$$\left(\begin{array}{c}\text{massa específica,}\\ \text{kg/m}^3\end{array}\right) = \left(\begin{array}{c}\text{concentração,}\\ \text{m}^{-3}\end{array}\right)\left(\begin{array}{c}\text{massa,}\\ \text{kg}\end{array}\right). \quad (43\text{-}17)$$

Seja n o número total de partículas por unidade de volume na esfera comprimida. Nesse caso o número de átomos de deutério por unidade de volume é $n/2$, e o número de átomos de trítio por unidade de volume é também $n/2$.

Cálculos: Podemos aplicar a Eq. 43-17 a um sistema formado por dois tipos de partículas escrevendo a massa específica d^* da esfera comprimida como a soma das massas específicas individuais:

$$d^* = \frac{n}{2}m_d + \frac{n}{2}m_t, \quad (43\text{-}18)$$

onde m_d e m_t são as massas de um átomo de deutério e de um átomo de trítio, respectivamente. Podemos substituir essas massas pelas massas molares usando as relações

$$m_d = \frac{M_d}{N_A} \quad \text{e} \quad m_t = \frac{M_t}{N_A},$$

onde N_A é o número de Avogadro. Fazendo essas substituições e levando em conta que $d^* = 1000d$, podemos explicitar n na Eq. 43-18 para obter

$$n = \frac{2000dN_A}{M_d + M_t},$$

o que nos dá

$$n = \frac{(2000)(200\ \text{kg/m}^3)(6{,}02 \times 10^{23}\ \text{mol}^{-1})}{2{,}0 \times 10^{-3}\ \text{kg/mol} + 3{,}0 \times 10^{-3}\ \text{kg/mol}}$$
$$= 4{,}8 \times 10^{31}\ \text{m}^{-3}. \quad \text{(Resposta)}$$

(b) De acordo com o critério de Lawson, quanto tempo essa massa específica deve ser mantida para que a produção de energia seja igual ao consumo?

IDÉIA CHAVE Para que haja uma situação de *breakeven* a massa específica deve ser mantida por um período de tempo τ dado pela Eq. 43-16 (*ar* $> 10^{20}$ s/m^3).

Cálculos: Temos:

$$\tau > \frac{10^{20}\ \text{s/m}^3}{4{,}8 \times 10^{31}\ \text{m}^{-3}} = 10^{-11}\ \text{s}. \quad \text{(Resposta)}$$

(A temperatura do plasma também deve ser suficiente.)

REVISÃO E RESUMO

Energia Nuclear Os processos nucleares são um milhão de vezes mais efetivos (por unidade de massa) que os processos químicos na transformação da massa em outras formas de energia.

Fissão Nuclear A Eq. 43-1 representa a **fissão** do ^{235}U quando o ^{235}U captura um nêutron térmico. As Eqs. 43-2 e 43-3 mostram as cadeias de decaimento de produtos da fissão. A energia liberada em um evento de fissão é da ordem de 200 MeV.

A fissão pode ser explicada pelo modelo coletivo, que se baseia em uma analogia entre o núcleo e uma gota de líquido carregada eletricamente e dotada de uma certa energia de excitação. Para que a fissão ocorra os fragmentos devem vencer uma barreira de potencial; por isso é preciso que a energia de excitação E_n seja da mesma ordem que a altura da barreira E_b.

Os nêutrons liberados durante a fissão tornam possível uma **reação em cadeia**. A Fig. 43-4 mostra o equilíbrio de nêutrons em um reator nuclear típico; a Fig. 43-5, o diagrama esquemático de um reator nuclear.

Fusão Nuclear A **fusão** de dois núcleos leves (um processo que libera energia) é inibida pela barreira de Coulomb. A fusão de átomos em grande escala só acontece se a temperatura for suficiente para que os núcleos vençam a barreira por tunelamento.

A principal fonte de energia do Sol é a queima termonuclear de hidrogênio para formar hélio no **ciclo próton-próton** representado na Fig. 43-10. Os elementos até $A = 56$ (o pico da curva de energia de ligação) podem ser produzidos por outros processos de fusão depois que o suprimento de hidrogênio de uma estrela se esgota.

