânio-238 sofre fissão por esse mecanismo. Os **núcleos físeis**, por outro lado, são os núcleos que podem se quebrar, mesmo com nêutrons lentos. Eles incluem o urânio-235, o urânio-233 e o plutônio-239, que são os combustíveis de usinas nucleares.

Após a indução da fissão nuclear, as reações continuam a ocorrer mesmo se o suprimento de nêutrons for interrompido, desde

que a fissão produza mais nêutrons. Essa fissão autossustentada ocorre nos átomos de urânio-235, que sofre numerosos processos de fissão, inclusive



Se os três nêutrons produzidos se chocam com três outros núcleos físeis, após o ciclo seguinte de fissão, existirão nove nêutrons que podem induzir a fissão em mais nove núcleos. Os nêutrons são propagadores de uma reação em cadeia ramificada.

Os nêutrons produzidos em reações em cadeia movem-se em alta velocidade, e a maior parte escapa para a vizinhança sem colidir com outros núcleos fissionáveis. Entretanto, se um número de núcleos de urânio suficientemente grande estiver presente na amostra, muitos nêutrons podem ser capturados para sustentar a reação em cadeia. Nesse caso, existe uma massa crítica, isto é, uma massa de material fissionável acima da qual poucos nêutrons escapam da amostra, e a reação de fissão em cadeia se sustenta. Se uma amostra é supercrítica, isto é, a massa está acima do valor crítico, a reação é, além de autossustentada, difícil de controlar e pode tornar-se explosiva. A massa crítica para uma esfera sólida de plutônio puro com densidade normal é de aproximadamente 15 kg, uma esfera do tamanho de um melão pequeno.

A fissão explosiva não pode ocorrer em um reator nuclear, porque o combustível não é denso o suficiente. Em vez disso, os reatores sustentam uma reação em cadeia muito mais lenta e controlada, através do uso eficiente de uma fonte limitada de nêutrons e da diminuição de sua velocidade. O combustível é moldado em longos bastões e introduzido em um **moderador**, uma substância que diminui a velocidade dos nêutrons quando eles passam entre os bastões de combustível. Os nêutrons mais lentos têm probabilidade maior de colidir com um núcleo. O primeiro moderador usado foi a grafita. A água pesada, D_2O , também é um moderador efetivo de nêutrons, mas os reatores de água leve (LWRs), que são os mais comuns nos Estados Unidos, usam a água comum como moderador.

Se a velocidade da reação em cadeia exceder um determinado nível, o reator também se aquecerá e começará a fundir. Os bastões de controle — feitos de elementos que absorvem nêutrons, como o boro ou o cádmio, e que são inseridos entre os bastões de combustível — ajudam a controlar o número de nêutrons disponíveis e a velocidade da reação nuclear.

Embora os reatores de fissão não gerem poluição química, eles produzem resíduos radioativos muito perigosos. Entretanto, outro tipo de reação nuclear que está sendo estudado para a geração de energia é a **fusão nuclear**, que é essencialmente livre de resíduos radioativos de vida longa e cujo combustível é abundante e facilmente extraído da água do mar. A reação é a fusão dos núcleos de hidrogênio para formar núcleos de hélio.

Como a energia de ligação nuclear aumenta dos elementos leves (como o hidrogênio) para os mais pesados, ela é liberada quando os núcleos se fundem. A forte repulsão elétrica entre prótons dificulta que eles se aproximem o suficiente para que ocorra a fusão, mas os núcleos dos isótopos mais pesados do hidrogênio fundem-se mais facilmente porque os nêutrons adicionais contribuem para a força intensa. Para conseguir a elevada energia cinética necessária para uma colisão bem-sucedida, os reatores de fusão têm de operar em temperaturas acima de 10^8 K. Um dos métodos usados na liberação controlada da energia nuclear envolve o aquecimento de um **plasma**, ou gás ionizado, pela passagem de uma corrente elétrica.

A energia nuclear pode ser obtida mediante um arranjo para que a reação nuclear em cadeia ocorra com uma massa crítica de material físsil. A fusão nuclear utiliza a energia liberada pela fusão de núcleos leves para formar núcleos mais pesados.

2K.2c A química da energia nuclear

A química é usada na preparação do urânio, na recuperação de importantes produtos de fissão e na remoção segura ou na utilização dos resíduos nucleares. A principal fonte mineral do urânio é a *pechblenda*, UO_2 . O urânio obtido pela redução do minério é **enriquecido**, isto é, a abundância de determinado isótopo é aumentada (no caso, a do urânio-235). A abundância natural do urânio-235 é aproximadamente 0,7%. Para uso em um reator nuclear, essa fração deve ser aumentada para aproximadamente 3,0%. Para uso em armas nucleares, o enriquecimento precisa ser muito maior.

O procedimento de enriquecimento utiliza a pequena diferença de massa entre os hexafluoretos de urânio-235 e de urânio-238 para separá-los. O primeiro procedimento a ser desenvolvido é a transformação do urânio em hexafluoreto de urânio, UF_6 , que pode ser vaporizado facilmente. A diferença entre as velocidades de efusão dos dois fluoretos isotópicos é usada então para separá-los. Segundo a lei de efusão de Graham (Tópico 2C), as velocidades de efusão do $^{235}\text{UF}_6$ (massa molar, 349 g mol^{-1}) e $^{238}\text{UF}_6$ (massa molar, 352 g mol^{-1}) devem estar na razão

$$\frac{\text{velocidade de efusão de } ^{235}\text{UF}_6}{\text{velocidade de efusão de } ^{238}\text{UF}_6} = \sqrt{\frac{352 \text{ g mol}^{-1}}{349 \text{ g mol}^{-1}}} = 1,004$$

Esta relação é tão próxima de 1, que o vapor deve efundir repetidamente através de barreiras porosas formadas por telas com grande número de pequenos orifícios. Na prática, isso tem de ocorrer milhares de vezes.

Como o processo de efusão é tecnicamente complexo e utiliza grande quantidade de energia, os cientistas e os engenheiros continuam a pesquisar procedimentos alternativos de enriquecimento. Um deles utiliza centrífugas em que as amostras de vapor de hexafluoreto de urânio giram em velocidades muito altas. A rotação faz com que as moléculas de $^{238}\text{UF}_6$, mais pesadas, sejam jogadas para fora e possam ser coletadas na forma de um sólido nas peças externas do rotor, deixando uma proporção mais elevada de $^{235}\text{UF}_6$ no material próximo do eixo do rotor, de onde ele pode ser removido.

