

Química Nuclear

CAPÍTULO

17

Quais são as ideias importantes? Mudanças no núcleo dos átomos podem levar à transformação dos átomos em outro elemento e resultar na liberação de energia.

Por que precisamos estudar este assunto? A química nuclear é fundamental para o desenvolvimento da energia nuclear. A química proporciona as técnicas de preparação e recirculação dos combustíveis nucleares, e de remoção de resíduos radioativos perigosos. A química nuclear é utilizada na Medicina para o tratamento de câncer e para a produção de imagens dos órgãos internos de corpos vivos. Ela é usada na Química para a investigação dos mecanismos das reações, e na Arqueologia para a datação de objetos antigos. A química nuclear é também usada nas estratégias militares de alguns países. Além disso, esse material traz subsídios para o complexo debate político, ambiental e econômico sobre o uso da energia nuclear.

O que devemos saber para entender o capítulo? Os processos nucleares podem ser entendidos em termos da estrutura atômica (Seção B e Capítulo 1) e das variações de energia (Capítulo 7). A seção sobre as velocidades de decaimento radioativo utiliza conceitos da cinética química (em particular as Seções 14.4 e 14.5).

Quando estudamos as reações químicas, consideramos o núcleo atômico como imutável. Os núcleos, porém, também podem se modificar, e a química nuclear explora as consequências químicas dessas alterações. Um tipo de modificação é a **fissão nuclear**, isto é, a fragmentação de núcleos maiores em núcleos menores. Embora a fissão seja uma fonte de energia, a consequente produção de resíduos radioativos é muito perigosa para a vida. Outro tipo de modificação é a **fusão nuclear**, a junção de núcleos menores para formar núcleos maiores. A fusão também é uma fonte de energia, mas a técnica é tecnologicamente complexa e, portanto, de desenvolvimento muito caro. Os processos nucleares são críticos para o futuro da humanidade, porque podem ser a resposta a um de nossos maiores desafios – o desenvolvimento de fontes adequadas de suprimento de energia. Os temas envolvidos e a contribuição da Química para sua solução são o objeto deste capítulo.

Este capítulo tem três temas principais. Primeiramente, veremos os padrões de estabilidade nuclear e como os núcleos instáveis mudam espontaneamente. As mudanças de composição dos núcleos são a fonte de todos os elementos, exceto o hidrogênio; logo, estaremos discutindo também a origem dos elementos. Em seguida, veremos as consequências das mudanças que ocorrem nos núcleos; em particular, os usos da radiação nuclear em Química. Por fim, veremos a energia nuclear e como a Química é utilizada para resolver problemas associados a seu uso.

DECAIMENTO NUCLEAR

Os núcleos atômicos são partículas extraordinárias. Elas contêm todos os prótons do átomo, comprimidos em um pequeno volume, apesar de suas cargas positivas (Fig. 17.1). Porém, a maior parte dos núcleos sobrevive indefinidamente apesar das imensas forças repulsivas que existem entre os prótons que eles contêm. Em alguns núcleos, entretanto, a repulsão que os prótons exercem uns sobre os outros supera a força que mantém os núcleos unidos. Ocorre, então, a ejeção de fragmentos dos núcleos, um processo chamado de “decaimento”.

FIGURA 17.1 A ilustração mostra um núcleo como uma coleção de prótons fortemente ligados (em rosa) e nêutrons (em cinza). O diâmetro de um núcleo é de cerca de 10 fm ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$).



DECAIMENTO NUCLEAR

- 17.1 Evidências do decaimento nuclear espontâneo
- 17.2 Reações nucleares
- 17.3 Padrões da estabilidade nuclear
- 17.4 Predição do tipo de decaimento nuclear
- 17.5 Nucleossíntese

RADIAÇÃO NUCLEAR

- 17.6 Efeitos biológicos da radiação
- 17.7 Medida da velocidade de decaimento nuclear
- 17.8 Usos dos radioisótopos

ENERGIA NUCLEAR

- 17.9 Conversão massa-energia
- 17.10 Fissão nuclear
- 17.11 Fusão nuclear
- 17.12 Química da energia nuclear

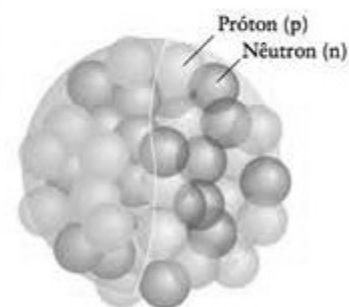


FIGURA 17.2 Henri Becquerel descobriu a radioatividade quando observou que uma placa fotográfica não exposta, guardada nas proximidades de uma amostra de óxido de urânio, tinha escurecido. Esta fotografia mostra uma das placas originais anotada com seu registro do fato.



FIGURA 17.3 Marie Sklodowska Curie (1867-1934).



17.1 Evidências do decaimento nuclear espontâneo

Em 1896, o cientista francês Henri Becquerel guardou uma amostra de óxido de urânio em uma gaveta que continha algumas placas fotográficas (Fig. 17.2). 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 (Fig. 17.3), 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 dos raios 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 (Fig. 17.4). Rutherford chamou esses três tipos de radiação de alfa (α), beta (β) e gama (γ).

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 ele chamou de **partículas α** . A partir da carga e da massa das partículas, ele pôde identificá-las como átomos de hélio que tinham perdido seus dois elétrons. Assim que ele identificou o núcleo atômico (em 1908, Seção B), Rutherford percebeu que a partícula α deveria ser o núcleo do hélio, He^{2+} . Uma partícula α é representada por ${}^4_2\alpha$, ou, simplesmente, α . Podemos imaginá-la como sendo formada por dois prótons e dois nêutrons fortemente ligados (Fig. 17.5).

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 por β^- . Como a partícula β não tem prótons ou nêutrons, seu número de massa é zero e ela pode ser escrita como ${}^0_{-1}e$.

Uma nota em boa prática: Um elétron emitido ou capturado por um núcleo não tem um número atômico; logo, sua carga (-1) é escrita como um subscrito precedendo o símbolo. Veremos, adiante, que isto é muito conveniente.

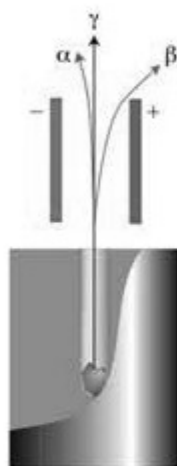


FIGURA 17.4 Efeitos de um campo elétrico sobre a radiação nuclear. A direção do desvio identifica os raios α como tendo carga positiva, os raios β como tendo carga negativa e os raios γ como não tendo carga.

FIGURA 17.5 Uma partícula α tem duas cargas positivas e número de massa igual a 4. Ela é formada por dois prótons e dois nêutrons, o mesmo que o núcleo de um átomo de hélio-4.



O terceiro tipo comum de radiação que Rutherford identificou, a radiação γ , não era afetada pelo campo elétrico. Como a luz, os raios γ são uma forma de radiação eletromagnética, mas de frequência muito mais alta – maior do que 10^{20} Hz, correspondendo a comprimentos de onda menores do que 1 pm. Eles podem ser considerados como um feixe de fótons de energia muito alta, com cada fóton sendo emitido por um núcleo que descarrega o excesso de energia. A frequência, ν , dos raios γ está relacionada com a energia descartada pelo núcleo, ΔE , e é dada pela relação $\nu = \Delta E/h$ (veja a Seção 1.4). A frequência é muito alta porque a diferença de energia entre os estados nucleares excitado e fundamental é muito grande. As radiações α e β são frequentemente acompanhadas pela radiação γ . O novo núcleo pode ser formado com seus núcleons em um arranjo de alta energia e um fóton de raios γ é emitido quando os núcleons decaem para um estado de energia mais baixa (Fig. 17.6).

Depois do trabalho de Rutherford, os cientistas identificaram outros tipos de radiação nuclear. Algumas são originadas por partículas que se movem rapidamente, como nêutrons ou prótons. Outras são antipartículas, partículas com massa igual à de uma partícula subatômica, mas com carga oposta. Por exemplo, o pósitron tem a mesma massa do elétron, mas tem carga positiva. Ele é representado por β^+ ou ${}^0_1\text{e}^+$. Quando uma antipartícula encontra a partícula correspondente, elas são aniquiladas e se convertem completamente em energia. A Tabela 17.1 resume as propriedades das partículas comumente encontradas na radiação nuclear.

Os tipos mais comuns de radiação emitidas 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).

17.2 Reações nucleares

As descobertas de Becquerel, Curie e Rutherford e o desenvolvimento posterior do modelo nuclear do átomo, feito por Rutherford (Seção B), mostraram que a radioatividade é produzida pelo decaimento nuclear, a decomposição parcial de um núcleo. A mudança de composição de um núcleo é chamada de reação nuclear. Como vimos na Seção B, os núcleos são formados por prótons e nêutrons que são coletivamente chamados de *núcleons*. Um núcleo específico com número atômico e número de massa determinados é chamado de *nuclídeo*. Assim, ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$ e ${}^{16}\text{O}$ são três nuclídeos diferentes. Os dois primeiros são isótopos de um mesmo elemento. Os núcleos que modificam suas estruturas espontaneamente e emitem radiação são chamados de *radioativos*. Frequentemente, o resultado é um nuclídeo diferente.

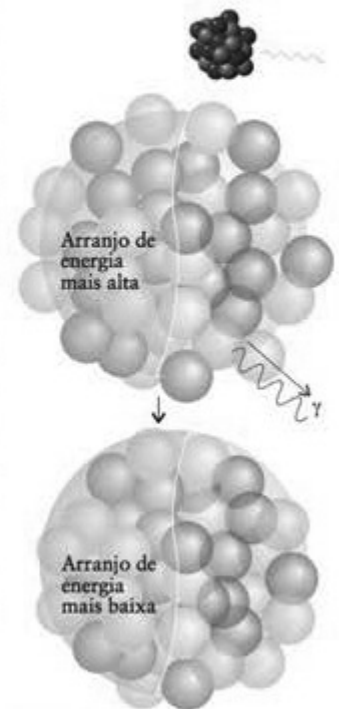


FIGURA 17.6 Depois que o núcleo decai, os núcleons que permanecem no núcleo podem estar em um estado de alta energia, como se pode ver no arranjo expandido da parte superior da ilustração. Quando os núcleons se ajustam em um arranjo de energia mais baixa (abaixo), o excesso de energia é liberado como um fóton de raios γ .

TABELA 17.1 Radiação nuclear

Tipo	Grau de penetração	Velocidade [†]	Partícula [†]	Número de massa	Carga	Exemplo
α	não penetrante, mas causa danos	10% de c	núcleo de hélio-4, ${}^4_2\text{He}^{2+}$, ${}^4_2\alpha$, α	4	+2	${}^{226}_{88}\text{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + \alpha$ (Fig. 17.7)
β	moderadamente penetrante	<90% de c	elétron, ${}^0_{-1}\text{e}$, β^- , β , e^-	0	-1	${}^3_1\text{H} \longrightarrow {}^3_2\text{He} + {}^0_{-1}\text{e}$ (Fig. 17.8)
captura de elétron [‡]	—	—	elétron, ${}^0_{-1}\text{e}$, e^-	0	-1	${}^{44}_{22}\text{Ti} + {}^0_{-1}\text{e} \longrightarrow {}^{44}_{21}\text{Sc}$ (Fig. 17.9)
γ	muito penetrante; frequentemente acompanha outra radiação	c	fóton, γ	0	0	${}^{60}_{27}\text{Co}^{*5} \longrightarrow {}^{60}_{27}\text{Co} + \gamma$ (Fig. 17.6)
β^+	moderadamente penetrante	<90% de c	pósitron, ${}^0_1\text{e}^+$, β^+	0	+1	${}^{22}_{11}\text{Na} \longrightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + {}^0_1\text{e}^+$ (Fig. 17.10)
p	penetração moderada ou baixa	10% de c	próton, ${}^1_1\text{H}^+$, ${}^1_1\text{p}$, p	1	+1	${}^{53}_{27}\text{Co} \longrightarrow {}^{52}_{26}\text{Fe} + {}^1_1\text{p}$
n	muito penetrante	<10% de c	nêutron, ${}^1_0\text{n}$, n	1	0	${}^{137}_{53}\text{I} \longrightarrow {}^{136}_{53}\text{I} + {}^1_0\text{n}$

[†] c é a velocidade da luz.

[‡]Vários símbolos alternativos são usados para as partículas. Frequentemente é suficiente usar o mais simples (o da direita).

[§]A captura de um elétron não envolve radiação nuclear e foi incluída para completar o conjunto.

[¶]Um estado energeticamente excitado de um núcleo é em geral representado com um asterisco (*).

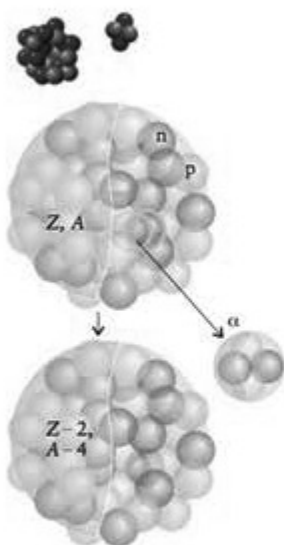


FIGURA 17.7 Quando um núcleo ejeta uma partícula α , o número atômico do átomo diminui 2 unidades e o número de massa diminui 4 unidades. Os núcleons ejetados do núcleo que está acima estão indicados pela linha dourada.