Fusão Controlada A **fusão termonuclear controlada** pode vir a ser uma importante fonte de energia no futuro. As reações d-d e d-t são as mais promissoras. Um reator de fusão baseado da reação d-t deve satisfazer o **critério de Lawson**

$$n\tau > 10^{20}\ \text{s/m}^3, \quad (43\text{-}16)$$

além de manter o plasma a uma temperatura suficiente.

Nos **tokamaks** o plasma é confinado por campos magnéticos; na **fusão a *laser*** utiliza-se o confinamento inercial.

PERGUNTAS

1 Na reação de fissão

$$^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow \text{X} + \text{Y} + 2\text{n},$$

coloque os nucleídeos a seguir, que podem tomar o lugar de X (ou de Y) em ordem de probabilidade, começando pelo mais provável: ^{152}Nd, ^{141}I, ^{128}In, ^{115}Pd, ^{105}Mo. (*Sugestão:* Veja a Fig. 43-1.)

2 Para obter elementos muito pesados, que não existem na natureza, os pesquisadores provocam colisões de núcleos de porte médio com núcleos pesados. Em algumas dessas colisões os núcleos se fundem para formar um dos elementos muito pesados. Nesse tipo de evento, a massa do produto é maior ou menor que a massa dos núcleos envolvidos na colisão?

3 Quando um núcleo se divide em dois núcleos menores, com liberação de energia, a energia de ligação média por núcleo aumenta ou diminui?

4 Se um processo de fusão envolve a absorção de energia, a energia média de ligação por núcleon aumenta ou diminui?

5 No processo de fissão

$$^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow {}^{132}\text{Sn} + \boxed{}\text{I} + 3\text{n},$$

quais são os números que devem aparecer (a) no quadrado da cima (o índice superior) e (b) no quadrado de baixo (o valor de Z)?

6 fragmentos iniciais da fissão têm mais prótons que nêutrons, mais nêutrons que prótons ou aproximadamente o mesmo número de prótons e nêutrons?

7 Suponha que um núcleo de ^{238}U absorve um nêutron e decai, não por fissão, mas por emissão beta menos, emitindo um elétron e um neutrino. Qual é o nucleídeo resultante: ^{239}Pu, ^{239}Np, ^{238}Np ou ^{239}Pa?

8 Escolha nos pares a seguir o nucleídeo mais provável como fragmento inicial de um evento de fissão: (a) ^{98}Sr ou ^{88}Ru; (b) ^{140}Csδ ou ^{99}Tc; (c) ^{160}Nd ou ^{135}La. (*Sugestão:* Veja a Fig. 42-4.)

9 Um reator nuclear está operando em um certo nível de potência, com o fator de multiplicação k ajustado para 1. Se as barras de controle são usadas para reduzir a potência do reator a 25% do valor inicial, o novo fator de multiplicação é ligeiramente menor que 1, muito menor que 1 ou continua igual a 1?

10 Quais dos seguintes elementos não são produzidos por fusões termonucleares no interior das estrelas: carbono, silício, cromo, bromo?

11 O critério de Lawson para a reação d-t (Eq. 43-16) é $n\tau >$ 10^{20} s/m^3. Para a reação d-d, o número do lado direito da desigualdade deve ser igual, menor ou maior?

12 Cerca de 2% da energia gerada no centro do Sol pela reação p-p são transportados para fora do Sol por neutrinos. A energia associada a esse fluxo de neutrinos é igual, maior ou menor que a energia irradiada da superfície solar na forma de ondas eletromagnéticas?

PROBLEMAS

* – *** O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física*, de Jearl Walker, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

seção 43-3 Um Modelo para a Fissão Nuclear

*1 Calcule a energia de desintegração Q para a fissão do ^{52}Cr em dois fragmentos iguais. As massas envolvidas são 51,940 51 u (^{52}Cr) e 25,982 59 u (^{26}Mg).

