

Datação Radioativa Os nuclídeos radioativos naturais podem ser usados para estimar as datas de eventos históricos e pré-históricos. Assim, por exemplo, muitas vezes é possível estimar a idade de uma substância de origem orgânica medindo o teor de ^{14}C e datar rochas com o auxílio do isótopo radioativo ^{40}K .

Medida da Dose de Radiação Três unidades são usadas para descrever a exposição a radiações ionizantes. O **becquerel** (1 Bq = 1 decaimento por segundo) mede a **atividade** de uma fonte. A quantidade de energia absorvida por um corpo é medida em **grays**, com 1 Gy correspondendo a 1 J/kg. O efeito biológico estimado da energia absorvida é medido em **sieverts**; uma dose de 1 Sv causa o mesmo efeito biológico qualquer que seja o tipo de radiação envolvido.

Modelos Nucleares O **modelo coletivo** da estrutura nuclear supõe que os núcleos colidem freqüentemente e que **núcleos compostos** se formam quando um núcleo captura um projétil. A formação de um núcleo composto e o decaimento deste núcleo são considerados eventos independentes.

O **modelo das partículas independentes** da estrutura nuclear supõe que os núcleons se movem de forma independente, sem sofrer colisões, em estados quantizados. O modelo prevê a existência de níveis quantizados de energia para os núcleons e **números mágicos** de núcleons (2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126) associados a camadas completas. Os nuclídeos que possuem um número mágico de prótons e/ou de nêutrons são particularmente estáveis.

O **modelo combinado**, no qual alguns núcleons ocupam estados quantizados do lado de fora de um caroço formado por camadas completas, permite explicar muitas das propriedades dos núcleos.

PERGUNTAS

1 (a) Se a partícula alfa do Exemplo 42-1 for substituída por um próton com a mesma energia cinética inicial, a distância mínima a que o próton chega do núcleo será maior, menor ou igual? (b) Se o núcleo de ouro do Exemplo 42-1 for substituído por um núcleo com um valor maior de Z , a distância mínima a que a partícula alfa chega do núcleo será maior, menor ou igual?

2 Um certo nuclídeo é considerado particularmente estável. Sua energia de ligação por núcleon está ligeiramente acima ou ligeiramente abaixo da curva de energia de ligação da Fig. 42-6?

3 O nuclídeo ^{244}Pu ($Z = 94$) é um emissor de partículas alfa. Qual é o núcleo resultante do decaimento: ^{240}Np ($Z = 93$), ^{240}U ($Z = 92$), ^{248}Cm ($Z = 96$) ou ^{244}Am ($Z = 95$)?

4 A Fig. 42-16 mostra a curva da energia de ligação por núcleon ΔE_{eln} em função do número de massa A . Três isótopos estão indicados. Coloque-os na ordem da energia necessária para remover um núcleo do isótopo, começando pela maior.

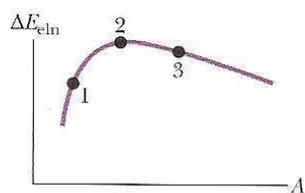


FIG. 42-16 Pergunta 4.

5 O radionuclídeo ^{196}Ir decai emitindo um elétron. (a) Em que quadrado da Fig. 42-5 está o núcleo resultante? (b) O núcleo resultante sofre outro decaimento?

6 O excesso de massa da uma partícula alfa (medido com uma régua na Fig. 42-12) é maior ou menor que a energia de ligação total da partícula (calculada a partir da energia de ligação por núcleon da Fig. 42-6)?

7 No instante $t = 0$ uma amostra do radionuclídeo A tem a mesma taxa de decaimento que uma amostra do radionuclídeo B no instante $t = 30$ min. As constantes de desintegração são λ_A e λ_B , com $\lambda_A < \lambda_B$. Existe algum instante no qual a taxa de decaimento é a mesma para as duas amostras? (Sugestão: Faça um gráfico das atividades das duas amostras em função do tempo.)

8 A Fig. 42-17 é um gráfico no número de massa A em função

do número atômico Z . A posição de um certo núcleo no gráfico está indicada por um ponto. Qual das setas que partem do ponto representa uma reação na qual o núcleo sofre (a) um decaimento β^- e (b) um decaimento α ?

