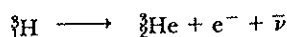


órbitas dos isótopos ^{12}C e ^{13}C quando atravessam o campo. Mostre que a razão dos raios pode ser escrita na forma

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}}$$

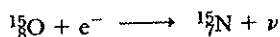
e verifique que os raios que você obteve no item (a) concordam com isto.

- 24 Um núcleo de ^3H realiza um decaimento beta transformando-se em ^3He ao criar um elétron e um antineutrino de acordo com a reação



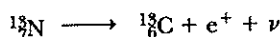
Os símbolos nesta reação referem-se aos núcleos. Escreva a reação referindo-se aos átomos neutros adicionando um elétron dos dois lados. Utilize então a Tabela A.3 para determinar a energia total liberada nesta reação.

- 25 O núcleo ^{15}O desintegra-se por captura de elétron. A reação nuclear é escrita como



(a) Escreva o processo que está ocorrendo para uma única partícula dentro do núcleo. (b) Escreva o processo de desintegração referindo-se a átomos neutros. (c) Determine a energia do neutrino. Despreze o recuo do núcleo-filho.

- 26 (a) Por que o decaimento beta inverso $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ é proibido para um próton livre? (b) Por que a mesma reação é possível se o próton estiver ligado a um núcleo? Por exemplo, ocorre a seguinte reação:



(c) Quanta energia é liberada na reação dada no item (b)? (Dica: Adicione sete elétrons aos dois lados da reação para escrevê-la para átomos neutros. Você pode utilizar as massas $m(e^+) = 0,000\,549\text{ u}$, $M(^{13}\text{C}) = 13,003\,355\text{ u}$, $M(^{13}\text{N}) = 13,005\,739\text{ u}$.)

- 27 Complete com o símbolo do isótopo correto cada quadrado na Figura P30.27, que mostra as seqüências de desintegrações na série radioativa natural começando com o isótopo do urânio 235 de vida longa e terminando com o núcleo estável do chumbo 207.

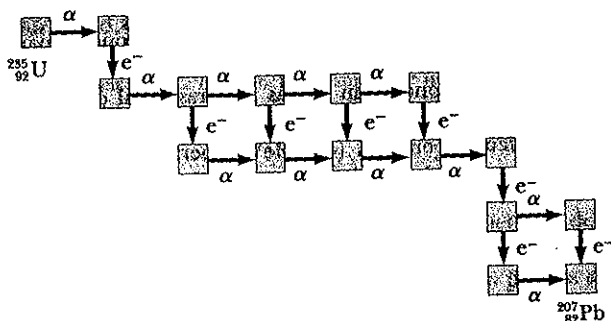
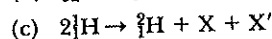
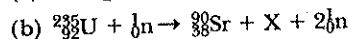
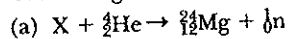


Figura P30.27

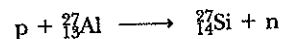
Seção 30.5 Reações Nucleares

- 28 Identifique os núcleos e as partículas X e X' desconhecidas nas seguintes reações nucleares:



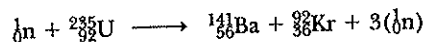
- 29 O ouro natural tem apenas um isótopo, $^{197}_{79}\text{Au}$. Se o ouro natural for irradiado por um fluxo de nêutrons lentos, serão emitidos elétrons. (a) Escreva a equação da reação. (b) Calcule a energia máxima dos elétrons emitidos. A massa do $^{198}_{80}\text{Hg}$ é de $197,966\,743\text{ u}$.

- 30 Um feixe de prótons de $6,61\text{ MeV}$ incide sobre um alvo de $^{27}_{13}\text{Al}$. Os prótons que colidem com o alvo produzem a reação



($^{27}_{14}\text{Si}$ tem massa de $26,986\,721\text{ u}$.) Desprezando qualquer recuo do núcleo produzido, determine a energia cinética dos nêutrons emergentes.