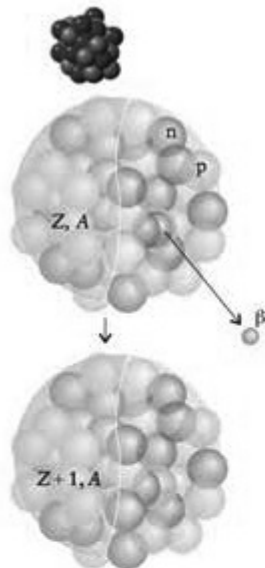
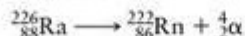


FIGURA 17.8 Quando um núcleo ejeta uma partícula β , o número atômico aumenta uma unidade e o número de massa permanece o mesmo. O nêutron que consideramos como a origem do elétron está indicado pela linha dourada no núcleo que está acima no diagrama.

As reações nucleares diferem das reações químicas em alguns aspectos importantes. Em primeiro lugar, isótopos diferentes de um mesmo elemento sofrem essencialmente as mesmas reações químicas, mas seus núcleos sofrem reações nucleares muito diferentes. Em segundo lugar, quando as partículas α ou β são emitidas pelo núcleo, forma-se um núcleo com número diferente de prótons. O produto, que é chamado de núcleo filho (Fig. 17.7), é, portanto, o núcleo de um átomo de um elemento diferente. Por exemplo, quando um núcleo de radônio-222 emite uma partícula α , forma-se um núcleo de polônio-218. Neste caso, ocorreu uma **transmutação nuclear**, isto é, a conversão de um elemento em outro. Outra diferença importante entre as reações nucleares e as reações químicas é que as variações de energia são muito maiores para as reações nucleares do que para as reações químicas. Por exemplo, a combustão de 1,0 g de metano produz cerca de 52 kJ de energia, na forma de calor. Em contrapartida, uma reação nuclear de 1,0 g de urânio-235 produz cerca de $8,2 \times 10^7$ kJ de energia, mais de um milhão de vezes superior.

Para prever a identidade de um núcleo filho, observamos como o número atômico e o número de massa se modificam quando o núcleo pai emite uma partícula. Por exemplo, quando um núcleo de rádio-226, com $Z = 88$, sofre um decaimento α , ele emite uma partícula α , que tem carga nuclear +2 e número de massa 4. Como o número de massa total e a carga total se conservam em uma reação nuclear, o fragmento remanescente deve ser um núcleo com número atômico 86 (radônio) e número de massa 222; logo, o núcleo filho é o radônio-222:



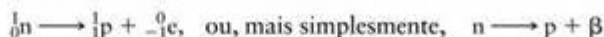
A expressão dessas mudanças é chamada de **equação nuclear**. Os exemplos seguintes mostram como usar as equações nucleares para identificar os núcleos filhos.

EXEMPLO 17.1

Predição do resultado dos decaimentos α e β

Que nuclídeo é produzido por (a) o decaimento α do polônio-211; (b) o decaimento β do sódio-24?

Antecipe (a) No decaimento α , dois prótons e dois nêutrons são perdidos. Como resultado deveríamos esperar que a massa diminua de 4 e o número atômico, de 2 (veja a Figura 17.7). (b) A perda de uma carga negativa quando um elétron é ejetado do núcleo (Fig. 17.8) pode ser interpretada como a conversão de um nêutron em um próton no núcleo:

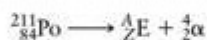


Deveríamos esperar que o número atômico do núcleo filho fosse 1 unidade maior do que o do núcleo pai, porque ele tem um próton a mais, e o número de massa ficasse o mesmo, porque o número total de núcleons no núcleo deve ser o mesmo.

PLANEJE Escreva a equação nuclear para cada reação, representando o nuclídeo filho pela letra E, com número atômico Z e número de massa A . Encontre então os valores de A e Z sabendo que o número de massa e o número atômico se conservam em uma reação nuclear.

RESOLVA

(a) Escreva a equação nuclear da reação.



Expresse a conservação da massa e da carga.

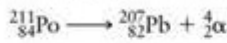
$$211 = A + 4, \text{ ou } A = 207$$

$$84 = Z + 2, Z = 82$$

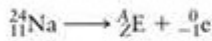
Identifique o elemento.

$$Z = 82 \text{ corresponde ao Pb.}$$

Escreva a equação nuclear.



(b) Escreva a equação da reação nuclear.



Expresse a conservação da massa e da carga.

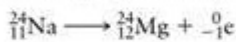
$$24 = A + 0, \text{ ou } A = 24, \text{ não se alterou}$$

$$11 = Z - 1, Z = 12$$

Identifique o elemento.

(Z = 12) corresponde ao Mg

Escreva a equação da reação nuclear.



49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po
113	114	115	116

3 Li	4 Be		
11 Na	12 Mg		
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti

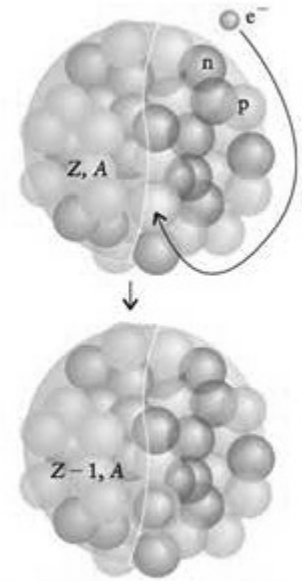


FIGURA 17.9 Na captura de um elétron, um núcleo captura um elétron da vizinhança. O efeito é a conversão de um próton (marcado em dourado) em um nêutron (marcado em dourado). Como resultado, o número atômico diminui uma unidade mas o número de massa permanece o mesmo.

Avalie Como esperado, o decaimento α levou a um nuclídeo com dois prótons e dois elétrons a menos; o decaimento β produziu um nuclídeo em que um próton se converteu em um nêutron, portanto, não ocorreu perda de massa.

Teste 17.1A Identifique o nuclídeo produzido por (a) o decaimento α do urânio-235; (b) o decaimento β do lítio-9.

[Resposta: (a) Tório-231; berílio-9]

Teste 17.1B Identifique o nuclídeo produzido por (a) o decaimento α do tório-232; (b) o decaimento β do rádio-228.

EXEMPLO 17.2

Predição do resultado da captura de um elétron e emissão de pósitrons

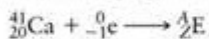
Que nuclídeo se produz quando (a) cálcio-41 captura um elétron; (b) oxigênio-15 emite um pósitron?

Antecipe (a) Na captura de um elétron, um próton se transforma em um nêutron e, apesar de não haver mudança de número de massa, o número atômico se reduz de uma unidade (Fig. 17.9). (b) Um pósitron tem massa pequena, igual à do elétron, porém tem carga positiva. A emissão de pósitron pode ser considerada como a carga positiva liberada quando um próton se converte em um nêutron. Como resultado, o número atômico decresce de uma unidade, mas não há mudança do número de massa (Fig. 17.10).

PLANEJE Escreva a equação nuclear para cada reação, representando o nuclídeo filho pela letra E, com número atômico Z e número de massa A. Encontre então os valores de A e Z sabendo que o número de massa e o número atômico se conservam em uma reação nuclear.

RESOLVA

(a) Escreva a equação da reação nuclear.



Expresse a conservação de massa e carga.

$$41 + 0 = A, \text{ ou } A = 41, \text{ não se alterou}$$

$$20 - 1 = Z, Z = 19$$

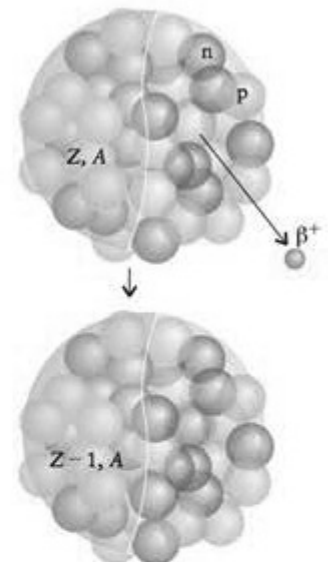


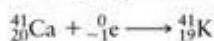
FIGURA 17.10 Na emissão de pósitrons (β^+), o núcleo ejeta um pósitron. O efeito é a conversão de um próton em um nêutron. Como resultado, o número atômico diminui uma unidade, mas o número de massa permanece o mesmo.

Continua →

Identifique o elemento.

$Z = 19$ corresponde a K.

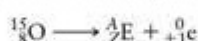
Escreva a equação nuclear.



3 Li	4 Be		
11 Na	12 Mg		
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti

e^-

(b) Escreva a equação da reação nuclear.



Expresse a conservação de massa e carga.

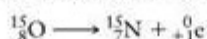
$$15 = A + 0, \text{ ou } A = 15, \text{ não se alterou}$$

$$8 = Z + 1, Z = 7$$

Identifique o elemento.

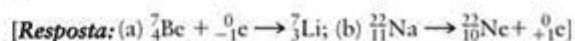
$Z = 7$ corresponde a N.

Escreva a equação nuclear.



Avalie Como esperado, na captura de um elétron e na emissão de um pósitron um próton converte-se em um nêutron, logo ocorre uma diminuição do número atômico sem alteração da massa.

Teste 17.2A Identifique o nuclídeo produzido e escreva a equação nuclear de (a) a captura de um elétron pelo berílio-7 e (b) a emissão de pósitron pelo sódio-22.



Teste 17.2B Identifique o nuclídeo produzido e escreva a equação nuclear de (a) a captura de um elétron pelo ferro-55 e (b) a emissão de pósitron pelo carbono-11.

			2 He
7 N	8 O	9 F	10 Ne
15 P	16 S	17 Cl	18 Ar

e^+

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

17.3 Padrões da estabilidade nuclear

Os núcleos de alguns elementos são estáveis, mas outros decaem assim que formados. Seria útil saber se a estabilidade e a instabilidade seguem algum padrão, porque sua existência permitiria a predição dos caminhos de decaimento nuclear. Uma pista é que os elementos de número atômico par são sempre mais abundantes do que os elementos vizinhos de números atômicos ímpares. Podemos constatar essa diferença na Figura 17.11, que mostra um gráfico da abundância cósmica dos elementos contra o número atômico. A mesma variação ocorre na Terra. Dos oito elementos existentes com 1%, ou mais, da massa da Terra, somente um, o alumínio, tem número atômico ímpar.

Os núcleos de número par de prótons e de nêutrons são mais estáveis do que os que têm alguma outra combinação. Inversamente, os núcleos de número ímpar de prótons e nêutrons são os menos estáveis (Fig. 17.12). Os núcleos têm maior probabilidade de serem estáveis quando eles são formados por certos números de qualquer tipo de núcleons. Estes números, 2, 8, 20, 50, 82, 114, 126 e 184, são chamados de números mágicos. Por exemplo,

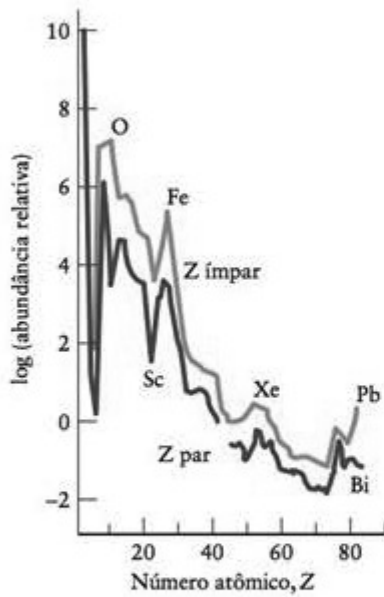


FIGURA 17.11 Variação da abundância nuclear cósmica com o número atômico. Observe que os elementos de número atômico par (curva marrom) são mais abundantes do que elementos vizinhos com número atômico ímpar (curva azul).

existem 10 isótopos estáveis de estanho ($Z = 50$), o máximo que um elemento atinge; porém, seu vizinho, o antimônio ($Z = 51$), tem somente dois isótopos estáveis. A partícula α é um núcleo “duplamente mágico”, com dois prótons e dois nêutrons. Veremos adiante que muitos actinoides decaem através de uma série de etapas até alcançar o Pb, outro nuclídeo duplamente mágico, com 126 nêutrons e 82 prótons. Esse padrão de estabilidade nuclear é semelhante ao padrão da estabilidade dos elétrons dos átomos: os átomos dos gases nobres têm 2, 10, 18, 36, 54 e 86 elétrons.

A Figura 17.13 mostra um gráfico do número de massa contra o número atômico dos nuclídeos conhecidos. Os núcleos estáveis são encontrados em uma **banda de estabilidade** cercados por um **mar de instabilidade**, a região de nuclídeos instáveis que decaem com emissão de radiação. Para números atômicos até cerca de 20, os nuclídeos estáveis têm número de prótons e de nêutrons aproximadamente igual; logo, A está próximo de $2Z$. No caso de números atômicos maiores, todos os nuclídeos conhecidos – estáveis e instáveis – têm mais nêutrons do que prótons; logo $A > 2Z$.