Depois do uso, o combustível nuclear ainda é radioativo. Ele é formado por uma mistura de urânio e produtos de fissão. Os resíduos do reator nuclear podem ser processados e certa quantidade reutilizada, mas a percentagem processada depende do preço do urânio. Quando o preço é baixo, como era no fim dos anos 90, a maior parte dos resíduos nucleares é armazenada para processamento posterior.

O processamento dos resíduos nucleares é complexo. O urânio-235 remanescente deve ser recuperado, o plutônio produzido deve ser extraído e os produtos de fissão, de pouca utilidade, mas ainda radioativos, devem ser armazenados com segurança. Os produtos de fissão muito radioativos (HRF) dos bastões de combustível nuclear utilizados devem ser armazenados até que seu nível de radioatividade deixe de ser perigoso (cerca de 10 meias-vidas). Geralmente, eles são enterrados, mas mesmo o enterro de resíduos radioativos não está livre de problemas. Os cilindros de metal usados no armazenamento podem sofrer corrosão e liberar resíduos radioativos líquidos que podem atingir fontes de água potável. É possível reduzir o vazamento pela incorporação dos produtos de HRF em um vidro — um sólido formado por uma rede complexa de átomos de silício e de oxigênio — em um processo denominado *vitrificação*. Os produtos de fissão são, geralmente, óxidos do tipo que formam um dos componentes do vidro — eles formam retículos; isto é, ajudam a formar uma rede relativamente desordenada de Si–O, em vez de induzir a cristalização em uma rede ordenada de átomos. A cristalização é perigosa porque as regiões cristalinas facilmente se rompem e poderiam deixar o material radioativo incorporado exposto à umidade. A água poderia dissolvê-los e carregá-los para fora da área de armazenamento. Uma alternativa é incorporar os resíduos radioativos em materiais cerâmicos duros.

Um exemplo é Synroc, um material cerâmico à base de titanatos que pode incorporar os resíduos radioativos em sua rede cristalina.

O urânio é extraído por uma série de reações que levam ao hexafluoreto de urânio. Os isótopos são então separados por vários procedimentos. Alguns resíduos radioativos são atualmente convertidos em vidros ou materiais cerâmicos para serem armazenados no subsolo.

2K.2d Os efeitos biológicos da radiação

A radiação nuclear é algumas vezes chamada de radiação ionizante, porque sua energia é suficiente para ejetar elétrons dos átomos. Os hospitais usam a radiação nuclear para destruir tecidos indesejáveis, como as células cancerosas. Porém, os mesmos efeitos poderosos que facilitam o diagnóstico e a cura de doenças podem também provocar danos em tecidos saudáveis. O dano depende da intensidade da fonte, do tipo de radiação e do tempo de exposição. Os três tipos principais de radiação nuclear têm capacidade diferente de penetrar a matéria.

As partículas α , pesadas e com carga elevada, interagem tão fortemente com a matéria que sua velocidade se reduz, elas capturam elétrons da matéria circundante e se transformam em volumosos átomos de hélio antes de viajar para muito longe. Elas só penetram a primeira camada da pele e podem ser freadas por vidro, pela roupa e até mesmo por uma folha de papel. A camada superficial da pele morta absorve a maior parte da radiação α , e nela os danos são pequenos. Entretanto, as partículas α podem ser extremamente perigosas se inaladas ou ingeridas. A energia do impacto pode arrancar átomos de moléculas, o que pode levar a sérias doenças e causar a morte. Por exemplo, o plutônio, considerado um dos mais tóxicos materiais radioativos, é um emissor de partículas α e pode ser manuseado com segurança com proteção mínima. Ele, porém, é facilmente oxidado a Pu^{4+} , que tem propriedades químicas semelhantes às do Fe^{3+} . Como resultado, o plutônio pode substituir o ferro no organismo e ser absorvido pelos ossos, dentro dos quais destrói a capacidade do organismo de produzir as células vermelhas do sangue. Os resultados são doenças da radiação, câncer e morte.

A radiação β vem em seguida em poder de penetração. Esses elétrons rápidos podem penetrar até 1 cm no corpo antes que as interações eletrostáticas com os elétrons e o núcleo das moléculas interrompam seu curso.

A radiação γ é a mais penetrante de todas. Os fótons de raios γ de alta energia podem atravessar edifícios e corpos, além de causar danos pela ionização das moléculas que estão em sua trajetória. As moléculas de proteínas e DNA danificadas dessa maneira perdem sua função, e o resultado inclui doenças da radiação e câncer. Fontes intensas de raios γ devem ser blindadas com tijolos de chumbo ou por uma camada espessa de concreto, para absorver essa radiação penetrante.

TAB. 2K.2 Proteção necessária contra radiação

Radiação	Penetração relativa	Proteção necessária
α	1	papel, pele
β	100	3 mm de alumínio
γ	10 000	concreto, chumbo

A dose absorvida de radiação é a energia depositada em uma amostra (em particular, o corpo humano) exposta à radiação. A unidade SI da dose absorvida é o gray, Gy, que corresponde a um depósito de energia igual a 1 J kg^{-1} . A energia de uma partícula de radiação nuclear é altamente localizada, como o impacto de uma

bala subatômica. Como resultado, as partículas incidentes podem quebrar ligações químicas quando colidem com moléculas em sua trajetória.

A extensão do dano causado pela radiação em tecidos vivos depende do tipo de radiação e do tipo de tecido. Portanto, a **eficiência biológica relativa**, Q , deve ser considerada quando avaliamos o dano causado por uma determinada dose de cada tipo de radiação. Para as radiações β e γ , Q vale arbitrariamente 1, mas para a radiação α , Q fica próximo de 20. A dose de 1 Gy de radiação γ causa aproximadamente o mesmo dano que 1 Gy de radiação β , mas 1 Gy de partículas α é cerca de 20 vezes mais destruidor (mesmo ela sendo a menos penetrante). Os números precisos dependem da dose total, da velocidade com que a dose se acumula e do tipo de tecido, mas esses valores são típicos.