- 31 (a) É típica a seguinte reação de fissão entre as reações que ocorrem em uma usina nuclear:



Encontre a energia liberada. As massas necessárias são:

$$M(^1_0\text{n}) = 1,008\,665\text{ u}$$

$$M(^{235}_{92}\text{U}) = 235,043\,915\text{ u}$$

$$M(^{141}_{56}\text{Ba}) = 140,913\,9\text{ u}$$

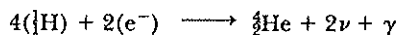
$$M(^{92}_{36}\text{Kr}) = 91,897\,3\text{ u}$$

- (b) Qual fração da massa inicial do sistema é transformada?
- 32 A queima de uma tonelada métrica ($1\,000\text{ kg}$) de carvão pode produzir $3,30 \times 10^{10}\text{ J}$ de energia. A fissão de um núcleo de urânio 235 produz uma energia média de cerca de 208 MeV . Qual massa de urânio produz a mesma energia que uma tonelada de carvão?
- 33 **Problema de Revisão.** Suponha que é usado urânio enriquecido contendo $3,40\%$ do isótopo fissionável $^{235}_{92}\text{U}$ como combustível de um navio. A água exerce uma força de atrito média com módulo de $1,00 \times 10^5\text{ N}$ sobre o navio. Que distância o navio pode percorrer por cada quilograma de combustível? Suponha que a energia liberada por evento de fissão é de 208 MeV e que o motor do navio tem uma eficiência de $20,0\%$.
- 34 De todo o hidrogênio nos oceanos, $0,030\,0\%$ da massa é de deutério. Os oceanos têm um volume de $3,17 \times 10^8\text{ mi}^3$. (a) Se a fusão nuclear fosse controlada e todo o deutério nos oceanos fosse fundido em ^4_2He , quantos joules de energia seriam liberados? (b) O consumo mundial de potência é de cerca de $7,00 \times 10^{12}\text{ W}$. Se o consumo fosse 100 vezes maior, por quantos anos duraria a energia calculada no item (a)?

- 35* Foi estimado que estão disponíveis cerca de 10^9 toneladas de urânio natural com concentrações excedendo 100 partes por milhão, entre as quais 0,7% é do isótopo fissionável ^{235}U . Suponha que toda a utilização de energia mundial (7×10^{12} J/s) fosse fornecida pela fissão do ^{235}U nos reatores nucleares convencionais, liberando 208 MeV em cada reação. Por quanto tempo duraria o estoque? A estimativa do estoque de urânio foi obtida de K. S. Deffeyes e I. D. MacGregor, "World Uranium Resources". *Sci. Am.* 242(1):66, 1980.

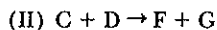
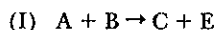
Seção 30.6 Conexão com o Contexto – O Motor das Estrelas

- 36* O Sol irradia energia à taxa de $3,77 \times 10^{26}$ W. Suponha que a reação resultante

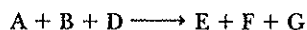


explique toda a energia liberada. Calcule o número de prótons que são fundidos por segundo.

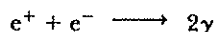
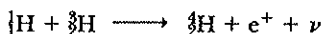
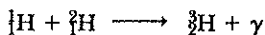
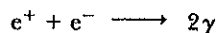
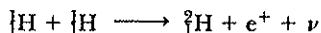
- 37* Considere as duas reações nucleares



(a) Mostre que a energia de desintegração resultante para essas duas reações ($Q_{\text{resultante}} = Q_{\text{I}} + Q_{\text{II}}$) é idêntica à energia de desintegração para a reação resultante

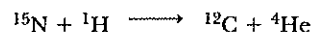
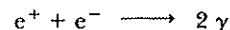
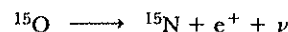
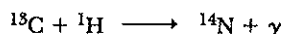
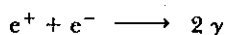
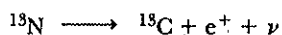
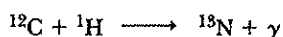


(b) Uma possível cadeia de reações no ciclo próton-próton no núcleo do Sol é dada por



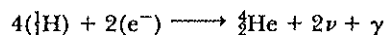
Com base no item (a), qual é o valor de $Q_{\text{resultante}}$ para essa sequência?

- 38* Além do ciclo próton-próton descrito no problema anterior, o ciclo do carbono, proposto pela primeira vez por Hans Bethe em 1939, é um outro ciclo pelo qual a energia é liberada nas estrelas à medida que o hidrogênio é convertido em hélio. O ciclo do carbono necessita de temperaturas mais altas do que o ciclo próton-próton. A série de reações é dada por



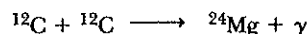
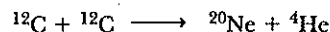
(a) Se o ciclo próton-próton necessita de uma temperatura de $1,5 \times 10^7$ K, estime por proporção a temperatura necessária para o ciclo do carbono. (b) Calcule o valor Q para cada etapa no ciclo do carbono e a energia global liberada. (c) Você acha que a energia levada para fora pelos neutrinos é depositada nas estrelas? Explique.