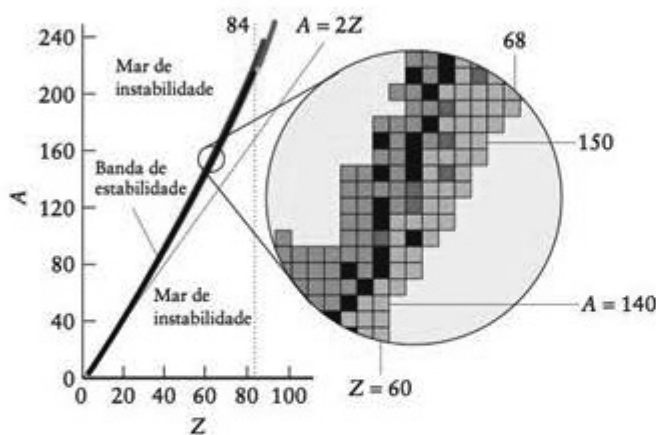


FIGURA 17.13 Dependência da estabilidade nuclear do número atômico e do número de massa. Os nuclídeos ao longo da faixa preta (banda de estabilidade) são, em geral, estáveis. Os nuclídeos situados na região azul provavelmente emitirão uma partícula β , e os situados na região vermelha provavelmente emitirão uma partícula α . Os núcleos situados na região rosa provavelmente emitirão pósitrons ou capturarão um elétron. A linha reta indica a posição que os nuclídeos ocupariam se o número de nêutrons fosse igual ao número de prótons ($A = 2Z$). O destaque mostra uma vista ampliada do diagrama na região $Z = 60$.

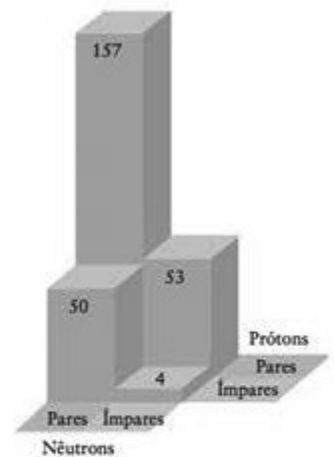


FIGURA 17.12 Número de nuclídeos estáveis com número de prótons e nêutrons pares ou ímpares. Com exceção do hidrogênio, de longe, a maior parte dos nuclídeos estáveis (157) têm números pares de prótons e nêutrons. Somente quatro nuclídeos estáveis têm números ímpares de prótons e nêutrons.

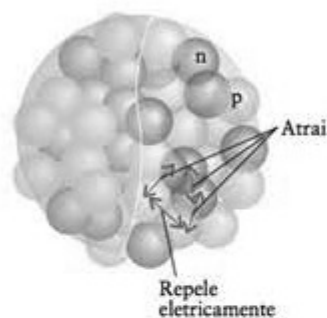


FIGURA 17.14 Os prótons de um núcleo se repelem eletricamente, mas a força intensa que age entre todos os núcleons os mantém juntos.

Pensava-se que o bismuto ($Z = 83$) tinha um isótopo estável mas, em 2005, descobriu-se que ele decai com uma velocidade extremamente baixa.

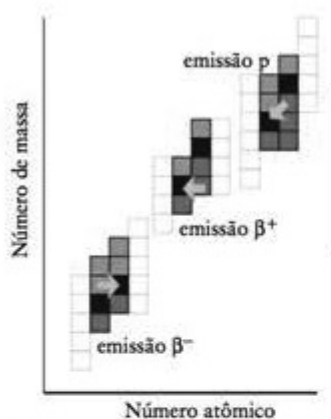


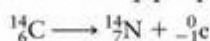
FIGURA 17.15 Três maneiras diferentes de atingir a banda de estabilidade (em preto). Os núcleos ricos em nêutrons (região azul) tendem a converter nêutrons em prótons por emissão β^- . Os núcleos ricos em prótons (em vermelho) tendem a atingir a estabilidade (preto) por emissão de pósitron, captura de um elétron ou emissão de um próton.

O aumento da razão de nêutrons para prótons, com o aumento do número atômico, pode ser explicado considerando-se o papel dos nêutrons em ajudar a superar a repulsão entre os prótons. A força intensa que mantém os prótons e nêutrons juntos em um núcleo é poderosa o suficiente para superar a repulsão entre os prótons, mas ela só pode agir em distâncias muito pequenas – aproximadamente o diâmetro de um núcleo (Fig. 17.14). Como os nêutrons não têm carga, eles podem contribuir para a força intensa, mas não aumentam a repulsão eletrostática. Muitos nêutrons são necessários para superar a repulsão mútua dos prótons em um núcleo de número atômico elevado. Essa é a razão da faixa de estabilidade ser uma curva ascendente.

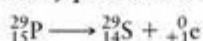
Os núcleos que têm números pares de prótons e de nêutrons são os mais estáveis.

17.4 Predição do tipo de decaimento nuclear

Podemos utilizar a Figura 17.13 para prever o mais provável tipo de desintegração de um nuclídeo. Os núcleos que estão acima da faixa de estabilidade são ricos em nêutrons, isto é, têm uma alta proporção de nêutrons. Esses núcleos tendem a decair para que a razão n/p final fique mais próxima da encontrada na banda de estabilidade. Por exemplo, um núcleo $^{14}_6\text{C}$ pode alcançar um estado de maior estabilidade por emissão de uma partícula β^- , que reduz a razão n/p porque um nêutron se converte em um próton (Fig. 17.15):



Os nuclídeos que estão abaixo da banda de estabilidade têm baixa proporção de nêutrons e são classificados como ricos em prótons. Esses isótopos tendem a decair de maneira a reduzir o número atômico. Por exemplo, o $^{29}_{15}\text{P}$, rico em prótons, decai por emissão de um pósitron, que converte um próton em um nêutron e aumenta a razão n/p final:



Como mostrado no Exemplo 17.2, a captura de um elétron e a emissão de prótons também diminuem o número de prótons de nuclídeos ricos em prótons.

Poucos nuclídeos com $Z < 60$ emitem partículas α . Todos os núcleos com $Z > 82$ são instáveis e decaem principalmente por emissão de partículas α . Eles devem eliminar prótons para reduzir o número atômico e, geralmente, também perdem nêutrons. Esses núcleos decaem em uma série de etapas e dão origem a uma série radioativa, isto é, uma sequência característica de nuclídeos (Fig. 17.16). Primeiro, uma partícula α é ejetada, depois outra partícula α , ou uma partícula β^- , até que se forme um núcleo estável. O nuclídeo final é normalmente um isótopo do chumbo (o elemento com o número atômico mágico 82). Por exemplo, a série do urânio-238 termina no chumbo-206; a série do urânio-235, no chumbo-207; e a série do tório-232 no chumbo-208.

Teste 17.3A Quais dentre os seguintes processos, (a) captura de um elétron, (b) emissão de próton, (c) emissão β^- , (d) emissão β^+ , deve um núcleo de $^{145}_{64}\text{Gd}$ sofrer para chegar à estabilidade? Utilize as Figs. 17.13 e 17.15.

[Resposta: a, b, d]

Teste 17.3B Quais dentre o conjunto de processos listados no Teste 17.3A deve um núcleo de $^{148}_{38}\text{Ce}$ sofrer para atingir a estabilidade?

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 nuclídeos pesados emitem partículas α .

17.5 Nucleossíntese

Para estudar alguns processos nucleares, os cientistas podem ter de criar certos nuclídeos que não existem na natureza. Por exemplo, o $^{11}_3\text{Li}$ é um nuclídeo instável que tem tantos nêutrons que a força intensa permite que seu núcleo se expanda cerca de 10 vezes, até o tamanho de um núcleo de rádio. Esse tipo de núcleo pode dar informações valiosas aos teóricos, mas tem de ser sintetizado porque não é natural. A nucleossíntese é o processo de formação de elementos. O hidrogênio e o hélio foram produzidos no “Big Bang”. Todos os demais elementos descendem desses dois, seja como resultado de reações nucleares nas estrelas ou no espaço. Alguns elemen-

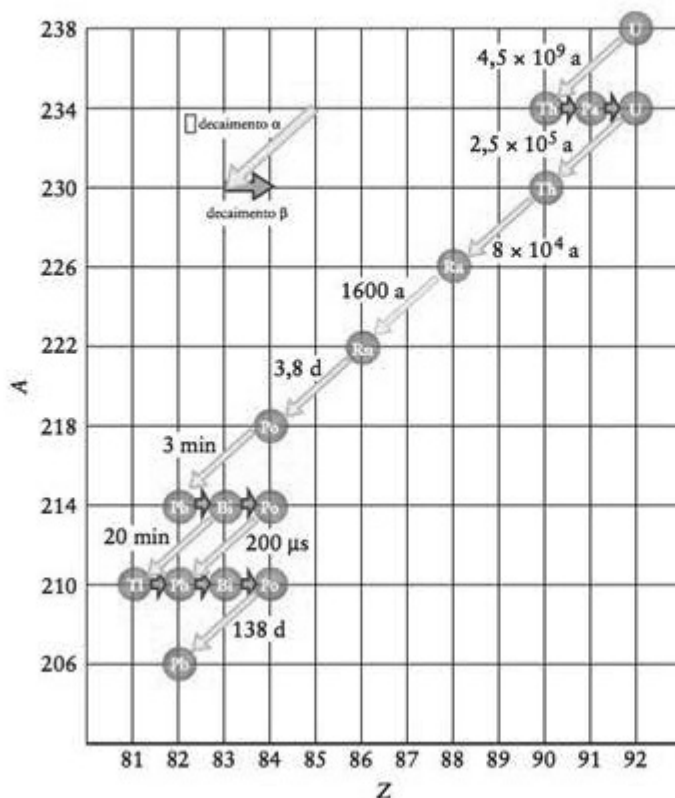


FIGURA 17.16 Série de decaimento do urânio-238. Os tempos são as meias-vidas dos núclídeos (veja a Seção 17.7). A unidade a é a abreviação SI para ano.

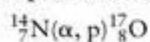
tos só existem em traços na Terra. Embora esses elementos tenham sido fabricados nas estrelas, seu tempo de vida muito curto impediu que eles sobrevivessem o suficiente para que pudessem contribuir para a formação de nosso planeta. Entretanto, núclídeos muito instáveis para serem encontrados na Terra podem ser produzidos artificialmente e os cientistas já acrescentaram cerca de 2.200 diferentes núclídeos aos aproximadamente 270 núclídeos naturais.

Para superar as barreiras de energia para a síntese nuclear, as partículas devem colidir vigorosamente umas com as outras (Fig. 17.17), como elas fazem nas estrelas. Portanto, para fabricar os elementos, temos de simular as condições encontradas no interior das estrelas. Se um próton, uma partícula α ou outro núcleo com carga positiva se deslocam em velocidade suficientemente alta, eles têm energia cinética suficiente para superar a repulsão eletrostática do núcleo. A partícula incidente penetra no núcleo, onde é capturada pela força intensa. A alta velocidade necessária pode ser adquirida em um acelerador de partículas.

A **transmutação** de elementos, isto é, a conversão de um elemento em outro, em especial chumbo em ouro, foi o sonho dos alquimistas e uma das raízes da Química moderna. Porém, os alquimistas só tinham acesso a técnicas químicas, que são ineficazes, porque as variações de energia envolvidas são muito pequenas para forçar a entrada de núcleons nos núcleos. A transmutação hoje foi reconhecida na natureza e realizada em laboratório, porém com o uso de métodos jamais sonhados pelos alquimistas. Rutherford obteve a primeira transmutação nuclear artificial em 1919. Ele bombardeou núcleos de nitrogênio-14 com partículas α em alta velocidade. Os produtos da transmutação foram oxigênio-17 e um próton:



Esses processos de transmutação são comumente representados de forma simples como



ou, em geral,

Alvo (partícula incidente, partícula ejetada) produto

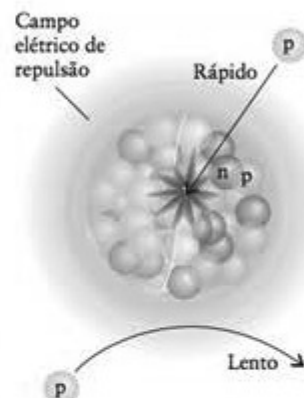
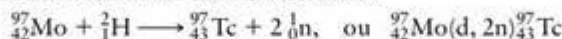


FIGURA 17.17 Quando uma partícula com carga positiva se aproxima de um núcleo, ela é fortemente repelida. Entretanto, uma partícula com velocidade muito alta pode penetrar o núcleo antes que a repulsão a faça se afastar, podendo ocorrer uma reação nuclear.

Um grande número de nuclídeos foi sintetizado na Terra. Por exemplo, o tecnécio (como tecnécio-97) foi preparado pela primeira vez em nosso planeta em 1937, pela reação entre núcleos de molibdênio e deutério:



em que d é um deuteron, ${}^2\text{H}^+$. O tecnécio é, agora, moderadamente abundante, porque ele se acumula nos produtos de decaimento das usinas de energia nuclear. Outro isótopo,

QUADRO 17.1 O que isso tem a ver com... permanecer vivo?