A **dose equivalente** é a dose real modificada para levar em conta os diferentes poderes de dano dos vários tipos de radiação, em combinação com vários tipos de tecido. Ela é obtida pela multiplicação da dose real (em grays) pelo valor de Q do tipo de radiação. O resultado é expresso na unidade SI chamada sievert (Sv):

$$\text{Dose equivalente (Sv)} = Q \times \text{dose absorvida (Gy)}$$

Uma dose de 0,3 Gy de radiação γ corresponde à dose equivalente de 0,3 Sv, suficiente para causar a redução do número de células brancas do sangue (as células que combatem as infecções), mas 0,3 Gy de radiação α correspondem a 6 Sv, suficientes para matar se ingerida ou inalada. A média anual típica de dose equivalente que você recebe de fontes naturais, chamada de radiação de fundo, é cerca de 2 mSv a^{-1} , mas esse número varia, dependendo de seu estilo de vida e do lugar onde vive. Cerca de 20% da radiação de fundo provêm de seu próprio corpo. Cerca de 30% vêm dos raios cósmicos (uma mistura de raios γ e partículas subatômicas de alta energia provenientes do espaço) que continuamente bombardeiam a Terra e 40% vêm do radônio do solo. Os 10% remanescentes provêm principalmente de diagnósticos médicos (por exemplo, uma única fotografia de raios X de tórax fornece, em geral, uma dose equivalente a 0,07 mSv). As emissões provenientes de usinas nucleares e outras instalações nucleares contribuem com cerca de 0,1% nos países em que elas são muito utilizadas.

A exposição humana na presença de radiação é medida pela dose absorvida e pela dose equivalente. Esta última leva em conta os efeitos dos diferentes tipos de radiação sobre os tecidos.

2K.3 A radioatividade

A equação do decaimento de um núcleo tem exatamente a mesma forma da reação elementar unimolecular (Tópico 2I), com um núcleo instável tomando o lugar de uma molécula de reagente. Esse tipo de decaimento é o esperado para um processo que não depende de fatores externos, somente da instabilidade intrínseca do núcleo. A velocidade de decaimento nuclear depende somente da identidade do isótopo, não de sua forma química ou da temperatura.

2K.3a A medida da velocidade de decaimento nuclear

Os **contadores Geiger** usam a ionização de um gás, normalmente o argônio, quando exposto à radiação nuclear. Os **contadores de cintilação** medem a radiação contando a centelha gerada quando a radiação incide sobre uma substância específica, chamada de fosforescente. Ambos são usados para medir a velocidade com a qual um núcleo radioativo decai. Cada estalo de um contador Geiger, ou centelha do fósforo de um **contador de cintilação**, indica que uma desintegração nuclear foi detectada. A **atividade** de uma amostra, A , é o número de desintegrações nucleares que ocorrem em um

determinado intervalo de tempo dividido pela extensão do intervalo. A unidade SI de atividade é o **becquerel** (Bq): 1 Bq é igual a uma desintegração nuclear por segundo. Outra unidade de radioatividade de uso comum (não é SI) é o curie (Ci). Ela é igual a $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações nucleares por segundo, a radioatividade emitida por 1 g de rádio-226. Como o curie é uma unidade muito grande, as atividades são geralmente expressas em milicuries (mCi) ou microcuries (μCi).

Assim como uma reação química unimolecular, a lei da velocidade de decaimento nuclear é de primeira ordem (Tópico 2H). Isto é, a relação entre a velocidade de decaimento e o número N de núcleos radioativos presentes é dada pela **lei do decaimento radioativo**:

$$A = \text{velocidade de decaimento} = k \times N$$

Nesse contexto, k é chamado de **constante de decaimento**. A lei nos diz que a atividade de uma amostra radioativa é proporcional ao número de átomos da amostra. Uma lei de velocidade de primeira ordem implica um decaimento exponencial. Em consequência, o número, N , de núcleos restantes após um certo tempo, t , é dado por

$$N = N_0 e^{-kt}$$

em que N_0 é o número de núcleos radioativos inicialmente presentes (em $t = 0$). A Figura 1 mostra um gráfico dessa expressão.

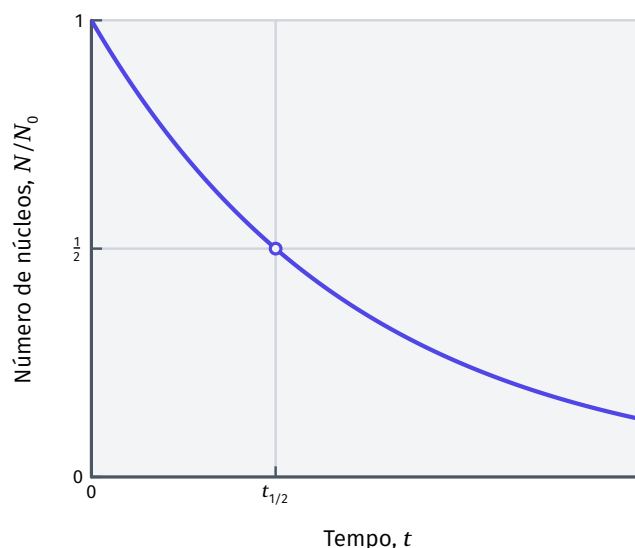


FIG. 2K.11 O decaimento exponencial do número de núcleos radioativos que existem em uma amostra implica que a atividade dessa amostra também decai exponencialmente com o tempo. A curva é caracterizada pela meia-vida.

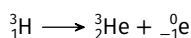
O decaimento radioativo é normalmente discutido em termos de **meia-vida**, $t_{1/2}$, isto é, o tempo necessário para que se desintegre a metade do número inicial dos núcleos. A meia-vida pode ser relacionada a k fazendo $N = \frac{1}{2}N_0$ e $t = t_{1/2}$ na expressão do decaimento exponencial:

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

Essa equação mostra que quanto maior for o valor de k , mais curta será a meia-vida do nuclídeo. Os nuclídeos com tempos de meia-vida curtos são menos estáveis do que os nuclídeos com tempos de meia-vida longos. Eles decaem mais em um dado período de tempo e são mais *quentes* (mais intensamente radioativos) do que os nuclídeos com tempos de meia-vida longos.

EX. 2K.4 Uso da lei do decaimento radioativo

Uma das razões pelas quais as armas termonucleares têm de sofrer manutenção regular é que o trítio nelas contido sofre decaimento nuclear.



A constante de decaimento do trítio é $0,056 \text{ a}^{-1}$.

Calcule a massa que permanecerá de uma amostra de trítio de massa inicial 1 g após 5 anos.

Etapa 1. Calcule a massa remanescente.

$$\text{De } m = m_0 e^{-kt}:$$

$$m = 1 \text{ g} \times e^{-0,056 \text{ a}^{-1} \times 5 \text{ a}} = 0,76 \text{ g}$$

As meias-vidas de nuclídeos radioativos variam em um intervalo muito amplo (Tabela 1).