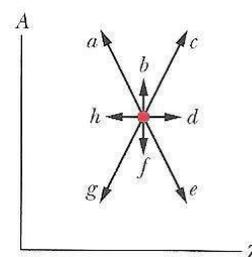


FIG. 42-17 Pergunta 8.

9 No instante $t = 0$ uma amostra do radionuclídeo A tem uma taxa de decaimento duas vezes maior que uma amostra do radionuclídeo B . As constantes de desintegração são λ_A e λ_B , com $\lambda_A > \lambda_B$. Existe algum instante no qual a taxa de decaimento é a mesma para as duas amostras?

10 A Fig. 42-18 mostra a atividade de três amostras radioativas em função do tempo. Coloque as amostras na ordem (a) da meia-vida e (b) da constante de desintegração, começando pela maior. [Sugestão: No caso do item (a) use uma régua para extrair informações do gráfico.]

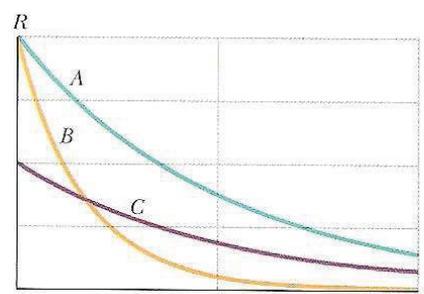


FIG. 42-18 Pergunta 10.

11 No instante $t = 0$ começamos a observar dois núcleos radioativos iguais, com uma meia-vida de 5 min. No instante $t = 1$ min

um dos núcleos decai. Depois desse evento a probabilidade de que o segundo núcleo decaia nos 4 min seguintes aumenta, diminui ou permanece a mesma?

12 Se a massa de uma amostra radioativa é multiplicada por dois (a) a atividade da amostra aumenta, diminui ou permanece constante? (b) A constante de desintegração aumenta, diminui ou permanece constante?

13 Como foi visto na Seção 42-9, os números mágicos de núcleons são 2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126. Um nuclídeo é mágico (isto é, especialmente estável) (a) se apenas o número de massa A for igual a um número mágico; (b) se apenas o número atômico Z for igual a um número mágico; (c) se apenas o número de nêutrons N for igual a um número mágico ou (d) Z for igual a um número

mágico, N for igual a um número mágico ou Z e N forem iguais a um número mágico?

14 O radionuclídeo ^{49}Sc tem uma meia-vida de 57,0 minutos. Em uma certa amostra que contém esse nuclídeo o número de contagens por minuto no instante $t = 0$ é 6000 contagens/min a mais que a atividade de fundo, que é de 30 contagens/min. Sem fazer nenhum cálculo, determine se o número de contagens por minuto da amostra será aproximadamente igual à atividade de fundo após 3 h, 7 h, 10 h ou um tempo muito maior que 10 h.

15 (a) Quais dos nuclídeos a seguir são mágicos: ^{122}Sn , ^{132}Sn , ^{98}Cd , ^{198}Au , ^{208}Pb ? (b) Quais desses nuclídeos são duplamente mágicos?

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 42-2 A Descoberta do Núcleo

•1 Um núcleo de ^7Li com uma energia cinética de 3,00 MeV se choca com um núcleo de ^{232}Th . Qual é a menor distância entre os centros dos dois núcleos, supondo que o núcleo de ^{232}Th (cuja massa é muito maior) permanece imóvel durante a colisão?

•2 Calcule a distância de máxima aproximação para uma colisão frontal entre uma partícula alfa de 5,30 MeV e o núcleo de um átomo de cobre.

••3 Quando uma partícula alfa colide elasticamente com um núcleo este sofre um recuo. Suponha que uma partícula alfa de 5,00 MeV sofre uma colisão elástica frontal com um núcleo de ouro que se encontra inicialmente em repouso. Qual é a energia cinética após a colisão (a) do núcleo; (b) da partícula alfa?