Medicina nuclear

A química nuclear transformou os diagnósticos médicos, o tratamento e a pesquisa. Os traçadores radioativos são usados para medir a função dos órgãos. O sódio-24, por exemplo, é usado para monitorar o fluxo sanguíneo e o estrôncio-87, para estudar o crescimento dos ossos. Porém, o impacto mais importante dos radioisótopos no diagnóstico foi no campo da obtenção de imagens. O tecnécio-99m (veja o Exercício 17.48) é o nuclídeo radioativo mais utilizado na Medicina, especialmente para obter imagens de ossos. Esse isótopo é muito ativo e emite raios γ que atravessam rapidamente o corpo. Os raios γ causam muito menos dano que as partículas α , e o isótopo tem vida tão curta que os riscos para o paciente são mínimos.

O cobalto-60 é usado na técnica conhecida como navalha gama, uma técnica, aliás, que não emprega o bisturi mas é capaz de destruir tumores em locais como o cérebro, em que a cirurgia é impossível. Na técnica da navalha gama, cerca de 200 raios γ são focalizados de diferentes ângulos em um tumor de localização conhecida. Cada raio γ tem baixa amplitude e causa poucos danos ou nenhum nos tecidos que atravessa. Na interseção desses 200 raios, porém, a energia é suficientemente alta e poderosa para destruir as células do tumor. O processo é indolor e o paciente pode ficar acordado durante o tratamento. A cabeça do paciente não tem de ser raspada e a recuperação é rápida.

A *tomografia por emissão de pósitrons* (PET) utiliza um emissor de pósitrons, como, por exemplo, o flúor-18, para obter imagens de tecidos humanos com um grau de detalhes que não são possíveis com raios X. Ela tem sido muito usada para



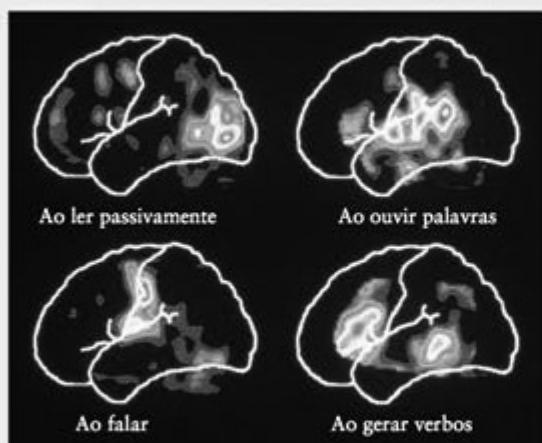
Este paciente está prestes a ser submetido a uma varredura de PET da função cerebral.

estudar as funções cerebrais (veja as ilustrações) e em diagnoses médicas. Por exemplo, quando o hormônio estrogênio é marcado com flúor-18 e injetado em um paciente com câncer, o composto marcado com flúor é preferencialmente absorvido pelo tumor. Os pósitrons emitidos pelos átomos de flúor são rapidamente aniquilados quando encontram elétrons. Os raios γ resultantes são detectados por um sistema de varredura que se move vagarosamente sobre a parte do corpo que contém o tumor. O crescimento do tumor pode ser rápida e precisamente estimado com essa técnica. Um equipamento para imagens PET precisa estar próximo a um ciclotron, para que os emissores de pósitrons possam ser rapidamente incorporados aos compostos desejados assim que são criados.

Vários tipos de terapia do câncer utilizam radiação para destruir células malignas. A *terapia por captura de nêutrons pelo boro* é diferente pelo fato que o boro-10, o isótopo injetado, não é radioativo. Entretanto, quando o boro-10 é bombardeado com nêutrons, emite partículas α com alto poder destrutivo. Na terapia por captura de nêutrons pelo boro, o boro-10 é incorporado a um composto que é absorvido preferencialmente pelos tumores. O paciente é, então, exposto a breves períodos de bombardeamento por nêutrons. Assim que o bombardeamento cessa, o boro-10 para de gerar partículas α .

Exercícios relacionados: 17.47, 17.48, 17.81, 17.82, 17.89 e 17.90

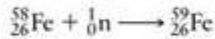
Leitura complementar: P. Barry, "Unintended consequences of cancer therapies," *Science News*, vol. 171, p. 334, May, 2007. V. Marx, "Molecular imaging," *Chemical and Engineering News*, vol. 83(30), 2005, pp. 25-34. G. Miller, "Neuroscience: A better view of brain disorders," *Science*, vol. 313, September 8, 2006, pp. 1376-1379.



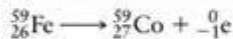
Estas quatro imagens PET mostram como o fluxo sanguíneo em diferentes partes do cérebro é afetado pelas várias atividades. Neste caso, um isótopo de oxigênio que é absorvido pela hemoglobina no sangue é usado como fonte de pósitrons.

o tecnécio-99, tem aplicações farmacêuticas, particularmente na obtenção de imagens de ossos (Quadro 17.1).

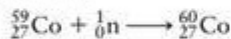
É mais fácil para um nêutron se aproximar de um núcleo alvo do que para um próton. Como o nêutron não tem carga, ele não é repelido pela carga do núcleo e não é necessário acelerá-lo a velocidades muito altas. Um exemplo de **transmutação induzida por nêutron** é a formação do cobalto-60, que é utilizado no tratamento do câncer. O processo em três etapas começa com o ferro-58. A primeira etapa é a produção de ferro-59:



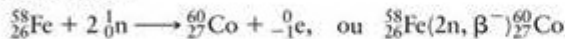
A segunda etapa é o decaimento β do ferro-59 a cobalto-59:



Na etapa final, o cobalto-59 absorve outro nêutron do feixe incidente e se converte em cobalto-60:



A reação total é



Teste 17.4A Complete as seguintes reações nucleares: (a) $? + {}_2^4\alpha \longrightarrow {}_{96}^{243}\text{Cm} + {}_0^1\text{n}$; (b) ${}_{96}^{242}\text{Cm} + {}_2^4\alpha \longrightarrow {}_{98}^{245}\text{Cf} + ?$.

[Resposta: (a) ${}_{94}^{240}\text{Pu}$; (b) ${}_0^1\text{n}$]

Teste 17.4B Complete as seguintes reações nucleares: (a) ${}_{98}^{250}\text{Cf} + ? \longrightarrow {}_{103}^{257}\text{Lr} + 4 {}_0^1\text{n}$; (b) $? + {}_6^{12}\text{C} \longrightarrow {}_{102}^{254}\text{No} + 4 {}_0^1\text{n}$.

Os elementos **transurânio** são os elementos que seguem o urânio na Tabela Periódica. Os elementos do rutherfordídio (Rf, $Z = 104$) ao meitnério (Mt, $Z = 109$) foram formalmente nomeados em 1997. Os **elementos transmeitnério**, os elementos além do meitnério (inclusive os nuclídeos hipotéticos que ainda não foram feitos), são nomeados sistematicamente ao menos até terem sido identificados e que se chegue a um acordo internacional sobre um nome permanente. A nomenclatura sistemática usa os prefixos da Tabela 17.2 que identificam os números atômicos, com a terminação *-io*. Assim, o elemento $Z = 110$ ficou conhecido como *ununilíu* 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.

TABELA 17.2 Notação para a nomenclatura sistemática de elementos*

Dígito	Nome	Abreviação
0	nil	n
1	uni	u
2	bi	b
3	tri	t
4	quad	q
5	pent	p
6	hex	h
7	sep	s
8	oct	o
9	en	e

*Por exemplo, o elemento 123 seria chamado de unibítrio, Ubt.

RADIAÇÃO NUCLEAR

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 (veja o Quadro 17.1). 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 (Tabela 17.3).

17.6 Efeitos biológicos da radiação

As partículas α , relativamente pesadas e com carga elevada, interagem tão fortemente com a matéria que sua velocidade se reduz, elas capturam elétrons da matéria circundante e se

TABELA 17.3 Proteção necessária contra as radiações α , β e γ

Radiação	Poder relativo de penetração	Proteção necessária
α	1	papel, pele
β	100	3 mm de alumínio
γ	10.000	concreto, chumbo

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 maior parte da radiação α é absorvida pela camada superficial da pele morta, na qual ela causa danos muito 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+} . O plutônio pode substituir o ferro no organismo e ser absorvido pelos ossos, onde ele destrói a capacidade do organismo de produzir as células vermelhas do sangue. Os resultados são doenças da radiação, câncer e morte.

A radiação β é a segunda 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, e 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 pode ser 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.

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 $1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. A unidade original utilizada era a dose de radiação absorvida (rad), a quantidade de radiação que deposita 10^{-2} J de energia por quilograma de tecido; logo, $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$. A dose de 1 rad corresponde a uma pessoa com 65 quilogramas de peso absorvendo um total de 0,65 J, que não é uma energia muito grande. Ela é suficiente para ferver somente 0,2 mg de água. Entretanto, 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. Devemos, portanto, incluir a eficiência biológica relativa, Q , 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):

$$\text{Dose equivalente (Sv)} = Q \times \text{dose absorvida (Gy)} \quad (1)$$

No sistema antigo (não SI), a unidade de dose equivalente é o roentgen equivalente homem (rem), que é definido da mesma forma que o sievert, porém com a dose absorvida em rad. Assim, $1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$.

Uma dose de 0,3 Gy (30 rad) de radiação γ corresponde à dose equivalente de 0,3 Sv (30 rem), 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 (600 rem), suficientes para matar. A média anual típica de dose equivalente que cada um de nós recebe de fontes naturais, chamada de radiação de fundo, é cerca de $2 \text{ mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ (em que a é a abreviação SI para ano), mas esse número varia, dependendo de nosso estilo de vida e do lugar onde moramos. Cerca de 20% da radiação de fundo provém de nossos próprios corpos. 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 principal fonte de radioatividade no corpo humano é o potássio-40. Aproximadamente 35.000 núcleos de potássio-40 se desintegraram em seu corpo enquanto você lia este pequeno texto.

QUADRO 17.2 Como podemos saber... o quanto um material é radioativo?

A capacidade que a radiação nuclear tem de ejetar elétrons dos átomos e dos íons pode ser usada para medir sua intensidade. Becquerel foi o primeiro a medir a intensidade da radiação. Ele determinou em que grau a radiação escurecia um filme fotográfico. O escurecimento é o resultado dos mesmos processos redox que ocorrem na fotografia comum, como:



exceto que a oxidação inicial dos íons do brometo é causada pela radiação nuclear, e não pela luz. A técnica de Becquerel ainda é usada nos filmes contidos nos dispositivos que monitoram a exposição dos trabalhadores à radiação.

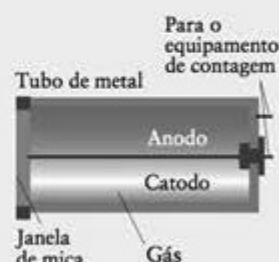
Um *contador Geiger* monitora a radiação pela detecção da ionização de um gás em baixa pressão, como mostrado na ilustração. A radiação ioniza os átomos do gás dentro de um cilindro e permite um fluxo rápido de corrente entre os eletrodos. O sinal elétrico resultante pode ser registrado diretamente ou convertido em um estalo audível. A frequência dos estalos indica a intensidade da radiação. Uma limitação dos contadores Geiger é que eles não respondem bem aos raios γ . Somente cerca de 1% de fótons dos raios γ são detectados, enquanto que todas as partículas β incidentes sobre o contador são detectadas. Como a eficiência de um contador Geiger depende do tamanho do tubo, um contador usado para monitorar várias atividades geralmente possui dois tubos de tamanhos diferentes.

Um *contador de cintilação* aproveita o fato de que os fósforos – substâncias fosforescentes, como o iodeto de sódio e o sulfato de zinco (veja a Seção 15.14) – produzem uma centelha de luz — uma cintilação — quando expostos à radiação. O contador contém também um *tubo fotomultiplicador*, que converte luz em um sinal elétrico. A intensidade da radiação é determinada pela intensidade do sinal elétrico.

Um *dosímetro* é usado para coletar evidências cumulativas da exposição à radiação; ele é usado como um crachá. Os dosímetros contêm um material *termoluminescente*, como o fluoreto de lítio. A radiação incidente ioniza os íons fluoreto, arrancando seus elétrons. Os elétrons migram para longe dos



(a)



(b)

- (a) Um contador Geiger com um pedaço do minério de urânio.
 (b) O detector de um contador Geiger contém um gás (frequentemente argônio e um pouco de vapor de etanol, ou neônio e um pouco de vapor de bromo) em um cilindro com uma alta diferença de potencial (500-1.200 V) entre um fio central e as paredes. Quando a radiação ioniza o gás, os íons permitem que a corrente flua momentaneamente, produzindo um estalo característico.

átomos de flúor, mas ficam presos no cristal. Quando o cristal é aquecido, eles voltam para os átomos de flúor e liberam a diferença de energia na forma de luz. A dose de radiação recebida é determinada pela intensidade da luz. Os dosímetros podem ser usados por um período de tempo que varia de um dia a diversas semanas, porque os elétrons excitados se acumulam com a exposição continuada, permitindo, assim, que seja calculada a dose em longos períodos.