TAB. 2K.3 Meias-vidas de nuclídeos comuns.

Nuclídeo	Meia-vida, $t_{1/2}$	Nuclídeo	Meia-vida, $t_{1/2}$
trítio	12,30 a	césio-137	30,17 a
carbono-14	$5,73 \times 10^3$ a	rádio-226	$1,6 \times 10^3$ a
potássio-40	$1,26 \times 10^9$ a	urânio-235	$0,71 \times 10^9$ a
iodo-131	8,05 d	urânio-238	$4,50 \times 10^9$ a

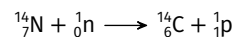
Considere o estrôncio-90, cuja meia-vida é 28,1 a. Esse nuclídeo ocorre na **precipitação radioativa**, a poeira fina que se deposita das nuvens após a explosão de uma bomba nuclear, e pode ocorrer também na liberação acidental de materiais radioativos no ar. Como ele é quimicamente muito semelhante ao cálcio, o estrôncio acompanha esse elemento no ambiente e se incorpora aos ossos de animais. Uma vez lá, ele continua a emitir radiação por muitos anos. Aproximadamente dez meias-vidas (para o estrôncio-90, 281 a) devem se passar antes que a atividade de uma amostra caia até 1/1000 de seu valor inicial. O iodo-131 é um radioisótopo que foi liberado no incêndio acidental da usina nuclear de Chernobyl, em 1986, e na explosão do reator de Fukushima, no Japão, logo após o tsunami que atingiu o país em 2011. Sua meia-vida é de apenas 8,05 d, mas ele se acumula na glândula tireoide. Comprimidos de iodo foram distribuídos aos moradores das regiões afetadas pelos desastres para que suas glândulas tireoides se saturassem com o elemento, reduzindo portanto a quantidade de iodo radioativo absorvida. Apesar dessas precauções, diversos casos de câncer da tireoide foram ligados à exposição ao iodo-131 proveniente do acidente nuclear. O plutônio-239 tem meia-vida igual a 24 ka. Isso significa que são necessárias instalações próprias para o armazenamento dos resíduos de plutônio por longos períodos e que a terra contaminada com plutônio não poderá ser habitada novamente por milhares de anos sem enormes gastos com reparação.

A lei de decaimento radioativo mostra que o número de núcleos radioativos decai exponencialmente com o tempo, com meia-vida característica.

2K.3b A datação

A meia-vida de um nuclídeo é usada, na prática, na determinação da idade de artefatos arqueológicos. Na datação isotópica, mede-se a atividade dos isótopos radioativos que eles contêm. Os isótopos radioativos usados para a datação incluem o urânio-238, o potássio-40 e o trítio (${}^3\text{H}$). Entretanto, o exemplo mais importante é a datação por carbono radioativo, que utiliza o decaimento β do carbono-14, cuja meia-vida é 5730 a.

O carbono-12 é o principal isótopo do carbono, mas existe uma proporção pequena de carbono-14 em todos os seres vivos. Seus núcleos são produzidos quando os núcleos de nitrogênio da atmosfera são bombardeados pelos nêutrons formados nas colisões de raios cósmicos com outros núcleos:



Os átomos de carbono-14 são produzidos na atmosfera em velocidade aproximadamente constante, e a proporção entre o carbono-14 e o carbono-12 na atmosfera é aproximadamente constante com o tempo. Os átomos de carbono-14 são incorporados aos organismos vivos como ${}^{14}\text{CO}_2$ por meio da fotossíntese e da digestão. Eles deixam os organismos vivos pelos processos normais de excreção e respiração e também por decaimento a uma velocidade determinada. Como resultado, todos os organismos vivos têm uma razão fixa (de cerca de 1 ppt) entre os átomos de carbono-14 e os átomos de carbono-12, e 1 g de carbono natural tem a atividade de 15 desintegrações por minuto.

Quando o organismo morre, não ocorre mais troca do carbono com a vizinhança. Entretanto, os núcleos de carbono-14 que estão no organismo morto continuam a desintegrar-se com uma meia-vida constante; logo, a relação entre carbono-14 e carbono-12 decresce. A razão observada em uma amostra de tecido morto pode, portanto, ser usada para estimar o tempo decorrido desde a morte.

Na técnica desenvolvida por Willard Libby, em Chicago, no final dos anos 40, a proporção de carbono-14 é determinada pelo monitoramento da radiação β proveniente do CO_2 obtido pela combustão da amostra. Na versão moderna da técnica, que só requer alguns poucos miligramas de amostra, os átomos de carbono são convertidos em íons C^- pelo bombardeamento da amostra com átomos de césio. Os íons C^- são acelerados por campos elétricos e os isótopos do carbono são separados e contados em um espectrômetro de massas.

EX. 2K.5 Interpretação da datação com carbono-14

Uma amostra de carbono de massa 1 g da madeira produziu $7,9 \times 10^3$ desintegrações do carbono-14 em um período de 20 h. No mesmo período, 1 g de carbono de uma fonte recente que você está usando produziu $1,84 \times 10^4$ desintegrações.

A meia-vida do ${}^{14}\text{C}$ é 5,73 ka.

Calcule a idade da amostra arqueológica.

Etapa 1. Calcule a constante de decaimento.

$$\text{De } t_{1/2} = \ln 2/k:$$

$$k = \frac{\ln 2}{5730 \text{ a}} = 1,2 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$$

Etapa 2. Calcule o tempo decorrido.

$$\text{De } A = A_0 e^{-kt}:$$

$$t = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{A_0}{A} \right)$$

Substituindo os dados,

$$t = \frac{1}{1,2 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}} \times \ln \left(\frac{18400}{7900} \right) = 7000 \text{ a}$$

Os isótopos também são usados na determinação das características do ambiente. Assim como o carbono-14 é utilizado para datar materiais orgânicos, os geólogos podem determinar a idade de rochas muito antigas usando materiais com meias-vidas mais longas. O urânio-238 ($t_{1/2} = 4,5 \text{ Ga}$, $1 \text{ Ga} = 1 \times 10^9 \text{ a}$) e o potássio-40 ($t_{1/2} = 1,26 \text{ Ga}$) são usados para datar rochas. O potássio-40 se desintegra por captura de um elétron para formar argônio-40. A rocha é colocada sob vácuo e esmagada, e um espectrômetro de massas mede a quantidade de gás argônio liberada. Essa técnica foi usada para determinar a idade de rochas da superfície da lua: elas tinham entre 3,5 e 4,0 bilhões de anos, mais ou menos a mesma idade das rochas da Terra.