••4 Uma partícula alfa sofre uma colisão frontal com um núcleo de alumínio. As duas partículas são aproximadamente esféricas. Qual deve ser a energia da partícula alfa para ficar momentaneamente em repouso no instante em que sua “superfície” entra em contato com a “superfície” do núcleo de alumínio? Suponha que o núcleo de alumínio permanece estacionário durante todo o processo.

••5 Um núcleo de Li com uma energia cinética inicial de 10,2 MeV sofre uma colisão frontal com um núcleo de Ds. Qual é a distância entre o centro do núcleo de Li e o centro do núcleo de Ds no instante em que o núcleo de Li fica momentaneamente em repouso? Suponha que o núcleo de Ds permanece em repouso durante todo o processo.

seção 42-3 Propriedades dos Núcleos

•6 Qual é o excesso de massa Δ_1 do ^1H (cuja massa real é 1,007 825 u) (a) em unidades de massa atômica e (b) em MeV/c^2 ? Qual é o excesso de massa Δ_n do nêutron (cuja massa real é 1,008 665 u) (c) em unidades de massa atômica e (d) em MeV/c^2 ? Qual é o excesso de massa Δ_{120} do ^{120}Sn (cuja massa real é 119,902 197 u) (e) em unidades de massa atômica e (f) em MeV/c^2 ?

•7 O nuclídeo ^{14}C contém (a) quantos prótons? (b) Quantos nêutrons?

•8 A energia potencial elétrica de uma esfera uniforme de carga q e raio r é dada por

$$U = \frac{3q^2}{20\pi\epsilon_0 r}$$

(a) Essa energia representa uma tendência da esfera de se contrair ou de se dilatar? O nuclídeo ^{239}Pu tem a forma de uma esfera com 6,64 fm de raio. Para esse nuclídeo, determine (b) a energia potencial elétrica U , (c) a energia potencial elétrica por próton e (d) a energia potencial elétrica por núcleon. A energia de ligação por núcleon desse nuclídeo é 7,56 MeV. (e) Por que a energia de ligação é elevada se as respostas dos itens (c) e (d) são valores altos e positivos?

•9 Uma estrela de nêutrons é um corpo celeste com uma massa específica da mesma ordem que a da matéria nuclear, calculada no Exemplo 42-2. Suponha que o Sol se transforme em uma estrela de nêutrons mantendo a massa que possui atualmente. Qual é o novo raio do Sol?

•10 O grande excesso de nêutrons ($N - Z$) nos núcleos pesados é ilustrado pelo fato de que raramente a fissão de um núcleo pesado ocorre sem que alguns nêutrons sejam ejetados. Considere, por exemplo, a fissão espontânea de um núcleo de ^{235}U em dois *núcleos-filhos* estáveis de números atômicos 39 e 53. Depois de consultar o Apêndice F, determine o nome (a) do primeiro núcleo-filho e (b) do segundo núcleo-filho. De acordo com a Fig. 42-4, quantos nêutrons existem, aproximadamente, (c) no primeiro núcleo-filho e (d) no segundo núcleo-filho? (e) Quantos nêutrons, aproximadamente, são ejetados?

•11 Determine a massa específica nuclear ρ_m (a) do nuclídeo ^{55}Mn (moderadamente leve) e (b) do nuclídeo ^{209}Bi (moderadamente pesado). (c) Compare as respostas dos itens (a) e (b). A diferença parece razoável? Justifique sua resposta. Determine a densidade de carga nuclear ρ_q (d) do ^{55}Mn e (e) do ^{209}Bi . (f) Compare as respostas dos itens (d) e (e). A diferença parece razoável? Justifique sua resposta.

•12 (a) Mostre que uma expressão aproximada para a massa M de um átomo é $M_{\text{ap}} = Am_p$, onde A é o número de massa e m_p é a massa do próton. Para os nuclídeos (b) ^1H , (c) ^{31}P , (d) ^{120}Sn , (e) ^{197}Au e (f) ^{239}Pu , use as massas da Tabela 42-1 para calcular o erro percentual cometido ao usar essa expressão:

$$\text{erro percentual} = \frac{M_{\text{ap}} - M}{M} \cdot 100.$$

(g) Esta fórmula é suficientemente precisa para ser usada nos cálculos da energia de ligação dos núcleos?