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.

17.7 Medida da velocidade de decaimento nuclear

Contadores Geiger e contadores de cintilação são usados para medir a velocidade de decaimento dos núcleos radioativos (Quadro 17.2). 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 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). A Tabela 17.4 resume essas unidades.

A equação do decaimento de um núcleo (núcleo pai \rightarrow núcleo filho + radiação) tem exatamente a mesma forma da reação elementar unimolecular (Seção 14.7), com um nú-

TABELA 17.4 Unidades de radiação*

Propriedade	Nome da unidade	Símbolo	Definição
atividade	becquerel	Bq	1 desintegração por segundo
	curie	Ci	$3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo
dose absorvida	gray	Gy	$1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$
	dose de radiação absorvida	rad	$10^{-2} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$
dose equivalente	sievert	Sv	$Q \times \text{dose absorvida}^\dagger$
	roentgen equivalente no homem	rem	$Q \times \text{dose absorvida}^\dagger$

*As antigas estão em vermelho.

$^\dagger Q$ é a eficiência biológica relativa da radiação. Normalmente, $Q < 1 \text{ Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$ para a radiação γ , a radiação β e a maior parte das outras radiações, mas $Q < 20 \text{ Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$ para a radiação α e para nêutrons rápidos. Um fator adicional de 5 (isto é, $5Q$) é usado, em certas circunstâncias, para os ossos.

cleo 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 do núcleo. A velocidade de decaimento nuclear depende somente da identidade do isótopo, não de sua forma química ou da temperatura.

Assim como uma reação química unimolecular, a lei da velocidade de decaimento nuclear é de primeira ordem, isto é, a relação entre a velocidade de decaimento e o número N de núcleos radioativos presentes é dada pela lei do decaimento radioativo:

$$\text{Atividade} = \text{velocidade de decaimento} = k \times N \quad (2)^*$$

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. Como vimos na Seção 14.4, 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

$$N = N_0 e^{-kt} \quad (3)^*$$

em que N_0 é o número de núcleos radioativos inicialmente presentes (em $t = 0$). A Fig. 17.18 mostra um gráfico dessa expressão.

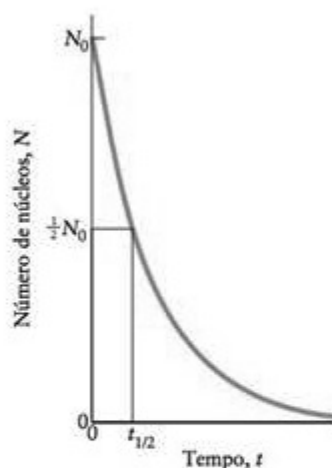


FIGURA 17.18 O decaimento exponencial do número de núcleos radioativos que existem em uma amostra implica que a atividade dessa amostra também decai exponencialmente com o tempo. A curva é caracterizada pela meia-vida, $t_{1/2}$.

EXEMPLO 17.3

Uso da lei do decaimento radioativo

Uma das razões pelas quais as armas termonucleares têm de sofrer manutenção regular é que o trício nelas contido sofre decaimento nuclear. Suponha que uma amostra de trício de massa 1,0 g foi armazenada. Que massa desse isótopo permanecerá após 5,0 a (1 a = 1 ano)? A constante de decaimento do trício é $0,0564 \text{ a}^{-1}$.

Antecipe Como a constante de decaimento corresponde a uma fração pequena do decaimento anual, devemos esperar que a maior parte do trício permaneça após 5 anos.

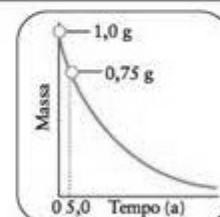
PLANEJE A massa total do isótopo em uma amostra é proporcional ao número de núcleos daquele isótopo na amostra. Portanto, a dependência da massa de um isótopo radioativo com o tempo segue a lei do decaimento radioativo como o número de núcleos da amostra. Isto é, como $m \propto N$, podemos escrever, no lugar da Eq. 3, a expressão $m = m_0 e^{-kt}$, em que m é a massa total do isótopo radioativo no tempo t e a massa inicial é m_0 .

RESOLVA

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

$$\begin{aligned} m &= (1,00 \text{ g}) \times e^{-(0,0564 \text{ a}^{-1}) \times (5,0 \text{ a})} \\ &= 0,75 \text{ g} \end{aligned}$$

Avalie Como esperado, só uma pequena quantidade do isótopo decaiu. Após 5,0 anos restarão 0,75 g do isótopo.



Teste 17.5A A constante de decaimento do f6rmio-254 6 210 s⁻¹. Que massa do is6topo restar6, se uma amostra com massa 1,00 μg for guardada por 10. ms?

[Resposta: 0,12 μg]

Teste 17.5B A constante de decaimento do nucl6deo net6nio-237 6 3,3 × 10⁻⁷ a⁻¹. Que massa do is6topo estar6 presente se uma amostra com massa 5,0 μg sobrevive por 1,0 Ma (1,0 milh6o de anos)?

O decaimento radioativo 6 normalmente discutido em termos de **meia-vida**, $t_{1/2}$, isto 6, o tempo necess6rio para que se desintegre a metade do n6mero inicial dos n6cleos. Como fizemos na Se76o 14.5, encontramos a rela76o entre $t_{1/2}$ e k fazendo $N = \frac{1}{2}N_0$ e $t = t_{1/2}$ na Eq. 3:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \quad (4)^*$$

Essa equa76o mostra que quanto maior for o valor de k , mais curta ser6 a meia-vida do nucl6deo. Os nucl6deos com tempos de meia-vida curtos s6o menos est6veis do que os nucl6deos com tempos de meia-vida longos. Eles decaem mais em um dado per6odo de tempo e s6o mais “quentes” (mais intensamente radioativos) do que os nucl6deos com tempos de meia-vida longos.

Ponto para pensar: Pode ser vantajoso quando os reatores nucleares produzem muito lixo radioativo?

Os tempos de meia-vida incluem um intervalo muito extenso (Tabela 17.5). Vejamos o estr6ncio-90, cujo tempo de meia-vida 6 28,1 a. Esse nucl6deo ocorre na **precipita76o** radioativa, a poeira fina que se deposita das nuvens ap6s a explos6o de uma bomba nuclear, e pode ocorrer tamb6m na libera76o acidental de materiais radioativos no ar. Como ele 6 quimicamente muito semelhante ao c6lcio, o estr6ncio acompanha esse elemento no ambiente e se incorpora aos ossos de animais. Uma vez l6, ele continua a emitir radia76o por muitos anos. Aproximadamente 10 meias-vidas (para o estr6ncio-90, 281 a) devem se passar antes que a atividade de uma amostra caia at6 1/1.000 de seu valor inicial. A meia-vida do iodo-131, que foi liberado no inc6ndio acidental da usina nuclear de Chernobyl, 6 somente 8,05 d, mas ele se acumula na gl6ndula tireoide. Diversos casos de c6ncer da tireoide foram ligadas 6 exposi76o de iodo-131 proveniente do acidente nuclear. O plut6nio-239 tem meia-vida igual a 24 ka (24.000 anos). Isso significa que s6o necess6rias instala76es pr6prias para o armazenamento dos res6duos de plut6nio por longos per6odos e a terra contaminada com plut6nio n6o poder6 ser habitada novamente por milhares de anos sem enormes gastos com a repara76o.

A constante de meia-vida de um nucl6deo 6 usada, na pr6tica, na determina76o da idade de artefatos arqueol6gicos. Na **data76o isot6pica**, mede-se a atividade dos is6topos radioativos que eles cont6m. Os is6topos radioativos usados para a data76o incluem o ur6nio-238, o pot6ssio-40 e o tr6cio. Entretanto, o exemplo mais importante 6 a **data76o por carbono radioativo**, que utiliza o decaimento β do carbono-14, cuja meia-vida 6 5.730 a.

O carbono-12 6 o principal is6topo do carbono, mas existe uma propor76o pequena de carbono-14 em todos os seres vivos. Seus n6cleos s6o produzidos quando os n6cleos de nitrog6nio da atmosfera s6o bombardeados pelos n6utrons formados nas colis6es de raios c6smicos com outros n6cleos:



Os 6tomos de carbono-14 s6o produzidos na atmosfera em velocidade aproximadamente constante e a propor76o entre o carbono-14 e o carbono-12 na atmosfera tende a permanecer constante com o tempo. Os 6tomos de carbono-14 s6o incorporados aos organismos vivos como ¹⁴CO₂ por meio da fotoss6ntese e da digest6o. Eles deixam os organismos vivos pelos processos normais de excre76o e respira76o e tamb6m por decaimento a uma velocidade determinada. Como resultado, todos os organismos vivos t6m uma raz6o fixa (de cerca de 1 para 10¹²) entre os 6tomos de carbono-14 e os 6tomos de carbono-12, e 1,0 g de carbono natural tem a atividade de 15 desintegra76es por minuto.

Quando o organismo morre, n6o ocorre mais troca do carbono com a vizinhan76a. Entretanto, os n6cleos de carbono-14 que est6o no organismo morto continuam a desintegrar-se com uma meia-vida constante; logo, a rela76o entre carbono-14 e carbono-12 decresce. A raz6o observada em uma amostra de tecido morto pode, portanto, ser usada para estimar o tempo decorrido desde a morte.

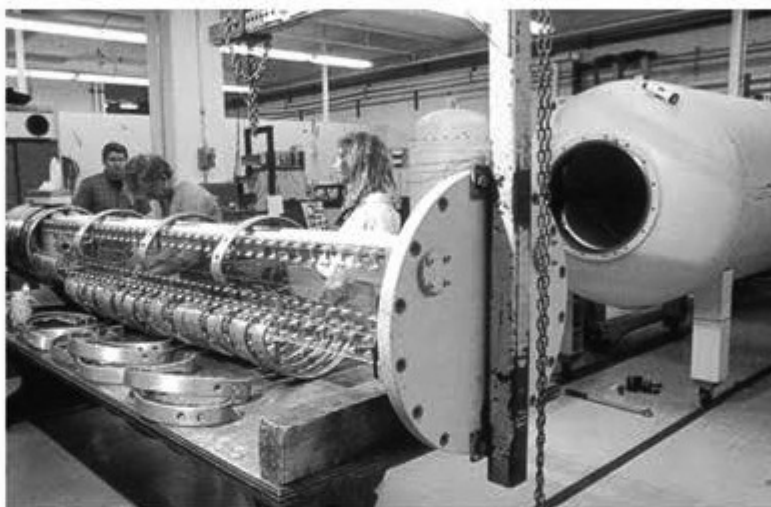
TABELA 17.5 Meia-vida dos is6topos radioativos*

Nucl6deo	Meia-vida, $t_{1/2}$
tr6cio	12,3 a
carbono-14	5,73 ka
carbono-15	2,4 s
pot6ssio-40	1,26 Ga
cobalto-60	5,26 a
estr6ncio-90	28,1 a
iodo-131	8,05 d
c6sio-137	30,17 a
r6dio-226	1,60 ka
ur6nio-235	0,71 Ga
ur6nio-238	4,5 Ga
f6rmio-244	3,3 ms

*a = ano; d = dia.

Os testes nucleares aumentam a quantidade de carbono-14 no ar e as sens6veis t6cnicas de data76o por carbono radioativo levam em conta esse aumento.

FIGURA 17.19 Na versão moderna da técnica de datação através do carbono-14, usa-se um espectrômetro de massas para determinar a proporção entre o número de núcleos de carbono-14 e o número de núcleos de carbono-12 existentes em uma amostra.



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. Esse procedimento é ilustrado no Exemplo 17.4. 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 (Fig. 17.19).

EXEMPLO 17.4

Interpretação da datação com carbono-14

Uma amostra de carbono de massa 1,00 g, proveniente de uma árvore encontrada em um sítio arqueológico no Arizona, Estados Unidos, produziu $7,9 \times 10^3$ desintegrações do carbono-14 em um período de 20,0 horas. No mesmo período, 1,00 g de carbono de uma fonte recente produziu $1,84 \times 10^4$ desintegrações. Calcule a idade da amostra arqueológica. A meia-vida do ^{14}C é 5,73 ka.

Anteçipe Como a meia-vida do ^{14}C é 5,73 ka e a atividade da amostra caiu a menos da metade da amostra moderna, devemos esperar que ela seja mais antiga do que 5.730 anos.

PLANEJE Rearranje, inicialmente, a Eq. 3 para obter uma expressão para o tempo e, depois, expresse k em termos de $t_{1/2}$ usando a Eq. 4. Supondo que a proporção de carbono-14 da atmosfera seja a mesma, hoje e quando o tecido da amostra antiga estava vivo, então a atividade *original* da amostra antiga pode ser considerada a mesma da amostra recente. Pode-se, portanto, fazer N/N_0 igual à razão do número de desintegrações das amostras antiga e recente.