EX. 2K.6 Interpretação da datação com urânio-238

Uma rocha contém 0,7 g de chumbo-206 para cada grama de urânio-238. A massa de chumbo-206 no instante de formação da rocha é desprezível.

A meia-vida do ^{238}U é 4,5 Ga.

Calcule a idade da rocha.

Etapa 1. Calcule a massa de urânio que produziu 0,7 g de chumbo.

$$\Delta m = 238 \text{ g mol}^{-1} \times \frac{0,7 \text{ g}}{206 \text{ g mol}^{-1}} = 0,8 \text{ g}$$

Etapa 2. Calcule a massa inicial de urânio.

$$m_0 = 1 \text{ g} + 0,8 \text{ g} = 1,8 \text{ g}$$

Etapa 3. Calcule a constante de decaimento.

De $t_{1/2} = \ln 2/k$:

$$k = \frac{\ln 2}{4,5 \text{ Ga}} = 1,5 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$$

Etapa 4. Calcule a idade da rocha.

De $m = m_0 e^{-kt}$:

$$t = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{m_0}{m} \right)$$

Substituindo:

$$t = \frac{1}{1,5 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}} \ln \left(\frac{1,8 \text{ g}}{1 \text{ g}} \right) = 4 \text{ Ga}$$

Isótopos radioativos são usados para determinar as idades de objetos.

2K.3c A determinação de volumes

EX. 2K.7 Cálculo do volume

O volume de plasma sanguíneo de um paciente foi medido por injeção de 5,0 mL de uma solução em água de albumina do soro sanguíneo humano marcada com ^{125}I ($t_{1/2} = 59,4 \text{ d}$). A atividade da amostra era 5 Ci. Após 20 min, sangue do paciente foi retirado e centrifugado para obter o plasma. A atividade de 10 mL de plasma foi 10 nCi.

Calcule o volume do plasma do sangue do paciente.

Etapa 1. Verifique que o decaimento é desprezível.

Em 20 min, muito menores do que a meia-vida de 59,4 d, o fator de decaimento é praticamente unitário ($kt \approx 1,6 \times 10^{-6}$). Logo, a atividade injetada se conserva durante a coleta e apenas se dilui no plasma.

Etapa 2. Calcule a atividade específica do plasma.

$$a = \frac{10 \text{ nCi}}{10 \text{ mL}} = 1 \text{ nCi mL}^{-1}$$

Etapa 3. Calcule o volume de plasma.

A atividade total injetada, $A_0 = 5 \text{ Ci} = 5000 \text{ nCi}$, distribui-se nesse volume com a atividade específica do plasma:

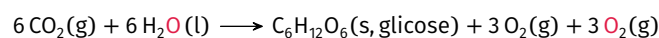
$$V = \frac{A_0}{a} = \frac{5000 \text{ nCi}}{1 \text{ nCi mL}^{-1}} = 5000 \text{ mL} = 5 \text{ L}$$

Isótopos radioativos são usados para determinar volumes com precisão.

2K.3d Os usos dos radioisótopos

Os radioisótopos são isótopos radioativos. Eles são usados na cura de doenças e, também, na preservação de alimentos, no acompanhamento dos mecanismos das reações e como combustível de naves espaciais.

Os traçadores radioativos são isótopos usados para acompanhar mudanças e determinar posições. Por exemplo, uma amostra de açúcar pode ser marcada com carbono-14, isto é, alguns dos átomos de carbono-12 das moléculas do açúcar são substituídos por átomos de carbono-14, que podem ser detectados por contadores de radiação. Dessa forma, as alterações que um número muito pequeno de moléculas do açúcar, que não podem ser detectadas por outros meios, sofrem no organismo podem ser monitoradas. Os químicos e bioquímicos usam traçadores para estudar o mecanismo das reações. Por exemplo, se água contendo oxigênio-18 é usada na fotossíntese, o oxigênio produzido contém oxigênio-18 (vermelho):



Esse resultado mostra que o oxigênio produzido na fotossíntese vem das moléculas de água, e não das moléculas de dióxido de carbono.

Os radioisótopos têm aplicações comerciais importantes. Por exemplo, o amerício-241 é usado em detectores de fumaça. Seu papel é ionizar todas as partículas da fumaça, o que permite a passagem de corrente que aciona o alarme. A exposição à radiação é

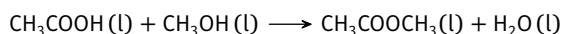
usada também na esterilização de alimentos e na inibição da germinação de batatas. Os isótopos radioativos que liberam muita energia na forma de calor são usados para fornecer energia em regiões de difícil acesso, onde o abastecimento com geradores não seria possível. Naves espaciais não tripuladas, como a *Voyager 2*, que já saiu do sistema solar, são abastecidas por isótopos com meias-vidas longas como o plutônio.

PONTO PARA PENSAR

Qual o tempo de meia-vida ideal para o abastecimento de uma nave espacial?

EX. 2K.8 Investigação de mecanismo usando isótopos

Para estudar o mecanismo da reação de síntese de um éster orgânico, o acetato de metila:



Precisa-se saber se o átomo de O presente no acetato de metila produzido vem do ácido acético inicial ou do metanol adicionado.

Proponha um experimento que use isótopos e permita determinar a origem do átomo de oxigênio.

Etapa 1. Escolha a molécula para ser marcada com o radioisótopo.

Quando a reação é conduzida com metanol marcado com oxigênio-18:



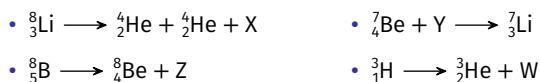
Verifica-se que o átomo de O presente no acetato de metila vem do metanol.

Os radioisótopos são usados como fontes de energia de longa duração e desempenham importante papel no estudo do meio ambiente e do monitoramento de movimentos. Eles são usados na biologia como traçadores em caminhos do metabolismo, na química para acompanhar mecanismos de reação e na geologia para determinar a idade das rochas.

Nível 1

2K.01

Considere as reações nucleares a seguir.



Assinale a alternativa com a identidade das partículas X, Y, Z e W, respectivamente.

- A** Póstron, alfa, elétron e elétron.
- B** Elétron, alfa, elétron e póstron.
- C** Alfa, elétron, elétron e póstron.
- D** Elétron, elétron, póstron e elétron.
- E** Elétron, elétron, póstron e nêutron.