••13 O raio de um núcleo pode ser determinado a partir de uma análise dos resultados do espalhamento de elétrons de alta energia pelo núcleo. (a) Qual é o comprimento de onda de de Broglie de um elétron de 200 MeV? (b) Um elétron com essa energia é apropriado para esse tipo de estudo?

••14 Uma moeda pequena tem uma massa de 3,0 g. Calcule a energia que seria necessária para separar todos os nêutrons e prótons da moeda. Para facilitar os cálculos, suponha que a moeda é feita inteiramente de átomos de ^{63}Cu (de massa 62,929 60 u). As massas do próton e do nêutron são 1,007 83 u e 1,008 66 u, respectivamente.

••15 Uma tabela periódica pode mostrar a massa atômica do magnésio como sendo 24,312 u. Esse valor é a *média ponderada* das massas atômicas dos isótopos naturais do magnésio de acordo com sua abundância natural na Terra. Os três isótopos e suas massas são o ^{24}Mg (23,985 04 u), o ^{25}Mg (25,985 84 u) e o ^{26}Mg (25,982 59 u). A abundância natural do ^{24}Mg é 78,99% em massa (ou seja, 78,99% da massa de uma amostra natural de magnésio se deve à presença de ^{24}Mg). Calcule a abundância natural (a) do ^{25}Mg e (b) do ^{26}Mg .

••16 Uma partícula α (núcleo de ^4He) foi desintegrada em várias etapas. Determine a energia (trabalho) necessária para cada etapa: (a) remover um próton; (b) remover um nêutron; (c) separar o próton e o nêutron restantes. Determine, para uma partícula α , (d) a energia de ligação total e (e) a energia de ligação por núcleon. (f) As respostas dos itens (e) e (f) estão de acordo com as respostas dos itens (a), (b) e (c)? As massas necessárias para realizar os cálculos são as seguintes:

^4He	4,002 60 u	^2H	2,014 10 u
^3H	3,016 05 u	^1H	1,007 83 u
n	1,008 67 u		

••17 Mostre que o valor da energia de ligação por núcleon dado na Tabela 42-1 para o ^{239}Pu está correto. A massa do átomo é 239,052 16 u.

••18 Qual é a energia de ligação por núcleon do ^{262}Bh ? A massa do átomo é 262,1231 u.

••19 (a) Mostre que a energia de ligação total E_{cl} de um nuclídeo é dada por

$$E_{\text{cl}} = Z\Delta_{\text{H}} + N\Delta_{\text{n}} - \Delta,$$

onde Δ_{H} é o excesso de massa do ^1H , Δ_{n} é o excesso de massa do nêutron e Δ é o excesso de massa do nuclídeo. (b) Usando esse método, calcule a energia de ligação por núcleon do ^{197}Au . Compare o resultado com o valor que aparece na Tabela 42-1. Os excessos de massa necessários para realizar o cálculo, arredondados para três algarismos significativos, são os seguintes: $\Delta_{\text{H}} = +7,29$ MeV, $\Delta_{\text{n}} = +8,07$ MeV, $\Delta_{197} = -31,2$ MeV. Observe que os cálculos se tornam muito mais simples quando os excessos de massa são usados em lugar das massas.

••20 Qual é a energia de ligação por núcleon do isótopo do rutherfordio ^{259}Rf ? Seguem algumas massas atômicas e a massa do nêutron.

$^{259}_{104}\text{Rf}$	259,105 63 u	^1H	1,007 825 u
n	1,008 665 u		

••21 (a) Mostre que a energia associada à interação forte entre núcleons no interior de um núcleo é proporcional a A , o número de massa do núcleo em questão. (b) Mostre que a energia associada à interação eletrostática entre os prótons de um núcleo é proporcional a $Z(Z - 1)$. (c) Mostre que quando consideramos núcleos cada vez maiores (veja a Fig. 42-4) a energia associada à interação eletrostática aumenta mais rapidamente que a energia associada à interação forte.

••22 Qual é a energia de ligação por núcleon do isótopo do európio ^{152}Eu ? Seguem algumas massas atômicas e a massa do nêutron.