RESOLVA

$$\text{De } N = N_0 e^{-kt},$$

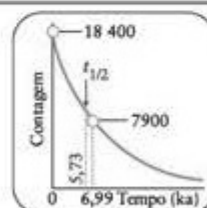
$$t = -\frac{1}{k} \ln\left(\frac{N}{N_0}\right)$$

$$\text{De } t_{1/2} = (\ln 2)/k,$$

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

Substitua os dados.

$$\begin{aligned} t &= -\frac{5,73 \text{ ka}}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{7900}{18\,400}\right) \\ &= 6,99 \text{ ka} \end{aligned}$$



Avalie Como esperado, a idade da amostra é superior a 5.730 anos. Pode-se concluir que aproximadamente 7.000 anos se passaram desde que o pedaço de madeira era parte de uma árvore viva.

Teste 17.6A Uma amostra de carbono de massa 250. mg, extraída da madeira de uma tumba, em Israel, produziu 2.480 desintegrações do carbono-14 em 20. h. Estime o tempo decorrido desde a morte do indivíduo, considerando a mesma atividade de uma amostra recente, como no Exemplo 17.4.

[Resposta: 5,1 ka]

Teste 17.6B Uma amostra de carbono de massa 1,00 g, obtida dos pergaminhos encontrados na região do Mar Morto, no Oriente Médio, produziu $1,4 \times 10^4$ desintegrações do carbono-14 em 20. h. Estime o tempo aproximado decorrido desde que as peles dos pergaminhos foram removidas das ovelhas, considerando que a atividade era igual à de uma amostra recente, como no Exemplo 17.4.

A lei de decaimento radioativo mostra que o número de núcleos radioativos decai exponencialmente com o tempo, com meia-vida característica. Os isótopos radioativos são usados para determinar as idades de objetos.

17.8 Usos dos radioisótopos

Os radioisótopos são isótopos radioativos. Eles são usados na cura de doenças (como descrito no Quadro 17.1) 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. Fertilizantes marcados com nitrogênio, fósforo e potássio radioativos são usados para acompanhar o mecanismo de crescimento das plantas e a passagem desses elementos pelo ambiente. 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.



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

Os radioisótopos têm aplicações comerciais importantes. Por exemplo, o amerício-243 é usado em detectores de fumaça. Seu papel é ionizar todas as partículas da fumaça, o que permite a passagem de corrente e aciona o alarme. A exposição à radiação é usada também na esterilização de alimentos e na inibição da germinação de batatas. A radiação mata as bactérias que estragam os alimentos, mas não produz substâncias prejudiciais à saúde. 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, são abastecidas por plutônio produzido em reatores nucleares.

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 substâncias muito antigas, como as rochas, usando materiais com meias-vidas mais longas. O urânio-238 ($t_{1/2} = 4,5 \text{ Ga}$, $1 \text{ Ga} = 10^9$ anos) e potássio-40 ($t_{1/2} = 1,26 \text{ Ga}$) são usados para datar rochas muito antigas. O potássio-40 se desintegra por captura de um elétron para formar a 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. O resultado mostrou que as rochas tinham entre 3,5 e 4,0 bilhões de anos, mais ou menos a mesma idade das rochas da Terra.

Os radioisótopos são usados como fontes de aquecimento de longa duração, no estudo do meio ambiente e no acompanhamento 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.

ENERGIA NUCLEAR

As reações nucleares podem liberar enormes quantidades de energia e os reatores nucleares são muito usados na produção de energia. Os benefícios da energia nuclear incluem a grande quantidade de energia que pode ser obtida de uma pequena massa de combustível e a ausência de poluição química do tipo associado aos combustíveis fósseis. Entretanto, como outras fontes de energia, a energia nuclear apresenta grandes desafios técnicos e imprevistos. As próximas seções descrevem alguns dos princípios envolvidos.

17.9 Conversão massa-energia

A energia liberada quando os núcleons de um núcleo adotam um arranjo mais estável pode ser calculada por comparação das massas dos reagentes e produtos nucleares. A teoria da relatividade de Einstein nos 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.

$$E = mc^2 \quad (5)^*$$

em que c é a velocidade da luz ($3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). 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 as que liberam 10^3 kJ de energia, a diferença entre as massas dos produtos e reagentes é somente 10^{-8} g . 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.

A energia de ligação nuclear, E_{lig} , é a energia liberada quando prótons e nêutrons se juntam para formar um núcleo. 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 nuclídeo. A energia de ligação normalmente é fornecida como energia por núcleon, e outra maneira de imaginar a energia de ligação é como a energia média necessária para separar um núcleon de seu núcleo. Podemos usar a equação de Einstein para calcular a energia de ligação nuclear a partir da diferença de massa, Δm , entre o núcleo e os núcleons separados. 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

$$\Delta m = \sum m(\text{produtos}) - \sum m(\text{reagentes}) = m({}_{26}^{56}\text{Fe}) - (26m_p + 30m_n)$$

Podemos, então, calcular a energia de ligação a partir da diferença de massa:

$$E_{\text{lig}} = |\Delta m| \times c^2 \quad (6)^*$$

Usa-se o valor absoluto da diferença de massa porque todas as energias de ligação são positivas. As energias de ligação são apresentadas em elétron-volts (eV) ou, mais especificamente, milhões de elétron-volts ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$).

$$1 \text{ eV} = 1,60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Como as massas dos nuclídeos são muito pequenas elas são normalmente dadas como múltiplos da constante de massa atômica, m_u . A constante de massa atômica é definida como exatamente $1/12$ da massa de um átomo de carbono-12:

$$m_u = \frac{m({}^{12}\text{C})}{12}$$

O valor medido mais atual da massa do carbono-12 é

$$m_u = 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

A massa de um átomo em termos da constante de massa atômica é numericamente igual à massa molar em gramas por mol. Por exemplo, a massa molar do carbono-12 é exatamente $12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, e a massa de um átomo de carbono-12 é exatamente $12 m_u$.

Uma nota em boa prática: Distinga a constante de massa atômica, m_u , da unidade de massa atômica u . Se a massa molar do nuclídeo é M , a massa do nuclídeo deve ser escrita como $(M/\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})m_u$ (sem separação, porque é um múltiplo da constante) ou $(M/\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})u$ (separado,

porque é um múltiplo da unidade). Por exemplo, para ^{19}F , para o qual $M = 19,00 \text{ g/mol}^{-1}$, a massa de um átomo é escrita como $19,00m_u$ ou $19,00 \text{ u}$. As duas notações são relacionadas por $m_u = 1 \text{ u}$. A unidade 1 u era escrita como 1 amu e você ainda pode encontrar essa forma.

Ao calcular $|\Delta m|$ para uma reação nuclear, usaremos a massa do átomo de ^1H , e não a massa de cada próton. Essa estratégia nos permitirá usar as massas dos isótopos no lugar das massas dos núcleos atômicos isolados para calcular $|\Delta m|$, porque o número de elétrons do isótopo será igual ao número total de elétrons dos átomos de ^1H do outro lado da equação, e suas massas se cancelam. A energia de ligação elétron-núcleo, que contribui para a massa de um átomo, é equivalente a somente cerca de $m_e/10^6$ por próton, e pode ser ignorada em cálculos elementares.

EXEMPLO 17.5

Cálculo da energia de ligação nuclear

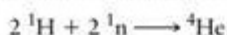
Calcule a energia de ligação nuclear do hélio-4, em elétron-volts, dadas as seguintes massas: ^4He , $4,0026m_u$; ^1H , $1,0078m_u$; n , $1,0087m_u$.

Antecipe Como as reações nucleares podem liberar quantidades muito grandes de energia, devemos esperar um valor alto para a energia de ligação.

PLANEJE A energia de ligação nuclear é a energia liberada pela formação do núcleo a partir de seus núcleons. Use átomos de H em vez dos prótons para levar em conta as massas dos elétrons na produção do He. Comece por escrever a equação nuclear da formação do nuclídeo a partir de átomos de hidrogênio e nêutrons e, depois, calcule a diferença de massas entre os produtos e os reagentes, e converta o resultado em quilogramas. Por fim, use a relação de Einstein para calcular a energia correspondente a essa perda de massa e converta as unidades a elétron-volts.

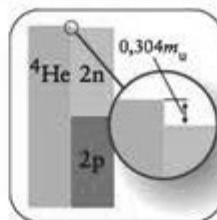
RESOLVA

Escreva a equação nuclear.



Calcule a variação de massa.

$$\begin{aligned} \Delta m &= m(^4\text{He}) - (2m_p + 2m_n) \\ &= 4,0026m_u - \{2(1,0078) + 2(1,0087)\}m_u \\ &= -0,0304m_u \end{aligned}$$



Converta em quilogramas.

$$\Delta m = -0,0304 \times 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Calcule a energia de ligação a partir de $E_{\text{lig}} = |\Delta m| \times c^2$,

$$\begin{aligned} E_{\text{lig}} &= |-0,0304 \times 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}| \times (3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})^2 \\ &= 4,54 \times 10^{-12} \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2} = 4,54 \times 10^{-12} \text{ J} \end{aligned}$$

Converta a energia de ligação em milhões de elétron-volts:

$$E_{\text{lig}} = 4,54 \times 10^{-12} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1,602 \times 10^{-19} \text{ J}} \times \frac{1 \text{ MeV}}{10^6 \text{ eV}} = 28,3 \text{ MeV}$$

Avalie O valor da energia de ligação mostra que $4,54 \text{ pJ}$ ($1 \text{ pJ} = 10^{-12} \text{ J}$) ou $28,3 \text{ MeV}$ são liberados quando um núcleo de ^4He se forma a partir de seus núcleons. (Note que na penúltima etapa usamos $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2} = 1 \text{ J}$.) Embora pareça pequena, na escala atômica é muito grande. A energia de ligação total de 1 mol de átomos de He é $1,09 \times 10^{13} \text{ J}$, ou $10,9 \text{ TJ}$.

Teste 17.7A Calcule a energia de ligação, em elétron-volts, de um núcleo de carbono-12.

[Resposta: 92,3 MeV]

Teste 17.7B Calcule a energia de ligação molar, em elétron-volts, dos núcleos de urânio-235. A massa de um átomo de urânio-235 é $235,0439m_u$.

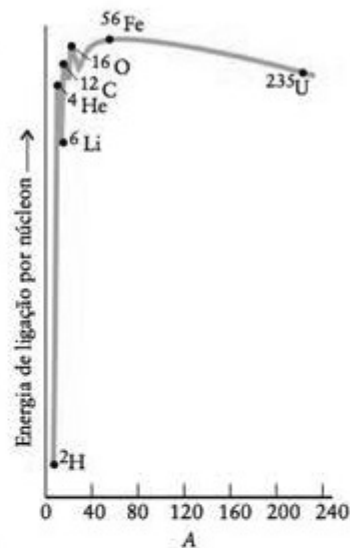


FIGURA 17.20 Variação da energia de ligação nuclear por núcleon. A energia de ligação máxima por núcleon ocorre perto do ferro e do níquel. Seus núcleos possuem energia mais baixa do que os demais, porque estão mais fortemente ligados. (O eixo vertical é E_{lig}/A .)

A Figura 17.20 mostra a energia de ligação por núcleon, E_{li}/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. A energia de ligação por núcleon é menor para todos os demais nuclídeos. Podemos inferir que os núcleos dos átomos leves ficam mais estáveis quando se “fundem” e que os núcleos pesados ficam mais estáveis 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.

17.10 Fissão nuclear

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. Podemos estimar a energia que seria liberada usando a equação de Einstein, como fizemos no Exemplo 17.5.

EXEMPLO 17.6

Cálculo da energia liberada durante a fissão

Quando os núcleos de urânio-235 são bombardeados com nêutrons, eles podem quebrar-se de várias maneiras, como esferas de vidro que se partem em fragmentos de tamanhos diferentes. Em um dos processos, o urânio-235 forma bário-142 e criptônio-92:



Calcule a energia liberada (em joules) quando 1,0 g de urânio-235 sofre essa reação de fissão. As massas das partículas são: ${}_{92}^{235}\text{U}$, $235,04m_{\text{u}}$; ${}_{56}^{142}\text{Ba}$, $141,94m_{\text{u}}$; ${}_{36}^{92}\text{Kr}$, $91,92m_{\text{u}}$; n, $1,0087m_{\text{u}}$.

Anteçipe Os processos de fissão são usados para a produção de energia e, portanto, devemos esperar a liberação de grande quantidade de energia.

PLANEJE Se conhecemos a perda de massa, podemos encontrar a energia liberada usando a equação de Einstein. Portanto, devemos calcular a massa total das partículas em cada lado da equação, obter a diferença e substituir a diferença na Eq. 6. A seguir, determinamos o número de núcleos da amostra a partir de $N = m(\text{amostra})/m(\text{átomos})$ e, por fim, multiplicamos a energia liberada na fissão de um núcleo por esse número para encontrar a energia liberada pela amostra.

RESOLVA

Calcule a massa dos produtos.