*2 As propriedades de fissão do isótopo do plutônio ^{239}Pu são muito semelhantes às do ^{235}U. A energia média liberada por fissão é 180 MeV. Qual seria a energia liberada, em MeV, se todos os átomos contidos em 1,00 kg de ^{239}Pu puro sofressem fissão?

*3 Qual deve ser o número de núcleos por segundo de ^{235}U fissionados por nêutrons para que seja produzida uma potência de 1,0 W? Suponha que $Q = 200$ MeV.

*4 (a)–(d) Complete a tabela a seguir, que se refere à reação de fissão genérica ^{235}U + n → X + Y + bn.

X	Y	b
^{140}Xe	(a)	1
^{139}U	(b)	2
(c)	^{106}Zr	2
^{144}Cs	^{90}Rb	(d)

*5 (a) Quantos átomos existem em 1,0 kg de ^{235}U puro? (b) Qual seria a energia, em joules, liberada pela fissão completa de 1,0 kg de ^{235}U? Suponha que $Q = 200$ MeV. (c) Durante quanto tempo essa energia manteria acesa uma lâmpada de 100 W?

*6 Calcule a energia liberada na reação de fissão

$$^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow {}^{144}\text{Cs} + {}^{90}\text{Rb} + 2\text{n}.$$

As massas envolvidas são

^{235}U	235,043 92 u	^{90}Rb	92,921 57 u
^{144}Cs	140,919 63 u	n	1,008 66 u

*7 O ^{232}U decai por emissão alfa com uma meia-vida de 7,0 × 10^1 anos. Também decai (raramente) por fissão espontânea; se o decaimento alfa não acontecesse a meia-vida desse nucleídeo devido exclusivamente à fissão espontânea seria 3,0 × 10^{17} anos. (a) Qual é o número de fissões espontâneas por segundo em 1,0 g de ^{232}U? (b) Quantos eventos de decaimento alfa do ^{232}U acontecem para cada evento de fissão espontânea?

*8 Uma energia de 4,2 MeV é necessária para fissionar o ^{238}Np. Para remover um nêutron desse nucleídeo é necessária uma energia de 5,0 MeV. O ^{237}Np pode ser fissionado por nêutrons térmicos?

*9 Um nêutron térmico (com energia cinética aproximadamente nula) é absorvido por um núcleo de ^{238}U. Qual é a energia transformada de energia de repouso em oscilação do núcleo? As massas envolvidas são:

^{237}U	237,048 723 u	^{238}U	238,050 782 u
^{238}U	239,054 287 u	^{240}U	240,056 585 u
n	1,008 664 u		

*10 (a) Calcule a energia de desintegração Q para a fissão do ^{98}Mo em dois fragmentos iguais. As massas envolvidas são 97,905 41 u (^{98}Mo) e 48,950 02 u (^{49}Sc). (b) Se Q for positiva, explique por que o processo não ocorre espontaneamente.

*11 Durante a Guerra Fria, o primeiro-ministro da União Soviética ameaçou os Estados Unidos com ogivas nucleares de 2,0 megatons de ^{239}Pu. (Cada uma teria o poder explosivo equivalente a 2,0 megatons de TNT; um megaton de TNT libera uma energia de 2,6 × 10^{28} MeV.) Se a fissão ocorre em 8% dos átomos de plutônio, qual é a massa total de plutônio presente em uma dessas ogivas?

**12 Um núcleo de ^{236}U sofre fissão e se parte em dois fragmentos de massa média, ^{108}Xe e ^{92}Sr. (a) Qual é diferença percentual entre a área da superfície dos produtos de fissão e a área da superfície do núcleo original? (b) Qual é a diferença percentual

**44 Em certas estrelas o *ciclo do carbono* é mais provável que o ciclo próton–próton como forma de gerar energia. Esse ciclo é o seguinte:

$$^{12}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma, \qquad Q_1 = 1{,}95\ \text{MeV},$$
$$^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu, \qquad Q_2 = 1{,}19,$$
$$^{13}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma, \qquad Q_3 = 7{,}55,$$
$$^{14}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma, \qquad Q_4 = 7{,}30,$$
$$^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu, \qquad Q_5 = 1{,}73,$$
$$^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}, \qquad Q_6 = 4{,}97.$$

(a) Mostre que esse ciclo de reações é equivalente, quando considerado como um todo, ao ciclo próton–próton da Fig. 43-10. (b) Mostre que os dois ciclos (como não poderia deixar de ser) têm o mesmo valor de Q.