$^{152}_{63}\text{Eu}$	151,921 742 u	^1H	1,007 825 u
n	1,008 665 u		

••23 Como o nêutron não possui carga elétrica não é possível medir sua massa usando um espectrômetro de massa. Quando um nêutron e um próton se encontram (supondo que ambos estejam quase estacionários) combinam-se para formar um dêuteron, emitindo um raio gama cuja energia é 2,2233 MeV. As massas do próton e do dêuteron são 1,007 276 467 u e 2,013 553 212 u, respectivamente. Determine a massa do nêutron a partir desses dados.

••24 Qual é a energia de ligação por núcleon do isótopo do amerício $^{244}_{95}\text{Am}$? Seguem algumas massas atômicas e a massa do nêutron.

$^{244}_{95}\text{Am}$	244,064 279 u	^1H	1,007 825 u
n	1,008 665 u		

seção 42-4 Decaimento Radioativo

••25 Considere uma amostra inicialmente pura de ^{67}Ga , um isótopo com uma meia-vida de 78 h. (a) Qual é a taxa de decaimento inicial? (b) Qual é a taxa de decaimento 48 horas depois?

••26 A meia-vida de um certo isótopo radioativo é 6,5 horas. Se existem inicialmente 48×10^{19} átomos do isótopo, quantos átomos existem após 26 horas?

••27 Um isótopo radioativo do mercúrio, ^{197}Hg , se transforma em ouro, ^{197}Au , com uma constante de desintegração de $0,0108 \text{ h}^{-1}$. (a) Calcule a meia-vida do isótopo. Que fração de uma amostra continua a existir após (b) três meias-vidas; (c) 10,0 dias?

••28 Quando testes nucleares eram realizados na atmosfera as explosões injetavam poeira radioativa na atmosfera superior. A circulação do ar espalhava a poeira pelo mundo inteiro antes que se precipitasse no solo e na água. Um dos testes foi realizado em outubro de 1976. Que fração do ^{90}Sr produzido por essa explosão ainda existia em outubro de 2006? A meia-vida do ^{90}Sr é 29 anos.

••29 Um nuclídeo radioativo tem uma meia-vida de 30,0 anos. Que fração de uma amostra inicialmente pura desse nuclídeo permanece intacta após (a) 60 anos; (b) 90 anos?

••30 A meia-vida de um isótopo radioativo é 140 dias. Quantos dias são necessários para que a taxa de decaimento de uma amostra do isótopo diminua para um quarto do valor inicial?

••31 As células cancerosas são mais vulneráveis aos raios X e aos raios gama que as células normais. No passado os tratamentos de radioterapia utilizavam o ^{60}Co , que decai, com uma meia-vida de 5,27 anos, em um estado nuclear excitado de ^{60}Ni . Esse isótopo do níquel imediatamente emite dois fótons de raios gama, cada um com uma energia de aproximadamente 1,2 MeV. Quantos núcleos de ^{60}Co existem em uma fonte de 6000 Ci do tipo usado

nos hospitais? (Hoje em dia os tratamentos de radioterapia quase sempre são feitos com aceleradores lineares.)

••32 O isótopo de plutônio ^{239}Pu é um subproduto dos reatores nucleares, e por isso está se acumulando na Terra. O ^{239}Pu é radioativo, com uma meia-vida de $2,41 \times 10^4$ anos. (a) Quantos núcleos de Pu existem em uma dose quimicamente letal de 2,00 mg? (b) Qual é a taxa de decaimento dessa quantidade de plutônio?

••33 Uma cápsula radioativa contendo uma substância que será usada para tratar um paciente internado em um hospital é preparada em um laboratório vizinho. A substância tem uma meia-vida de 83,61 h. Qual deve ser a atividade inicial para que a atividade seja de $7,4 \times 10^8$ Bq quando a cápsula for usada no tratamento, 24 h depois?