- 39* Após determinar que o Sol tem existido por centenas de milhões de anos, logo antes da descoberta da física nuclear, os cientistas não podiam explicar por que o Sol tem continuado a queimar por um tempo tão longo. Por exemplo, se fosse um fogo gerado pelo carvão, teria queimado por cerca de 3 000 anos. Suponha que o Sol, cuja massa é de $1,99 \times 10^{30}$ kg, fosse constituído originalmente só de hidrogênio e que sua potência de emissão total seja de $3,77 \times 10^{26}$ W. (a) Se o mecanismo de geração de energia do Sol é a fusão do hidrogênio em hélio por meio da reação resultante



calcule a energia (em joules) liberada por essa reação. (b) Determine por quantos átomos de hidrogênio o Sol é constituído. Considere a massa de um átomo de hidrogênio como sendo de $1,67 \times 10^{-27}$ kg. (c) Supondo que a potência total emitida permanece constante, após quanto tempo todo o hidrogênio terá sido convertido em hélio, causando a morte do Sol? O tempo de vida real projetado do Sol é de aproximadamente 10 bilhões de anos, pois somente o hidrogênio no núcleo relativamente pequeno está disponível como combustível. Apenas no núcleo as temperaturas e densidades são suficientemente altas para que a reação de fusão seja auto-sustentável.

- 40* Detonações de carbono são reações nucleares poderosas que temporariamente estilhaçam os núcleos dentro das estrelas com grandes massas no final das vidas estelares. Essas explosões são produzidas pela fusão do carbono, que necessita de uma temperatura de cerca de 6×10^8 K para superar a forte repulsão de Coulomb entre os núcleos de carbono. (a) Estime a barreira de energia repulsiva para a fusão, usando a temperatura de ignição necessária para a fusão do carbono. (Em outras palavras, qual é a energia cinética média de um núcleo de carbono a 6×10^8 K?) (b) Calcule a energia (em MeV) liberada em cada uma destas reações de "queima de carbono":



(c) Calcule a energia (em kWh) emitida quando houver a fusão completa de 2,00 kg de carvão de acordo com a primeira reação.

- 41* Uma teoria da astrofísica nuclear propõe que todos os elementos mais pesados do que o ferro foram formados em explosões de supernovas terminando as vidas de estrelas com grande massa. Se supusermos que na época da explosão as quantidades de ^{235}U e de ^{238}U eram iguais, quanto tempo atrás explodiu(ram) a(s) estrela(s) que liberou(aram) os elementos que formaram nossa Terra? A razão atual de $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ é de 0,007 25. As meias-vidas do ^{235}U e do ^{238}U são de $0,704 \times 10^9$ anos e de $4,47 \times 10^9$ anos.

Problemas Adicionais

- 42* O emissor alfa polônio 210 ($^{210}_{84}\text{Po}$) é utilizado como a fonte de energia nuclear em uma espaçonave (Figura P30.42). Determine a potência inicial fornecida pela fonte. Suponha que ela contém 0,155 kg de ^{210}Po e que a eficiência para a conversão de energia de desintegração radioativa em energia elétrica é de 1%.



Figura P30.42 A espaçonave Pioneer 10 deixa o Sistema Solar. Ela transporta estoques de energia radioativa nas extremidades de duas hastes. Painéis solares não funcionariam longe do Sol. (Cortesia da Nasa Ames Home Page)

- 43* (a) Encontre o raio do núcleo de $^{12}_6\text{C}$. (b) Encontre a força de repulsão entre um próton na superfície de um núcleo de $^{12}_6\text{C}$ e os cinco prótons remanescentes. (c) Quanto trabalho (em MeV) tem de ser feito para se superar essa repulsão eletrostática para colocar o último próton dentro do núcleo? (d) Repita os itens (a), (b) e (c) para o $^{238}_{92}\text{U}$.

- 44* A atividade de uma amostra radioativa foi medida durante 12,0 h, obtendo-se as taxas de contagem resultantes mostradas na tabela.