**45 Uma estrela converte todo o hidrogênio em hélio, passando a ser composta por 100% de hélio. Em seguida converte o hélio em carbono através do processo triplo alfa,

$$^4\text{He} + {}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + 7{,}27\ \text{MeV}.$$

A massa da estrela é 4,6 × 10^{32} kg, e ela gera energia à taxa de 5,3 × 10^{30} W. Quanto tempo leva para converter todo o hélio em carbono?

**46 Suponha que a parte central do Sol contém um núcleo da massa total e ocupa uma esfera de raio igual a um quarto do raio solar. Suponha ainda que essa parte central é composta de 35% de hidrogênio (em massa) e que toda a energia do Sol é produzida nessa região. Se o Sol continuasse a queimar hidrogênio à taxa calculada no Exemplo 43-5 quando tempo seria necessário para que todo o hidrogênio fosse consumido? A massa do Sol é 2,0 × 10^{30} kg.

**47 A Fig. 43-15 mostra um modelo primitivo de bomba de hidrogênio. O combustível para a fusão é o deutério, ^{2}H. Uma esfera feita do material é envolvida por uma casca de ^{235}U ou ^{239}Pu, cuja fissão explosiva aquece e comprime o deutério, fazendo com que atinja as altas temperaturas e massas específicas necessárias para que haja uma reação de fusão auto-sustentável. A reação de fusão é a seguinte:

$$5\ ^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + 2\text{n}.$$

(a) Calcule o valor de Q para a reação de fusão. As massas atômicas envolvidas aparecem no Problema 40. (b) Calcule o poder explosivo da parte de fusão da bomba em megatons (veja o Problema 14) se ela contiver 500 kg de deutério e 30,0% do material sofrer fusão.

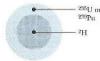

FIG. 43-15 Problema 47.

seção 43-8 A Fusão Nuclear Controlada

*48 Mostre que os valores de Q dados nas Eqs. 43-13, 43-14 e 43-15 estão corretos. As massas envolvidas são:

^{1}H	1,007 825 u	^{4}He	4,002 603 u
^{2}H	2,014 102 u	n	1,008 665 u
^{3}H	3,016 049 u		

**49 A água comum contém aproximadamente 0,0150% em massa de "água pesada", na qual um dos dois átomos de hidrogênio é substituído por um átomo de deutério, ^{2}H. Qual seria a potência gerada pela "queima" de todo o deutério contido em 1,00 litro de água em 1,00 dia se fosse possível fazer os átomos de deutério se fundirem através da reação ^{2}H + ^{2}H → ^{3}He + n?

Problemas Adicionais

50 Na reação de fusão deuteron-trítion da Eq. 43-15, qual é a energia cinética (a) da partícula alfa e (b) do nêutron? Despreze a energia cinética das duas partículas do lado esquerdo da equação em presença das outras energias envolvidas.

51 No centro do Sol a massa específica é 1,5 × 10^5 kg/m^3 e a composição é 35% de hidrogênio e 65% de hélio (em massa). (a) Qual é o número de prótons por unidade de volume no centro do Sol? (b) Qual é a razão entre esse número e o número de moléculas por unidade de volume em um gás ideal nas condições normais de temperatura (0°C) e pressão (1,01 × 10^5 Pa)?