2K.02

Considere as seguintes proposições.

- I. Reações nucleares ocorrem com absorção de energia.
- II. A perda de uma partícula beta de um átomo de $^{75}_{33}\text{As}$ forma um átomo de número atômico maior.
- III. A emissão de radiação gama a partir do núcleo de um átomo não altera o número atômico e o número de massa do átomo.
- IV. A desintegração de $^{226}_{88}\text{Ra}$ a $^{214}_{82}\text{Pb}$ ocorre com liberação de três partículas alfa e de duas partículas beta.

Assinale a alternativa que relaciona as proposições *corretas*.

- A** I e II, apenas. **B** I e III, apenas. **C** I e IV, apenas.
- D** II e III, apenas. **E** II e IV, apenas.

2K.03

Uma solução saturada em hidróxido de cálcio é preparada pela dissolução de excesso dessa substância em água a 25 °C. Considere as seguintes proposições, relativas ao que acontece nos primeiros instantes em que dióxido de carbono marcado com carbono-14 é borbulhado nessa mistura heterogênea.

- I. Radioatividade será detectada nas fases líquida e sólida.
- II. O pH da fase líquida diminui.
- III. A massa de hidróxido de cálcio sólido permanece constante.
- IV. O sólido em contato com o líquido será uma mistura de carbonato e hidróxido de bário.

Assinale a alternativa que relaciona as proposições *corretas*.

- A** I e III, apenas. **B** I e IV, apenas.
- C** I, II e III, apenas. **D** II, III e IV, apenas.
- E** I, II, III e IV.

2K.04

Assinale a alternativa *correta*.

- A** A emissão de uma partícula alfa resulta em um elemento situado em uma posição imediatamente à direita do elemento original, na tabela periódica.
- B** A radiação gama frequentemente acompanha uma emissão alfa ou beta.
- C** Raios gama são radiações eletromagnéticas, de comprimento de onda superior ao da luz visível, cuja emissão não resulta em mudanças do número atômico ou do número de massa do elemento.
- D** As reações de fusão nuclear ocorrem quando núcleos de átomos pesados, como urânio ou tório, são bombardeados com nêutrons, quebrando-se em átomos menores e liberando energia e radioatividade.
- E** O decaimento alfa se deve à alta instabilidade do núcleo de hélio, o que faz com que este se separe facilmente de núcleos maiores.

2K.05

Considere um metal alcalino terroso que se desintegra radioativamente emitindo uma partícula alfa.

Assinale a alternativa com o grupo da tabela periódica do elemento resultante de três desintegrações sucessivas.

- A** 13 **B** 14 **C** 15 **D** 16 **E** 17

2K.06

Assinale a alternativa que fundamenta, corretamente, a utilização do plutônio-238 para a geração de eletricidade em sondas espaciais.

- A** O plutônio-238 possui longo tempo de meia-vida e é emissor de partículas beta.
B O plutônio-238 possui longo tempo de meia-vida e é emissor de partículas gama.
C O plutônio-238 possui longo tempo de meia-vida e é emissor de partículas alfa.
D O plutônio-238 possui longo tempo de meia-vida e é emissor de partículas delta.
E O plutônio-238 possui tempo de meia-vida curto e é emissor de partículas alfa.

2K.07

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 rádio-226 podem sofrer decaimentos radioativos consecutivos até atingirem a massa de 206 (chumbo), adquirindo estabilidade.
 IV. Elementos radioativos com tempo de meia-vida curto podem ser utilizados para geração de eletricidade.

Assinale a alternativa que relaciona as proposições *corretas*.

- A** I, apenas. **B** II, apenas. **C** III, apenas.
D I e IV, apenas. **E** I e III, apenas.

2K.08

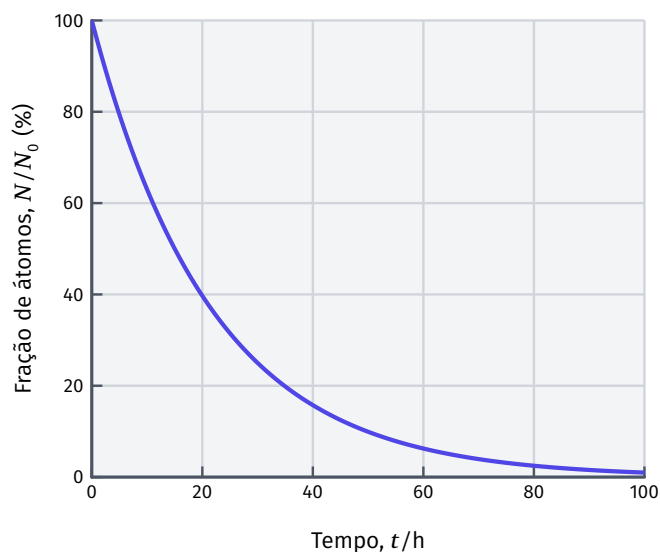
Um das fontes mais significativas de radiação natural é o radônio-222. O radônio-222 é continuamente gerado pelo decaimento do urânio-238 da crosta terrestre.

Assinale a alternativa que mais se aproxima do número de partículas β geradas quando 1 g de urânio-238 decai para radônio-222.

- A** $2,5 \times 10^{15}$ **B** $5,0 \times 10^{15}$ **C** $7,5 \times 10^{15}$
D $1,0 \times 10^{16}$ **E** $1,2 \times 10^{16}$

2K.09

Considere o gráfico a seguir, referente ao decaimento do sódio-24, que mostra a fração de átomos remanescente em função do tempo.



- a.** Determine a constante de decaimento para o sódio-24.
b. Determine a meia-vida do sódio-24.

2K.10

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. Sabe-se que uma amostra com 7,5 g desse isótopo radioativo produz 1×10^{23} emissões de radiação por minuto.

Determine o tempo para que essa amostra passe a produzir $2,5 \times 10^{22}$ emissões por minuto.

2K.11

Uma amostra de $0,1 \text{ cm}^3$ de uma solução contendo material radioativo, com atividade de $5 \times 10^3 \text{ min}^{-1} \text{ mL}^{-1}$, foi injetada em um rato. Alguns minutos depois, 1 cm^3 de sangue são coletados. A amostra de sangue coletada apresenta atividade de 48 min^{-1} .

Assinale a alternativa que mais se aproxima do volume de sangue do rato.