Tempo (h)	Taxa de Contagem (impulsos/min)
1,00	3,100
2,00	2,450
4,00	1,480
6,00	910
8,00	545
10,0	330
12,0	200

- (a) Faça um gráfico do logaritmo da taxa de contagem em função do tempo. (b) Determine a constante de desintegração e a meia-vida dos núcleos radioativos na amostra. (c) Qual a taxa de contagem que você esperaria para a amostra em $t = 0$? (d) Supondo que a eficiência do instrumento de contagem seja de 10,0%, calcule o número de átomos radioativos na amostra em $t = 0$.
- 45* Em uma rocha lunar, o teor de ^{87}Rb foi determinado como sendo de $1,82 \times 10^{10}$ átomos/g de material e o teor de ^{87}Sr foi encontrado como sendo de $1,07 \times 10^9$ átomos/g. (a) Calcule a idade da rocha. (b) O material na rocha poderia ser de fato muito mais velho? Qual suposição está implícita ao se utilizar o método de datação radioativa? (O decaimento relevante é $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} + e^-$. A meia-vida da desintegração é de $4,75 \times 10^{10}$ anos.)
- 46* Quando um núcleo é deixado em um estado excitado após uma reação ou perturbação de qualquer tipo, ele pode retornar ao seu estado normal (fundamental) pela emissão de um fóton de raio gama (ou de vários fótons). Esse processo é ilustrado pela Equação 30.20. O núcleo emissor tem de recuar para conservar energia e momento. (a) Mostre que a energia de recuo do núcleo é dada por

$$E_r = \frac{(\Delta E)^2}{2Mc^2}$$

onde ΔE é a diferença de energia entre os estados excitado e fundamental de um núcleo de massa M . (b) Calcule a energia de recuo do núcleo ^{57}Fe quando ele decair por emissão gama do estado excitado de 14,4 keV. Para este cálculo, considere a massa como sendo de 57 u. (Dica: Ao escrever a equação para a conservação da energia, utilize $(Mv)^2/2M$ para a energia cinética do núcleo no recuo. Além disso, suponha que $hf \ll Mc^2$ e utilize a expansão binomial.)

- 47* Após a emissão repentina de radioatividade no acidente do reator nuclear de Chernobyl em 1986, a radioatividade do leite na Polônia subiu para 2 000 Bq/L por causa da absorção de iodo 131 presente na grama com a qual se alimentava o gado de leite. O iodo radioativo, com uma meia-vida de 8,04 dias, é particularmente perigoso, pois a glândula tireóide concentra iodo.

O acidente de Chernobyl causou um aumento mensurável nos cânceres de tireóide entre as crianças da Bielorrússia. (a) Para comparação, encontre a atividade do leite devida ao potássio. Suponha que 1 L de leite contém 2,00 g de potássio, visto que 0,011 7% é constituído pelo isótopo ^{40}K , que tem uma meia-vida de $1,28 \times 10^9$ anos. (b) Após qual período de tempo a atividade devida ao iodo seria menor do que a atividade do potássio?

48. Os europeus designam uma certa direção no céu como estando entre os chifres do Touro na constelação do Touro. No dia 4 de julho de 1054 d. C., surgiu nessa região uma luz brilhante. Os europeus não deixaram nenhum registro que tenha sobrevivido da supernova, que pôde ser vista à luz do dia durante alguns dias. Ela se enfraqueceu, mas permaneceu visível por anos, obscurecendo-se durante um tempo com a meia-vida de 77,1 dias do cobalto 56 radioativo que havia sido criado na explosão. (a) Os restos da estrela formam agora a nebulosa do Caranguejo. Hoje em dia o cobalto 56 diminuiu a que fração da sua atividade original nesta nebulosa? (b) Suponha que um índio norte-americano, do povo chamado de anasazi, tenha feito um desenho de carvão da supernova. O carbono 14 no carvão decaiu hoje em dia a que fração de sua atividade original?
49. A desintegração de um núcleo instável por emissão alfa é representada pela Equação 30.9. A energia de desintegração Q dada pela Equação 30.12 precisa ser dividida pela partícula alfa e pelo núcleo-filho para conservar energia e momento no processo de desintegração. (a) Mostre que Q e K_α , a energia cinética da partícula alfa, estão relacionadas pela expressão

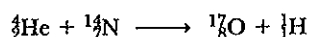
$$Q = K_\alpha \left(1 + \frac{M_\alpha}{M} \right)$$

onde M é a massa do núcleo-filho. (b) Use o resultado do item (a) para encontrar a energia da partícula alfa emitida na desintegração do ^{226}Ra . (Veja o Exemplo 30.5 para o cálculo de Q .)