52 O Q efetivo para o ciclo próton-próton da Fig. 43-10 é 26,2 MeV. (a) Expresse esse valor de Q em termos de energia por quilograma de hidrogênio consumido. (b) A potência do Sol é 3,9 × 10^{26} W. Se essa energia é produzida inteiramente através do ciclo próton-próton, a que taxa o Sol está perdendo hidrogênio? (c) A que taxa o Sol está perdendo massa? (d) Explique a diferença entre os resultados dos itens (b) e (c). (e) A massa do Sol é 2,0 × 10^{30} kg. Se o Sol continuar perdendo massa à taxa calculada no item (c), quanto tempo levará para perder 0,10% da massa total?

53 Muitas pessoas temem que ajudar as nações emergentes a desenvolver a tecnologia dos reatores nucleares pode aumentar a probabilidade de uma guerra nuclear, já que os reatores podem ser usados não só para produzir energia elétrica mas também, através da captura de nêutrons pelo ^{238}U, produzir ^{239}Pu, um material que pode ser usado para fazer bombas. Que série de reações envolvendo captura de nêutrons e decaimentos beta, leva à formação desse isótopo de plutônio?

54 A expressão da distribuição de velocidades de Maxwell das moléculas de um gás é dada no Capítulo 19. (a) Mostre que a *energia mais provável* é dada por

$$K_p = \tfrac{1}{2}kT.$$

Verifique esse resultado para a curva $n(K)$ da Fig. 43-8, que foi traçada para $T = 1{,}5 \times 10^7$ K. (b) Mostre que a *velocidade mais provável* é dada por

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

Calcule o valor de v_p para o caso de prótons a uma temperatura $T = 1{,}5 \times 10^7$ K. (c) Mostre que a *energia correspondente à velocidade mais provável* (que não é a mesma coisa que a energia mais provável) é dada por

$$K_{vp} = kT.$$

Assinale esse ponto na curva de $n(K)$ da Fig. 43-9.

55 Verifique que, como é dito na Seção 43-2, os nêutrons em equilíbrio com o meio à temperatura ambiente, 300 K, têm uma energia cinética de aproximadamente 0,04 eV.

56 Mostre que, como informa a Tabela 43-1, as fissões do ^{235}U contido em 1,0 kg de UO_2 (enriquecido de tal forma que o ^{235}U constitui 3% do urânio total) poderiam manter acesa uma lâmpada de 100 W durante 690 anos.

do volume? (c) Qual é a diferença percentual da energia potencial elétrica? A energia potencial elétrica de uma esfera uniformemente carregada de raio r e carga Q é dada por

$$U = \frac{3}{5}\left(\frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\right).$$

**13 Em um certo evento no qual o ^{235}U é fissionado por um nêutron térmico nenhum nêutron é emitido e um dos fragmentos primários da fissão é o ^{86}Ge. Qual é o outro fragmento? (b) A energia de desintegração é $Q = 170$ MeV. Que parte dessa energia vai (b) para o ^{86}Ge e (c) para o outro fragmento? Calcule a velocidade, logo após a fissão, (d) do ^{86}Ge; (e) do outro fragmento.

**14 Em uma bomba atômica a liberação de energia se deve à fissão não controlada do ^{239}Pu (ou ^{235}U). O poder explosivo da bomba é expresso em termos da massa de TNT necessária para produzir a mesma liberação de energia. A explosão de um megaton (10^6 toneladas) de TNT libera uma energia de 2,6 × 10^{28} MeV. (a) Calcule o poder explosivo em megatons de uma bomba atômica contendo 95 kg de ^{239}Pu, dos quais 7,5 kg realmente sofrem fissão. (Veja o Problema 7.) (b) Por que os outros 92,5 kg de ^{239}Pu são necessários se não sofrem fissão?

**15 Uma bomba atômica de 66 quilotons é feita de ^{235}U puro (Fig. 43-14), sendo que apenas 4,0% do material sofrem fissão. (a) Qual é a massa de urânio na bomba? (Não é 66 quilotons; esta é a energia produzida pela bomba expressa em termos da massa de TNT necessária para produzir a mesma energia). (b) Quantos fragmentos primários de fissão são produzidos? (c) Quantos nêutrons são gerados nas fissões e liberados no ambiente? (Em média, cada fissão produz 2,5 nêutrons.)