- A** 10 mL **B** 50 mL **C** 100 mL **D** 250 mL **E** 500 mL

2K.12

Uma amostra de 1,7 mL de água contendo trítio foi injetada em uma pessoa de 70 kg. A atividade total da amostra injetada foi de 86,5 mCi. Após alguns minutos, uma amostra de plasma sanguíneo foi coletada. A amostra, contendo 2 mL de água, apresentou atividade de 3,6 Ci.

Determine a fração mássica de água nessa pessoa.

2K.13

A água da superfície é constantemente bombardeada pelo trítio formado na atmosfera por ação dos raios cósmicos. Assim, qualquer amostra de água fresca apresenta atividade de $55 \text{ min}^{-1} \text{ L}^{-1}$. Uma amostra de vinho, com idade de 67 anos, foi analisada.

Determine a atividade esperada para a amostra de vinho.

Dados	${}^3\text{H}$
$t_{1/2}$ /anos	12,3

2K.14

Uma planta viva contém aproximadamente a mesma fração de carbono-14 que o dióxido de carbono na atmosfera, com atividade de $13,6 \text{ min}^{-1}$ por grama de carbono. Um fóssil possui idade estimada em 15 000 anos.

Determine a atividade esperada para o fóssil.

Dados	^{14}C
$t_{1/2}$ /anos	5730

2K.15

Uma planta viva contém aproximadamente a mesma fração de carbono-14 que o dióxido de carbono na atmosfera, com atividade de $13,6 \text{ min}^{-1}$ por grama de carbono. Uma árvore petrificada foi encontrada e verificou-se que essa apresenta atividade de $1,2 \text{ min}^{-1}$ por grama de carbono.

Determine a idade da árvore.

Dados	^{14}C
$t_{1/2}$ /anos	5730

2K.16

Uma rocha contém 0,688 g de chumbo-206 para cada grama de urânio-238. A massa de chumbo-206 no instante de formação da rocha é desprezível.

Assinale a alternativa que mais se aproxima da idade da rocha.

- A** 4×10^9 anos **B** 4×10^{10} anos **C** 4×10^{11} anos
D 4×10^{12} anos **E** 4×10^{13} anos

Dados	^{238}U
$t_{1/2}$ /anos	$4,50 \times 10^9$

2K.17

O rubídio-87 decai formando estrôncio-87. Uma rocha foi analisada e verificou-se que essa continha 109,7 g de rubídio-87 e 3,1 g de estrôncio-87. Considere que todo o estrôncio-87 é proveniente do decaimento do rubídio-87.

- a. Apresente** a equação de decaimento do rubídio-87.
b. Determine a idade da rocha.

Dados	^{87}Rb
$t_{1/2}$ /anos	$4,70 \times 10^{10}$

2K.18

O potássio-40 decai por dois processos: 89,3% sofre decaimento beta, e 10,7% decai por captura eletrônica. Uma amostra de determinada rocha apresenta razão mássica $m_{^{40}\text{Ar}}/m_{^{40}\text{K}} = 0,95$.

- a. Apresente** as equações de decaimento para o potássio-40.
b. Determine a idade da rocha.

Dados	^{40}K
$t_{1/2}$ /anos	$1,27 \times 10^9$

2K.19

A abundância isotópica dos isótopos urânio-238 e urânio-235 na Terra é de 99,28% e 0,72%, respectivamente. Considere que, no instante de formação da Terra, os isótopos urânio-235 e urânio-238 existiam em proporções iguais.

Determine a idade do planeta Terra.

Dados	^{235}U	^{238}U
$t_{1/2}$ /anos	$7,07 \times 10^8$	$4,50 \times 10^9$

2K.20

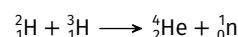
O deutério possui massa 2,014 102 u.

- a. Apresente** a reação de fusão nuclear do hidrogênio formando deutério.
b. Determine a energia liberada pela fusão de 1 g de hidrogênio formando deutério.

Dados	valor
m_{H}	1,007 825 u
m_{e}	0,000 549 u

2K.21

A reação de fusão nuclear mais facilmente iniciada conhecida é apresentada a seguir.



Os núclídeos ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_1\text{H}$ e ${}^4_2\text{He}$ possuem massa 2,014 102 u, 3,016 05 u e 4,002 60 u, respectivamente.

Assinale a alternativa que mais se aproxima da energia liberada na formação de um núcleo de hélio pela fusão entre um núcleo de deutério e um núcleo de trítio.

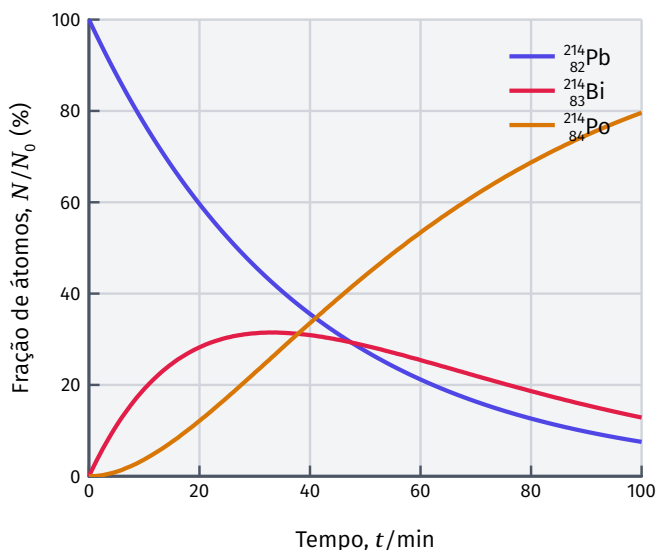
- A** 10 MeV **B** 20 MeV **C** 40 MeV **D** 60 MeV **E** 80 MeV

Dados	
m_{n}	$1,67 \times 10^{-27}$ kg

Nível 2

2K.22

Considere o gráfico a seguir, referente ao decaimento do chumbo-214, que mostra a fração de átomos de $^{214}_{82}\text{Pb}$, $^{214}_{83}\text{Bi}$ e $^{214}_{84}\text{Po}$ em função do tempo, na sequência de decaimentos $^{214}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{214}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{214}_{84}\text{Po}$.



São feitas as seguintes proposições.

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

Assinale a alternativa que relaciona as proposições *corretas*.

- A** I e II, apenas. **B** II e III, apenas. **C** III e IV, apenas.
D I e IV, apenas. **E** I, II e IV, apenas.