50. Quando a reação nuclear representada pela Equação 30.23 é endotérmica, a energia de desintegração Q é negativa. Para a reação prosseguir, a partícula incidente precisa ter uma energia mínima chamada de limiar de energia E_{le} . Uma fração da energia da partícula incidente é transferida para o núcleo composto para conservar momento. Portanto, E_{le} precisa ser maior do que Q . (a) Mostre que

$$E_{\text{le}} = -Q \left(1 + \frac{M_\alpha}{M_X} \right)$$

(b) Calcule o limiar de energia da partícula alfa incidente na reação



51. *Determinação pelos estudantes da meia-vida do ^{137}Ba .* O isótopo radioativo do bário ^{137}Ba tem uma meia-vida relativamente curta e pode ser facilmente extraído de uma solução contendo seu núcleo-pai césio (^{137}Cs). Esse isótopo do

bário é utilizado comumente em uma prática de laboratório de graduação para demonstrar a lei do decaimento radioativo. Estudantes de graduação, utilizando equipamento experimental modesto, obtiveram os dados apresentados na Figura P30.51. Determine a meia-vida do decaimento do ^{137}Ba utilizando estes dados.

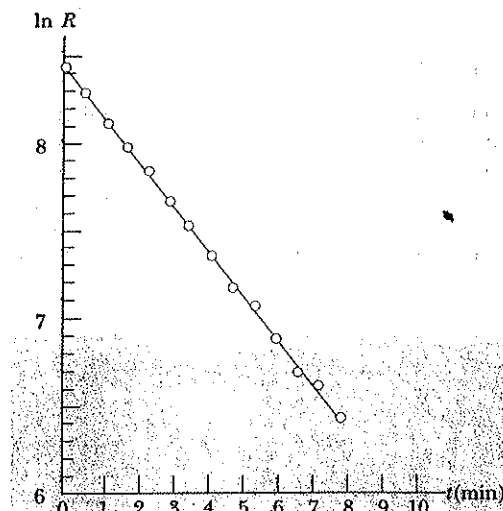


Figura P30.51

52. Durante a fabricação de uma peça de aço, inclui-se ferro radioativo (^{59}Fe) na massa total de 0,200 kg. A peça é colocada em um motor de teste quando a atividade devida a esse isótopo é de $20,0 \mu\text{Ci}$. Após um período de teste de 1 000 h, é removida parte do óleo lubrificante do motor e descobre-se que ele contém ^{59}Fe suficiente para produzir 800 desintegrações/min/L de óleo. O volume total do óleo no motor é de 6,50 L. Calcule a massa perdida pela peça por hora de funcionamento. (A meia-vida do ^{59}Fe é de 45,1 dias.)
53. A *análise de ativação por nêutrons* é um método de análise química no nível dos elementos. Quando uma amostra é irradiada por nêutrons, são produzidos continuamente átomos radioativos e, então, eles se desintegram de acordo com suas meias-vidas características. (a) Suponha que seja produzida uma espécie de núcleo radioativo a uma taxa constante R e que sua desintegração seja descrita pela lei do decaimento radioativo convencional. Mostre que o número de átomos radioativos acumulados após um tempo t de irradiação é dado por

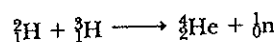
$$N = \frac{R}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

(b) Qual é o número máximo de átomos radioativos que podem ser produzidos?