FIG. 43-14 Problema 15. Um "botão" de ^{235}U, pronto para ser refundido, usinado e incorporado a uma ogiva nuclear. (*Cortesia de Martin Marietta Energy Systems/U.S. Department of Energy*)

**16 Considere a fissão do ^{238}U por nêutrons rápidos. Em um dessa eventos de fissão nenhum nêutron foi emitido e os produtos finais estáveis, depois do decaimento beta dos produtos primários da fissão, foram o ^{140}Ce e o ^{98}Ru. (a) Quantos eventos de decaimento beta ocorreram no total, considerando os dois fragmentos? (b) Calcule o valor de Q para esse processo de fissão. As massas envolvidas são

^{238}U	238,050 79 u	^{140}Ce	139,905 43 u
n	1,008 66 u	^{98}Ru	98,905 94 u

**17 Suponha que imediatamente após a fissão do ^{236}U segundo a reação da Eq. 43-1 os núcleos de ^{140}Xe e ^{94}Sr estejam tão próximos que as superfícies dos dois núcleos se tocam. (a) Supondo que os núcleos são esféricos, calcule a energia potencial elétrica (em MeV) associada à repulsão mútua dos fragmentos. (*Sugestão:* Use a Eq. 43-3 para calcular os raios dos fragmentos). (b) Compare essa energia com a energia liberada em um evento de fissão típico.

seção 43-4 O Reator Nuclear

*18 Um reator de fissão de 200 MW consumiu metade do combustível em 3,00 anos. Qual era a quantidade inicial de ^{235}U? Suponha que toda a energia foi produzida a partir da fissão de ^{235}U e que este nucleídeo foi consumido apenas pelo processo de fissão.

**19 A energia térmica gerada quando as emissões de radionucleídeos são absorvidas pela matéria serve de base para a construção de pequenas fontes de energia usadas em satélites, sondas espaciais e estações meteorológicas situadas em locais de difícil acesso. Esses radionucleídeos são produzidos em grande quantidade nos reatores nucleares e podem ser separados quimicamente dos outros rejeitos da fissão. Um dos radionucleídeos mais usados para esse fim é o ^{90}Sr ($T_{1/2} = 87{,}7$ anos), que é um emissor alfa com $Q = 5{,}50$ MeV. Qual é a potência produzida por 1,00 kg desse material?

**20 (Veja o Problema 19). Entre os muitos produtos de fissão que podem ser extraídos quimicamente do combustível irradiado está o ^{90}Sr ($T_{1/2} = 29$ anos). A radioatividade desse isótopo, que é produzido em reatores de grande porte à taxa de cerca de 18 kg/ano, é capaz de produzir uma potência térmica de 0,93 W/g. (a) Calcule a energia de desintegração efetiva Q_A associada ao decaimento de um núcleo de ^{90}Sr. (O valor de Q_A inclui as contribuições de todos os produtos da cadeia de decaimento do ^{90}Sr com exceção dos neutrinos, cuja energia é totalmente perdida.) (b) Deseja-se construir uma fonte de alimentação capaz de gerar 150 W de eletricidade para uso em um transmissor submarino de sonar usado para guiar embarcações. Se a fonte utiliza a energia térmica gerada pelo ^{90}Sr e se a eficiência da conversão termelétrica é 5,0%, qual a quantidade necessária de ^{90}Sr?

**21 O tempo de geração de nêutrons t_{ger} de um reator é o tempo médio necessário para que um nêutron rápido emitido em uma fissão seja termalizado e, portanto, possa produzir outra fissão. Suponha que a potência de um reator no instante $t = 0$ é P_0. Mostre que a potência do reator em um instante $t > 0$ é dada por $P(t) = P_0k^{t/t_{ger}}$, onde k é o fator de multiplicação. Para $k = 1$ a potência se mantém constante, independentemente do valor de t_{ger}.