2K.23

Suponha que se deseja estimar o volume de água de um pequeno lago. Para isso, dilui-se nesse lago um volume V_S de uma solução de um sal, sendo que a atividade radioativa dessa solução é A_S . Após decorrido um tempo D , necessário para uma diluição homogênea da solução radioativa em todo o lago, é recolhida uma amostra de volume V_A , com atividade A_A acima da atividade original da água do lago. Sabe-se que a meia-vida do sal radioativo é $t_{1/2}$.

- a. **Determine** o volume do lago, considerando que $t_{1/2}$ e D são da mesma ordem de grandeza.
- b. **Determine** o volume do lago, considerando que $t_{1/2}$ é muito maior do que D .

2K.24

O trítio é produzido na atmosfera por ação de 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 a seguir correspondem às concentrações de trítio em águas pluviais de diferentes regiões do Brasil.

Estação pluviométrica	Desintegrações do trítio / $\text{min}^{-1} \text{ L}^{-1}$
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 por litro por minuto. Considere 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 desse vinho.

Dados	^3H
$t_{1/2}$ /anos	12,3

2K.25

O tetraetilchumbo era adicionado à gasolina na maioria dos países até cerca de 1980. Uma amostra de sedimento colhida em 1970 continha 0,119 mg de urânio-238 e 2,163 mg de chumbo-206.

- a. **Apresente** a equação de combustão do tetraetilchumbo, formando chumbo metálico.
- b. **Determine** a idade do sedimento.
- c. **Compare** a idade do sedimento com a idade do universo (13,7 bilhões de anos).

Dados	^{238}U
$t_{1/2}$ /anos	$4,50 \times 10^9$

2K.26

Para determinar a solubilidade do iodeto de mercúrio (I) em água, um químico preparou uma amostra contaminada com iodo-131. A atividade da amostra foi medida como $5 \times 10^{11} \text{ min}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ de iodo. A amostra foi adicionada em água destilada, sendo observada a formação de precipitado. Uma alíquota de 150 mL da solução foi retirada e sua atividade foi determinada como 33 min^{-1} .

Assinale a alternativa que mais se aproxima do produto de solubilidade do iodeto de mercúrio (I).

- A** 1×10^{-29} **B** 2×10^{-29} **C** 4×10^{-29}
D 2×10^{-10} **E** 4×10^{-10}

Nível 3

2K.27

O meteorito *Moama* foi encontrado na Austrália em 1940. Dois minerais extraídos do meteorito foram analisados por espectrometria de massa. Os resultados da análise são apresentados na tabela a seguir.

Mineral	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$
Plagioclase	0,511 00	0,100
Piroxena	0,514 20	0,200

a. Apresente a equação de decaimento do samário-147 para neodímio-143.

b. Determine a idade do meteorito.

Dados	^{147}Sm
$t_{1/2}$ /anos	$1,00 \times 10^{11}$

2K.28

Para determinar a área superficial específica do fluoreto de estrôncio, foi preparada uma suspensão aquosa de 80 cm^3 contendo $0,6 \text{ g}$ de SrF_2 sólido. A esta suspensão, foram adicionados 20 cm^3 de uma solução saturada em SrF_2 , marcada com o isótopo estrôncio-59, com atividade radioativa de 2100 Bq cm^{-3} . Após 21 dias, o equilíbrio é atingido e é retirada uma alíquota da solução resultante, que apresenta atividade radioativa de 300 Bq cm^{-3} . Considere que apenas os íons Sr^{2+} que estão na superfície do sólido participam da troca isotópica e que o SrF_2 tem estrutura cúbica, em que cada unidade SrF_2 ocupa um cubo cuja face é exposta na superfície.

Determine a área superficial específica do fluoreto de estrôncio utilizado no experimento.

Dados	SrF_2
$t_{1/2}$ (^{59}Sr)/dias	50,5
ρ /g cm^{-3}	4,24
K_{ps}	$2,50 \times 10^{-9}$

2K.29

Estime a temperatura necessária para que ocorra a fusão de dois núcleos de deutério formando uma partícula alfa.

Dados	valor
ρ_{nuclear}	$2,30 \times 10^{17} \text{ kg m}^{-3}$

Gabarito: Nível 1

2K.01 D 2K.02 D 2K.03 A 2K.04 B 2K.05 B 2K.06 C

2K.07 C 2K.08 B 2K.11 A 2K.16 A 2K.21 B

2K.09 a. $\lambda = 4,6 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$
b. $t_{1/2} = 15 \text{ h}$

2K.10 4,2 min

2K.12 $\approx 69 \%$

2K.13 $\approx 1,3 \text{ min}^{-1} \text{ L}^{-1}$

2K.14 $\approx 2,2 \text{ min}^{-1}$
por
grama
de
carbono

2K.15 $\approx 2 \times 10^4$ anos

2K.17 a. $^{87}_{37}\text{Rb} \rightarrow ^{87}_{38}\text{Sr} + ^{-1}_0\text{e}$
b. $\approx 1,9 \times 10^9$ anos

2K.18 a. $^{40}_{19}\text{K} \rightarrow ^{40}_{20}\text{Ca} + ^{-1}_0\text{e}$ e $^{40}_{19}\text{K} + ^{-1}_0\text{e} \rightarrow ^{40}_{18}\text{Ar}$
b. $\approx 4,2 \times 10^9$ anos

2K.19 $\approx 6 \times 10^9$ anos

2K.20 a. $^1_1\text{H} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^2_1\text{H} + ^0_{+1}\text{e}$
b. $\approx 2 \times 10^4 \text{ MJ g}^{-1}$

Gabarito: Nível 2

2K.22 A 2K.26 C

2K.23 a. $V_{\text{lago}} = \frac{V_A A_S}{A_A} 2^{-D/t_{1/2}}$
b. $V_{\text{lago}} = \frac{V_A A_S}{A_A}$

2K.24 São
Joaquim

2K.25 a. $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4 + 13 \text{ O}_2 \rightarrow \text{Pb} + 8 \text{ CO}_2 + 10 \text{ H}_2\text{O}$

b. $\approx 2 \times 10^{10}$ anos

c. O resultado é impossível; o chumbo-206 provém majoritariamente de outras fontes.

Gabarito: Nível 3

2K.27 a. $^{147}_{62}\text{Sm} \rightarrow ^{143}_{60}\text{Nd} + ^4_2\text{He}$
b. $\approx 4,5 \times 10^9$ anos

2K.28 $\approx 6 \times 10^3 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

2K.29 $\approx 5 \times 10^9 \text{ K}$