- 54 A bomba atômica lançada sobre Hiroshima em 6 de agosto de 1945 liberou 5×10^{13} J de energia, equivalente à energia de 12 000 toneladas de trinitrotolueno (TNT). A fissão de um núcleo de ^{235}U libera uma média de 208 MeV. Estime (a) o número de núcleos que sofreram fissão e (b) a massa deste ^{235}U .
- 55 **Problema de Revisão.** Uma usina nuclear funciona utilizando a energia liberada na fissão nuclear para converter água a 20°C em vapor a 400°C . Teoricamente, quanta água poderia ser convertida em vapor realizando a fissão completa de 1,00 g de ^{235}U com 200 MeV/fissão?
- 56 Ao redor de 1 entre cada 3 300 moléculas de água contém um átomo de deutério. (a) Se todos os núcleos de deutério em 1 L de água são fundidos aos pares de acordo com a reação $^2\text{H} + ^2\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + n + 3,27 \text{ MeV}$, quanta energia em joules é liberada? (b) A queima da gasolina produz cerca de $3,40 \times 10^7$ J/L. Compare a energia obtida da fusão do deutério em um litro de água com a energia liberada na queima de um litro de gasolina.
- 57 Considere uma amostra radioativa. Determine a razão do número de átomos desintegrando-se durante a primeira metade da sua meia-vida pelo número de átomos desintegrando-se durante a segunda metade da sua meia-vida.
- 58 **Problema de Revisão.** A primeira bomba nuclear era uma massa de plutônio 239 realizando fissão, que explodiu no teste de Trinity antes do amanhecer do dia 16 de julho de 1945, em Alamogordo, Novo México. Enrico Fermi estava a 14 km de distância, deitado no solo e olhando em direção oposta à posição da bomba. Após todo o céu ter se iluminado com um brilho inacreditável, Fermi levantou-se e começou a lançar pedacinhos de papel para o solo. Inicialmente

eles caíram a seus pés no ar calmo e silencioso. Depois que passou a onda de choque, cerca de 40 s após a explosão, os papéis então pularam cerca de 5 cm acima do nível do solo. (a) Suponha que a onda de choque no ar propagou-se igualmente em todas as direções sem sofrer absorção. Encontre a variação no volume de uma esfera com raio de 14 km ao expandir-se 5 cm. (b) Encontre o trabalho $P\Delta V$ realizado pelo ar nessa esfera sobre a próxima camada de ar mais afastada do centro. (c) Suponha que a onda de choque transportou da ordem de um décimo da energia da explosão. Estime a ordem de grandeza da produção de energia da bomba. (d) Uma tonelada de TNT explodindo libera uma energia de 4,2 GJ. Qual foi a ordem de grandeza da energia do teste de Trinity em toneladas equivalentes de TNT? O amanhecer revelou a nuvem de cogumelo. O conhecimento imediato de Fermi da produção de energia da bomba concordou com o valor determinado dias mais tarde pela análise de medidas cuidadosas.

- 59 (a) Calcule a energia (em kWh) liberada se 1,00 kg de ^{239}Pu realizar uma fissão completa e se a energia liberada por evento de fissão for de 200 MeV. (b) Calcule a energia (em elétrons-volt) liberada na reação de fusão deutério-trítio



- (c) Calcule a energia (em kWh) liberada se 1,00 kg de deutério realizar fusão de acordo com esta reação. (d) Calcule a energia (em kWh) liberada pela combustão de 1,00 kg de carvão se cada reação $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ produzir 4,20 eV. (e) Liste as vantagens e desvantagens de cada um desses métodos de geração de energia.

RESPOSTAS DOS ENIGMAS RÁPIDOS

- 30.1 Dentro de um agrupamento vertical, os pontos representam núcleos que têm todos o mesmo número de prótons, logo, todos eles têm de representar o mesmo elemento — eles são isótopos. Como o número de nêutrons varia dentro de um grupo, cada ponto tem de significar um isótopo diferente do elemento.
- 30.2 Os isótopos de um dado elemento correspondem aos núcleos com números diferentes de nêutrons. Isso resulta em massas diferentes do átomo e em momentos magnéticos diferentes, pois o nêutron, apesar de não ter carga elétrica, tem um momento magnético. Contudo, o comportamento químico é governado pelos elétrons. Todos os isótopos de

um dado elemento possuem o mesmo número de elétrons e, portanto, o mesmo comportamento químico.

- 30.3 (e). Um ano de 365 dias é equivalente a $365 \text{ d}/5,01 \text{ d} \approx 73$ meias-vidas. Assim, a atividade será reduzida após um ano para aproximadamente $(1/2)^{73} (1,000 \mu\text{Ci}) \sim 10^{-22} \mu\text{Ci}$.
- 30.4 Uma partícula alfa contém dois prótons e dois nêutrons. Como um núcleo de hidrogênio contém apenas um próton, ele não pode emitir uma partícula alfa.
- 30.5 Não. A pedra não estava viva e respirando ar contendo carbono 14. Só podem ser estimadas com a datação pelo carbono as idades dos artefatos feitos de substâncias que estavam vivas em alguma época.