**22 Um reator está operando a 400 MW com um tempo de geração de nêutrons (veja o Problema 21) de 30,0 ms. Se a potência aumenta durante 5,00 min com um fator de multiplicação de 1,0003, qual é a potência no final desse intervalo?

**23 (a) Um nêutron de massa m_n e energia cinética K sofre uma colisão elástica frontal com um átomo estacionário de massa m. Mostre que a fração de energia cinética perdida pelo nêutron é dada por

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{4m_n m}{(m + m_n)^2}.$$

Determine o valor de $\Delta K/K$ para os seguintes alvos estacionários: (b) hidrogênio, (c) deutério, (d) carbono e (e) chumbo. (f) Se inicialmente $K = 1{,}00$ MeV, quantas colisões desse tipo são necessárias para que a energia cinética do nêutron seja reduzida ao valor

térmico (0,025 eV) se o alvo é o deutério, um átomo frequentemente usado como moderador? (Na prática, a eficiência dos moderadores é menor que neste modelo porque a maioria das colisões não é do tipo frontal.)

**24 O tempo de geração de nêutrons t_{ger} (veja o Problema 21) em um certo reator é 1,0 ms. Se o reator está operando com uma potência de 500 MW, quantos nêutrons livres estão presentes no reator em um dado instante?

**25 O tempo de geração de nêutrons (veja o Problema 21) de um certo reator é 1,3 ms. O reator está operando com uma potência de 1200 MW. Para que sejam realizados certos testes de rotina a potência do reator deve ser reduzida temporariamente para 350,00 MW. Deseja-se que a transição para o novo regime leve 2,6000 s. Para que novo valor (constante) deve ser ajustado o fator de multiplicação para que a transição aconteça da forma prevista?

seção 43-5 Um Reator Nuclear Natural

**26 Há quanto tempo a razão ^{235}U/^{238}U nos depósitos naturais era igual a 0,157?

**27 Calcula-se que o reator natural de fissão discutido na Seção 43-5 tenha gerado 15 gigawatts anos de energia durante o tempo em que funcionou. (a) Se o reator durou 200 000 anos, qual foi a potência média de operação? (b) Quantos quilogramas de ^{235}U foram consumidos pelo reator?

**28 Algumas amostras de urânio retiradas do local onde funcionou o reator natural de fissão discutido na Seção 43-5 estavam levemente *enriquecidas* em ^{235}U, em vez de empobrecidas. Explique essa observação em termos da absorção de um nêutron pelo isótopo mais abundante do urânio, ^{238}U, e decaimento do nucleídeo resultante através de emissões beta e alfa.

**29 O urânio natural hoje contém apenas 0,72% de ^{235}U em mistura com o ^{238}U, uma quantidade insuficiente para fazer funcionar um reator do tipo PWR. Por essa razão o urânio deve ser enriquecido artificialmente em ^{235}U. Tanto o ^{234}U ($T_{1/2} = 7{,}0 \times 10^5$ anos) como o ^{236}U ($T_{1/2} = 4{,}5 \times 10^9$ anos) são radioativos. Há quantos anos o urânio natural poderia ter sido usado diretamente em um reator, com uma razão ^{235}U/^{238}U de 3,0%?

seção 43-6 Fusão Termonuclear: O Processo Básico

*30 Mostre que a fusão de 1,0 kg de deutério através da reação

$$^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \text{n} \qquad (Q = +3{,}27\ \text{MeV})$$

pode manter uma lâmpada de 100 W funcionando durante 2,5 × 10^7 anos.

*31 Calcule a altura da barreira de Coulomb para a colisão frontal de dois dêuterons. Tome o raio efetivo do dêuteron como sendo igual a 2,1 fm.

*32 Na Fig. 43-9 a equação de $n(K)$, a concentração de prótons por unidade de energia, é

$$n(K) = 1{,}13n\frac{K^{1/2}}{(kT)^{3/2}}e^{-K/kT},$$

onde n é a concentração total de prótons (número de prótons por unidade de volume). No centro do Sol a temperatura é 1,50 × 10^7 K e a energia média dos prótons, $K_{méd}$, é 1,94 keV. Calcule a razão entre a concentração de prótons com 5,00 keV e a concentração de prótons com uma energia igual à energia média.