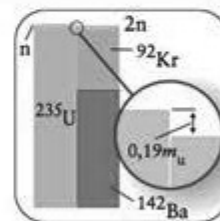
$$\begin{aligned} m(\text{produtos}) &= m(\text{Ba}) + m(\text{Kr}) + 2m(\text{n}) \\ &= \{141,92 + 91,92 + 2(1,0087)\}m_{\text{u}} \\ &= 235,86m_{\text{u}} \end{aligned}$$

Calcule a massa dos reagentes.

$$\begin{aligned} m(\text{reagentes}) &= m(\text{U}) + m(\text{n}) \\ &= 235,04m_{\text{u}} + 1,0087m_{\text{u}} = 236,05m_{\text{u}} \end{aligned}$$

Calcule a variação de massa.

$$\Delta m = 235,86m_{\text{u}} - 236,05m_{\text{u}} = -0,19m_{\text{u}}$$



Expresse esta variação em quilogramas.

$$\Delta m = -0,19 \times 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Observe que não cancelamos os nêutrons, embora eles apareçam em ambos os lados da equação. Como as equações das reações químicas elementares, as equações nucleares mostram o processo específico.

Calcule a variação de energia para a fissão de um núcleo a partir de $\Delta E = \Delta mc^2$.

$$\begin{aligned}\Delta E &= (-0,19 \times 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}) \times (3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})^2 \\ &= (-0,19 \times 1,6605 \times 10^{-27}) \times (3,00 \times 10^8)^2 \text{ J} (= -2,8 \times 10^{-11} \text{ J})\end{aligned}$$

Encontre o número de átomos, N , da amostra a partir de $N = m(\text{amostra})/m(\text{átomos})$.

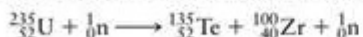
$$N = \frac{1,0 \times 10^{-3} \text{ kg}}{235,04 m_u} = \frac{1,0 \times 10^{-3}}{235,04 \times 1,6605 \times 10^{-27}} (= 2,6 \times 10^{21})$$

Calcule a variação total de energia a partir de $\Delta E(\text{total}) = N\Delta mc^2$.

$$\begin{aligned}\Delta E &= \frac{1,0 \times 10^{-3}}{235,04 \times 1,6605 \times 10^{-27}} \times \{-0,19 \times 1,6605 \times 10^{-27} \times (3,00 \times 10^8)^2\} \text{ J} \\ &= -7,3 \times 10^{10} \text{ J}\end{aligned}$$

Avalie. Como esperado, a energia liberada é grande: 73 GJ é 1,3 milhão de vezes mais energia do que seria produzida pela queima de 1,0 g de metano, o componente principal do gás natural.

Teste 17.8A Outra maneira de obter a fissão do urânio-235 é



Calcule a variação de energia quando 1,0 g de urânio-235 sofre fissão por esse processo. As massas necessárias são ${}^{235}_{92}\text{U}$, $235,04 m_u$; n , $1,0087 m_u$; ${}^{135}_{52}\text{Te}$, $134,92 m_u$; ${}^{100}_{40}\text{Zr}$, $99,92 m_u$.

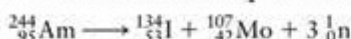
[Resposta: 77 GJ]

Teste 17.8B Uma reação nuclear muito destrutiva é uma das muitas que ocorrem na bomba atômica de ${}^{235}\text{U}$:



Quanta energia é liberada quando 1,0 g de urânio-235 sofre fissão por esse processo? As massas adicionais necessárias são ${}^{138}_{56}\text{Ba}$, $137,91 m_u$; ${}^{86}_{36}\text{Kr}$, $85,91 m_u$.

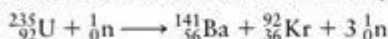
A fissão nuclear espontânea ocorre quando as oscilações naturais de núcleos pesados fazem com que eles se quebrem em dois núcleos de massa semelhante (Fig. 17.21). Podemos pensar que o núcleo se distorce e adquire a forma de halteres e, então, quebra-se em dois núcleos menores. Um exemplo é a desintegração 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 com números de massa próximos de 90 ou 130 (Fig. 17.22).

A fissão nuclear induzida é a fissão causada pelo bombardeamento de núcleos pesados com nêutrons (Fig. 17.23). 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 fissionáveis, 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 fissionáveis, após o ciclo seguinte de fissão, existirão nove nêutrons que podem induzir a fissão em mais nove núcleos. Na linguagem da Seção 14.9, os nêutrons são propagadores de uma reação em cadeia ramificada (Fig. 17.24).

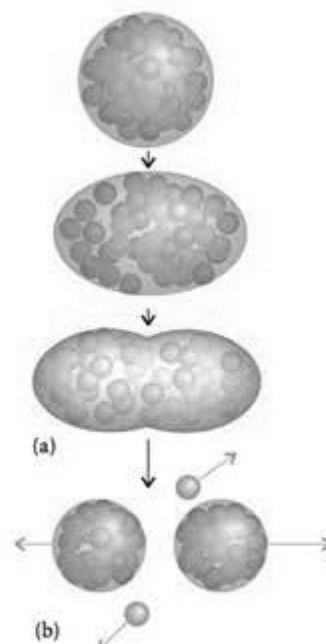


FIGURA 17.21 Na fissão nuclear espontânea as oscilações do núcleo pesado (a) provocam a divisão do núcleo, formando dois ou mais núcleos menores de massas semelhantes. (b) Neste caso, dois nêutrons são liberados.

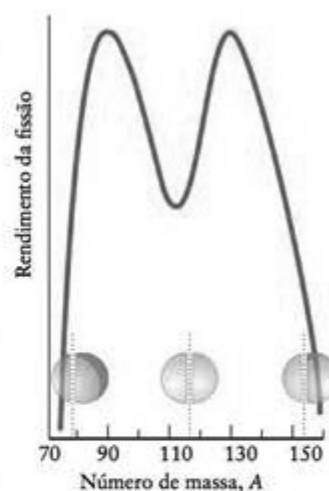


FIGURA 17.22 Rendimento da fissão do urânio-235. Observe que, na maior parte, os produtos de fissão estão nas regiões próximas de $A = 90$ e 130 , e que relativamente poucos nuclídeos que correspondem à fissão simétrica (A próximo de 117) se formam.

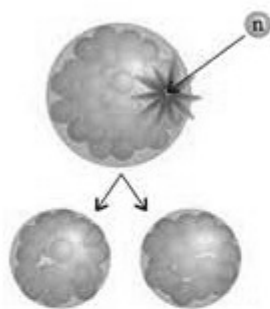


FIGURA 17.23 Na fissão nuclear induzida, o impacto de um nêutron provoca a divisão do núcleo.

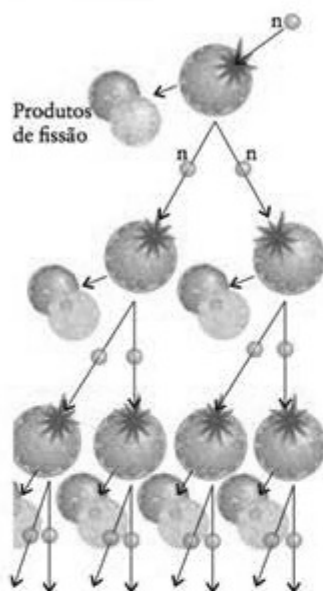


FIGURA 17.24 Uma reação em cadeia autossustentada, na qual os nêutrons são os propagadores de cadeia; ocorre quando a fissão induzida produz mais de um nêutron por evento de fissão. Os nêutrons assim produzidos estimulam a fissão em outros núcleos.

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 aproximadamente 15 kg, uma esfera do tamanho de um pequeno melão. A massa crítica é menor se o metal for comprimido pela detonação de um explosivo convencional em volta dele. Então, os núcleos se aproximam e bloqueiam mais de maneira eficaz o escape dos nêutrons. A massa crítica pode chegar a 5 kg para o plutônio muito comprimido. Uma amostra cuja massa é inferior à massa crítica para sua densidade é chamada de **subcrítica**.

Em uma arma nuclear, o material físsil é inicialmente subcrítico. O desafio é produzir rapidamente uma massa supercrítica, para que a reação em cadeia possa ocorrer de forma uniforme por todo o metal. O estado supercrítico pode ser conseguido pelo arremesso de dois blocos subcríticos, um em direção ao outro (como foi feito com a bomba jogada em Hiroshima), ou pela implosão de uma única massa subcrítica (a técnica usada na bomba que destruiu Nagasaki). Um forte emissor de nêutrons, em geral o polônio, ajuda a iniciar a reação em cadeia.

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 colisão com um núcleo (Fig. 17.25). Os nêutrons lentos cumprem três papéis significativos: eles não induzem a fissão de materiais fissionáveis (distintamente dos físeis), eles são mais efetivamente absorvidos pelo urânio-235, que é físsil, e eles são mais facilmente controlados. 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) usam a água comum como moderador. Eles são o tipo mais comum dentre os reatores nucleares em operação nos Estados Unidos (Fig. 17.26).

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.

Um dos muitos problemas da energia nuclear é a disponibilidade de combustível: as reservas de urânio-235 são somente cerca de 0,7% do urânio-238 não físsil e a separação dos isótopos é cara (Seção 17.12). Uma solução é sintetizar nuclídeos físeis a partir de outros elementos. Em um **reator regenerador**, um reator usado para criar combustível nuclear, os nêutrons não são moderados. Suas velocidades elevadas provocam a formação de urânio-235 e também certa quantidade de plutônio-239, físsil, que pode ser usado como combustível (ou em ogivas nucleares). Entretanto, os reatores regeneradores são de operação mais perigosa do que as usinas nucleares. Eles funcionam em níveis muito altos de calor e as reações rápidas exigem um grau de controle muito superior ao de um reator usado para a geração de energia nuclear.

A energia nuclear pode ser obtida mediante um arranjo para que a reação nuclear em cadeia ocorra com uma massa crítica de material físsil, com nêutrons como propagadores de cadeia. Um moderador é usado para reduzir a velocidade dos nêutrons nos reatores que usam material físsil.

17.11 Fusão nuclear

Embora os reatores de fissão não gerem poluição química, produzem resíduos radioativos muito perigosos. Existe, entretanto, outro tipo de reação nuclear que está sendo estudado para a geração de energia, 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.

Pode-se ver, no gráfico da Figura 17.20, que a energia de ligação nuclear aumenta muito dos elementos leves, como o deutério, para os elementos mais pesados vizinhos. Isso significa que energia é liberada quando os núcleos de hidrogênio se fundem para produzir

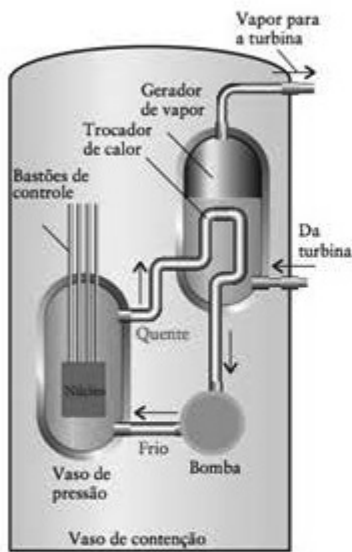


FIGURA 17.25 Diagrama esquemático de um tipo de reator nuclear no qual a água age como moderador da reação nuclear. Neste reator de água pressurizada (PWR), o resfriamento é feito com água sob pressão. As reações de fissão produzem calor, que ferve a água no gerador de vapor. O vapor resultante gira as turbinas que geram eletricidade.



FIGURA 17.26 O núcleo de um reator que usa água leve (LWR) de uma usina de energia nuclear opera imerso em água.

os núcleos daqueles elementos. Infelizmente, a forte repulsão elétrica entre prótons torna difícil que eles se aproximem o suficiente para que ocorra a fusão. Os núcleos dos isótopos mais pesados do hidrogênio fundem-se mais facilmente porque os nêutrons adicionais contribuem para a força intensa e ajudam a capturar os prótons que se aproximam. 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 esquemas de fusão usa o deutério (D, ^2H) e o trítio (T, ^3H) na seguinte sequência de reações nucleares:



A reação total libera 3×10^8 kJ por grama de deutério consumido. Essa energia corresponde à energia gerada pela Represa Hoover, uma represa de porte médio, operando na capacidade máxima por aproximadamente uma hora. O trítio adicional é fornecido para facilitar o processo. Como o trítio tem abundância natural muito baixa e é radioativo, ele é gerado no bombardeamento de lítio-6 com nêutrons na região próxima da zona da reação:

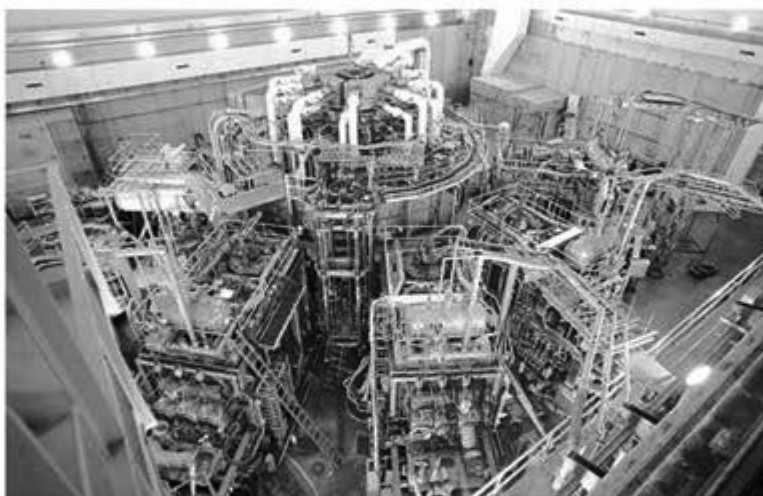


A fusão nuclear é muito difícil de ser obtida, porque os núcleos com carga devem ser arremessados uns contra os outros com energia cinética extremamente alta. Um modo de acelerar os núcleos a velocidades suficientemente elevadas é aquecê-los com uma explosão de fissão: este método é usado para produzir uma explosão termonuclear, uma explosão devido à fusão nuclear. Nas "bombas de hidrogênio", uma bomba de fissão (usando urânio ou plutônio) dispara uma bomba de fusão de lítio-6. As bombas de fusão podem ter capacidade destrutiva variável, porque não há massa crítica a ser mantida. As bombas de fusão mais comuns têm capacidade destrutiva 200 vezes maior do que as bombas de fissão que foram jogadas sobre as cidades de Hiroshima e Nagasaki, no Japão, no fim da Segunda Guerra Mundial.

Uma abordagem mais construtiva da fusão nuclear – que consegue a liberação controlada da energia nuclear – envolve o aquecimento de um plasma, ou gás ionizado, pela passagem de uma corrente elétrica. Fortes campos magnéticos evitam que os íons de alta velocidade do plasma atinjam as paredes do reator. Este método de obtenção de fusão é objeto de intensa pesquisa e está começando a mostrar resultados (Fig. 17.27).

A fusão nuclear utiliza a energia liberada pela fusão de núcleos leves para formar núcleos mais pesados.

FIGURA 17.27 A pesquisa em fusão nuclear controlada está sendo desenvolvida em diversos países. Vemos aqui o reator Tokomak experimental de fusão do Princeton Plasma Physics Laboratory.



17.12 Química da energia nuclear

A Química é a chave para o uso seguro da energia nuclear. Ela é usada na preparação do combustível, na recuperação de importantes produtos de fissão e na remoção segura ou na utilização dos resíduos nucleares.

O urânio é o combustível dos reatores nucleares. Seu mineral mais importante é a *pechblenda*, UO_2 (Fig. 17.28), obtida, em parte, de minas no Novo México e em Wyoming, Estados Unidos. O urânio é refinado para reduzir o minério a metal, e enriquecê-lo, isto é, aumentar a abundância de um isótopo específico – neste caso, o 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%.

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 (velocidade de efusão $\propto 1/(\text{massa molar})^{1/2}$; Seção 4.9), as velocidades de efusão do $^{235}\text{UF}_6$ (massa molar, $349,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$) e $^{238}\text{UF}_6$ (massa molar, $352,1 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$) devem estar na razão

$$\frac{\text{Razão de efusão de } ^{235}\text{UF}_6}{\text{Razão de efusão } ^{238}\text{UF}_6} = \sqrt{\frac{352,1}{349,0}} = 1,004$$

Como a relação é tão próxima de 1, 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 (Fig. 17.29). Os



FIGURA 17.28 A peachblenda é um minério comum de urânio. É uma variedade de uraninita, UO_2 .



FIGURA 17.29 Recipientes com altos níveis de resíduos, inclusive céσιο-137 e estrôncio-90, brilham sob uma camada protetora de água. Se os recipientes não estivessem protegidos, a radiação que eles emitiriam seria grande o bastante para provocar a morte em cerca de 4 s.



FIGURA 17.30 Este tambor com resíduos radioativos, de 35 anos de idade, sofreu corrosão e o material radioativo vazou para o solo. O tambor estava armazenado em um dos depósitos de resíduos nucleares do laboratório de manufatura e pesquisa nucleares do Departamento Americano de Energia, em Hanford, Washington, Estados Unidos. Diversos depósitos desse laboratório foram seriamente contaminados e tiveram de ser limpos e reconfigurados para maior estabilidade.

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 se corroer e liberar resíduos radioativos líquidos que podem atingir fontes de água potável (Fig. 17.30). O vazamento pode ser reduzido pela incorporação dos produtos de HRF em um vidro – um sólido formado por uma rede complexa de átomos de silício e de oxigênio. Os produtos de fissão são, geralmente, óxidos do tipo que formam um dos componentes do vidro – eles formam retículos (veja a Seção 6.10), isto é, eles 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 (Seção 6.11). 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.

CONHECIMENTOS QUE VOCÊ DEVE DOMINAR

- 1 Escrever, completar e balancear as equações nucleares (Exemplos 17.1 e 17.2).
- 2 Usar a banda de estabilidade para prever os tipos de decaimento mais prováveis de um determinado núcleo radioativo (Teste 17.3).
- 3 Distinguir as radiações α , β e γ por sua resposta a um campo elétrico, seu poder de penetração e sua eficiência biológica relativa (Seções 17.1 e 17.6).
- 4 Predizer a quantidade de amostra radioativa restante após um certo período de tempo, levando em conta a constante de decaimento ou meia-vida da amostra (Exemplo 17.3).
- 5 Usar a meia-vida de um isótopo para determinar a idade de um objeto (Exemplo 17.4).
- 6 Calcular a energia de ligação nuclear de um dado nuclídeo (Exemplo 17.5).
- 7 Calcular a energia liberada durante uma reação nuclear (Exemplo 17.6).
- 8 Estabelecer a diferença entre fissão nuclear e fusão nuclear e prever que nuclídeos sofrerão cada tipo de processo (Seções 17.10 e 17.11).
- 9 Descrever alguns modos de armazenamento dos resíduos radioativos (Seção 17.12).

EXERCÍCIOS

Lembre-se de que o símbolo SI para 1 ano é 1a e que ele aceita os prefixos numéricos habituais, como em 1 ka = 10³ a e 1 Ga = 10⁹ a.

Os exercícios marcados com  exigem cálculo avançado.

Decaimento radioativo

17.1 Quando os núcleons se rearranjam nos seguintes núcleos-filhos, a energia varia na quantidade dada e é emitido um raio γ . Determine a frequência e o comprimento de onda do raio γ em cada caso: (a) cobalto-60, 1,33 MeV; (b) arsênio-80, 1,64 MeV; (c) ferro-59, 1,10 MeV. (1 MeV = 1,602 \times 10⁻¹³ J).

17.2 Determine a frequência e o comprimento de onda do raio γ emitido no decaimento dos seguintes núclídeos: (a) ferro-53, 3,04 MeV; (b) vanádio-52, 1,43 MeV; (c) escândio-44, 0,27 MeV; (1 MeV = 1,602 \times 10⁻¹³ J).

17.3 Isótonos são núclídeos que têm o mesmo número de nêutrons. Que isótopos do argônio e do cálcio são isótonos do potássio-40?

17.4 Que isótopos do kriptônio e do selênio são isótonos (veja o Exercício 17.3) do bromo-80?

17.5 Escreva a equação nuclear balanceada de cada um dos decaimentos seguintes: (a) decaimento β^- do trício; (b) decaimento β^+ do ítrio-83; (c) decaimento β^- do criptônio-87; (d) decaimento α do protactínio-225.

17.6 Escreva a equação nuclear balanceada de cada um dos decaimentos seguintes: (a) decaimento α do califórnio-250; (b) decaimento de pósitron do rubídio-76; (c) captura de um elétron pelo arsênio-73; (d) decaimento β^- do crômio-56.

17.7 Escreva a equação nuclear balanceada de cada um dos decaimentos seguintes: (a) decaimento β^+ do boro-8; (b) decaimento β^- do níquel-63; (c) decaimento α do ouro-185; (d) captura de um elétron pelo berílio-7.

17.8 Escreva a equação nuclear balanceada de cada um dos decaimentos seguintes: (a) decaimento β^- do urânio-233; (b) emissão de um próton do cobalto-56; (c) decaimento β^+ do hólmio-158; (d) decaimento α do polônio-212.

17.9 Diga que partícula foi emitida e escreva a equação nuclear balanceada de cada uma das seguintes transformações nucleares: (a) sódio-24 a magnésio-24; (b) ¹²⁸Sn a ¹²⁸Sb; (c) lantânio-140 a bário-140; (d) ²²⁸Th a ²²⁴Ra.

17.10 Diga que partícula foi emitida e escreva a equação nuclear balanceada de cada uma das seguintes transformações nucleares: (a) gadolínio-148 a samário-144; (b) flúor-17 a oxigênio-17; (c) prata-112 a cádmio-112; (d) plutônio-238 a urânio-234.

17.11 Complete as seguintes equações de reações nucleares:

- (a) ¹¹B + ? \rightarrow 2 n + ¹³N
 (b) ? + D \rightarrow n + ³⁶Ar
 (c) ⁹⁶Mo + D \rightarrow ? + ⁹⁷Tc
 (d) ⁴⁵Sc + n \rightarrow α + ?

17.12 Complete as seguintes equações de reações nucleares:

- (a) ¹²O \rightarrow 2 p + ?
 (b) ¹⁷C \rightarrow ? + n + β^-
 (c) ¹⁴⁸Ba \rightarrow ¹⁴⁷La + ? + n
 (d) ¹⁸Ne \rightarrow β^+ + ?

Padrão de estabilidade nuclear

17.13 Os seguintes núclídeos estão fora da banda de estabilidade. Diga o tipo de decaimento preferencial de cada um deles, decaimen-

to β^- , decaimento β^+ ou decaimento α , e identifique o núcleo-filho: (a) cobre-68; (b) cádmio-103; (c) berquélio-243; (d) dúbnio-260.

17.14 Os seguintes núclídeos estão fora da banda de estabilidade. Diga o tipo de decaimento preferencial de cada um deles, decaimento β^- , decaimento β^+ ou decaimento α , e identifique o núcleo-filho: (a) cobre-60; (b) xenônio-140; (c) amerício-246; (d) netúnio-240.

17.15 Identifique os núclídeos-filhos em cada etapa do decaimento radioativo do urânio-235, se a série de emissões de partículas é $\alpha, \beta, \alpha, \beta, \alpha, \alpha, \beta, \alpha, \beta, \alpha$. Escreva a reação nuclear balanceada de cada etapa.

17.16 O netúnio-237 sofre a seguinte sequência de decaimentos radioativos: $\alpha, \beta, \alpha, \alpha, \beta, \alpha, \beta, \alpha$. Escreva a equação nuclear balanceada de cada etapa.

Nucleossíntese

17.17 Complete as seguintes equações nucleares:

- (a) ¹⁴N + ? \rightarrow ¹⁷O + ¹p
 (b) ? + ¹0 n \rightarrow ²⁴⁹Bk + ⁰-1 e
 (c) ²⁴¹Am + ¹0 n \rightarrow ²⁴⁴Cm + ? + γ
 (d) ¹³C + ¹0 n \rightarrow ? + γ

17.18 Complete as seguintes equações nucleares:

- (a) ? + ¹1 p \rightarrow ²¹Na + γ
 (b) ¹1 H + ¹1 p \rightarrow ²1 H + ?
 (c) ¹⁵N + ¹1 p \rightarrow ¹²C + ?
 (d) ²⁰Ne + ? \rightarrow ²⁴Mg + γ

17.19 Complete as seguintes equações de transmutações nucleares:

- (a) ²⁰Ne + ⁴2 α \rightarrow ? + ¹⁶O
 (b) ²⁰Ne + ²⁰Ne \rightarrow ¹⁶O + ?
 (c) ⁴⁴Ca + ? \rightarrow γ + ⁴⁸Ti
 (d) ²⁷Al + ²1 H \rightarrow ? + ²⁸Al

17.20 Complete as seguintes equações de transmutações nucleares:

- (a) ? + γ \rightarrow ⁰-1 e + ²⁰Ne
 (b) ⁴⁴Ti + ⁰-1 e \rightarrow ⁰+1 e + ?
 (c) ²⁴¹Am + ? \rightarrow 4 ¹0 n + ²⁴⁸Fm
 (d) ? + ¹0 n \rightarrow ⁰-1 e + ²⁴⁴Cm

17.21 Uma explicação para a existência de elementos mais pesados do que o ferro é o processo rápido de captura de nêutrons (processo r). No processo r (de ocorrência proposta nas supernovas, muitos nêutrons de alta velocidade colidem com um núcleo de ferro. Alguns desses nêutrons são rapidamente capturados, resultando em um núcleo muito instável que decai imediatamente. Em cada etapa de decaimento um nêutron se converte em um próton. Escreva a equação nuclear total da absorção de seis nêutrons por um núcleo de ⁵⁶Fe e o subsequente decaimento a seis prótons.

17.22 Tem-se afirmado que o neônio presente em meteoritos foi gerado por reações nucleares. Uma dessas reações ocorre quando um átomo de silício-28 é bombardeado por prótons de raios cósmicos. Quando um desses prótons de alta energia é absorvido, forma-se um isótopo do neônio, três prótons, um nêutron e uma partícula α . Identifique o isótopo do neônio que se forma e escreva a equação nuclear do processo.

17.23 Escreva uma equação nuclear para cada um dos seguintes processos: (a) oxigênio-17 produzido pelo bombardeamento de