**33 Calcule a altura da barreira de Coulomb para a colisão frontal de dois núcleos de ^{7}Li com a mesma energia cinética K. (*Sugestão:* Use a Eq. 42-3 para calcular o raio dos núcleos.)

*34 Outros métodos, além do aquecimento do material, têm sido propostos para vencer a barreira de Coulomb que impede a fusão nuclear. Um desses métodos seria o uso de dois aceleradores de partículas para acelerar dois feixes de dêuterons e provocar colisões frontais. (a) Que tensão seria necessária para acelerar cada um dos feixes até que os dêuterons tivessem uma energia suficiente para vencer a barreira de Coulomb? (b) Por que, na opinião do leitor, esse método não é usado atualmente?

seção 43-7 A Fusão Termonuclear no Sol e em Outras Estrelas

*35 O Sol tem uma massa de 2,0 × 10^{30} kg e irradia 3,9 × 10^{26} W para o espaço. (a) Qual é a taxa, em kg/s, com a qual o Sol transforma a massa em outras formas de energia? (b) Que fração da massa original o Sol perderia desta forma desde que começou a queimar hidrogênio, há cerca de 4,5 × 10^9 anos?

*36 Vimos que o Q do ciclo de fusão próton-próton é 26,7 MeV. Qual é a relação entre esse número e os valores de Q para as diversas reações que compõem o ciclo, mostradas na Fig. 43-10?

*37 Mostre que a energia liberada quando três partículas alfa se fundem para formar ^{12}C é 7,27 MeV. A massa atômica do ^{4}He é 4,0026 u e a do ^{12}C é 12,0000 u.

*38 Determine o Q do seguinte processo de fusão:

$$^2\text{H}_1 + {}^3\text{H}_1 \rightarrow {}^3\text{He}_2 + \text{fóton}$$

As massas envolvidas são

^{2}H$_1$	2,014 102 u	^{1}H$_1$	1,007 825 u
^{3}He$_2$	3,016 029 u		

*39 Suponha que todos os prótons em um "gás" de prótons possuem uma energia cinética igual a kT, onde k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta. Se $T = 1 \times 10^7$ K, qual é (aproximadamente) a distância mínima entre dois prótons?

*40 Mostre que os três valores de Q dados no texto para as reações da Fig. 43-10 estão corretos. As massas das partículas envolvidas são

^{1}H	1,007 825 u	^{4}He	4,002 603 u
^{2}H	2,014 102 u	e^+	0,000 548 6 u
^{3}He	3,016 029 u		

(*Sugestão:* Tome cuidado para não confundir as massas atômicas com as massas nucleares e para levar em conta corretamente a existência de pósitrons entre os produtos de decaimento.)

**41 (a) Calcule quantos neutrinos por segundo são produzidos no Sol, supondo que toda a energia solar é gerada através do ciclo próton-próton. (b) De acordo com o resultado do item (a), quantos neutrinos solares deveriam chegar à Terra por segundo?

**42 Calcule e compare a energia liberada (a) pela fusão de 1,0 kg de hidrogênio no interior do Sol; (b) pela fissão de 1,0 kg de ^{235}U em um reator nuclear.

**43 A queima do carvão acontece de acordo com a reação C + O_2 → CO_2. O calor de combustão é 3,3 × 10^7 J/kg de carbono atômico consumido. (a) Expresse esse valor em termos da energia produzida por átomo de carbono. (b) Expresse esse valor em termos da energia produzida por quilograma dos reagentes iniciais, carbono e oxigênio. (c) Suponha que o Sol (massa = 2,0 × 10^{30} kg) fosse feito de carbono e oxigênio nas proporções adequadas para a combustão total do carbono; produzindo energia à taxa atual (3,9 × 10^{26} W), quanto tempo o Sol levaria para queimar todo o combustível?