••34 O nuclídeo radioativo ^{99}Tc pode ser injetado no sistema circulatório de um paciente para monitorar o fluxo sanguíneo, medir o volume de sangue ou localizar um tumor, entre outras coisas. O nuclídeo é produzido em um hospital por uma “vaca” que contém ^{99}Mo , um nuclídeo radioativo que se transforma em ^{99}Tc com uma meia-vida de 67 h. Uma vez por dia a “vaca” é ordenhada para extrair o ^{99}Tc , que é produzido pelo ^{99}Mo em um estado excitado; o ^{99}Tc decai para o estado fundamental emitindo um raio gama, que é registrado por detectores colocados em torno do paciente. Esse decaimento tem uma meia-vida de 6,0 h. (a) Através de que processo o ^{99}Mo decai para ^{99}Tc ? (b) Se um paciente recebe uma injeção de ^{99}Tc com uma atividade de $8,2 \times 10^7$ Bq, quantos raios gama são produzidos por segundo no interior do corpo logo após a injeção? (c) Se a taxa de emissão de raios gama em um pequeno tumor que concentrou o ^{99}Tc é 38 por segundo em um determinado momento, quantos átomos de ^{99}Tc no estado excitado existem no tumor nesse momento?

••35 Em 1902, depois de muito trabalho, Marie e Pierre Curie conseguiram extrair do minério de urânio a primeira quantidade palpável de rádio, um decigrama de RaCl_2 puro. Tratava-se do isótopo radioativo ^{226}Ra , que tem uma meia-vida de 1600 anos. (a) Quantos núcleos de rádio havia na amostra preparada pelo casal? (b) Qual era a taxa de decaimento da amostra, em desintegrações por segundo?

••36 A Fig. 42-19 mostra o decaimento de uma amostra radioativa. A escala dos eixos é definida por $N_s = 2,00 \times 10^6$ e $t_s = 10,0$ s. Qual é a atividade da amostra no instante $t = 27,0$ s?

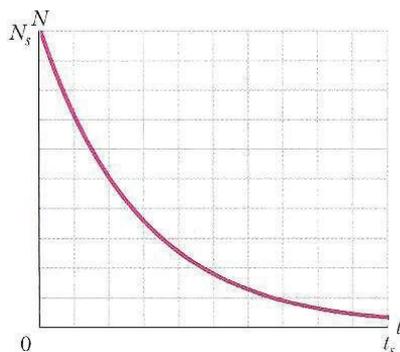


FIG. 42-19 Problema 36.

••37 Em 1992 a polícia suíça deteve dois homens que estavam tentando contrabandear ósmio para fora da Europa Oriental para vender o produto no mercado negro. Por engano, porém, os contrabandistas haviam roubado um carregamento de ^{137}Cs .

Segundo as notícias, cada contrabandista levava *no bolso* uma cápsula contendo 1,0 g de ^{137}Cs ! Qual era a atividade de uma das cápsulas (a) em becquerels e (b) em curies? O ^{137}Cs tem uma meia-vida de 30,2 anos. (A atividade dos radioisótopos usados em hospitais é da ordem de alguns milicuries.)

••38 Qual é a atividade de uma amostra de 20 ng de ^{92}Kr , que possui uma meia-vida de 1,84 s?

••39 Uma amostra de 1,0 g de samário emite partículas alfa à taxa de 120 partículas/s. O isótopo responsável é o ^{147}Sm , cuja abundância natural é 15,0%. Calcule a meia-vida desse isótopo.

••40 Uma dose de $8,60 \mu\text{Ci}$ de um isótopo radioativo é injetada em um paciente. O isótopo tem uma meia-vida de 3,0 h. Quantos átomos do isótopo radioativo foram injetados?

••41 O radionuclídeo ^{64}Cu tem uma meia-vida de 12,7 h. Se no instante $t = 0$ uma amostra contém 5,50 g de ^{64}Cu inicialmente puro, quantas gramas de ^{64}Cu se desintegram entre $t = 14,0$ h e $t = 16,0$ h?

••42 Uma fonte contém dois radionuclídeos de fósforo, ^{32}P ($T_{1/2} = 14,3$ d) e ^{33}P ($T_{1/2} = 25,3$ d). Inicialmente o ^{33}P é responsável por 10,0% dos decaimentos. Depois de quanto tempo o ^{33}P é responsável por 90,0% dos decaimentos?

••43 Um certo radionuclídeo está sendo fabricado em um ciclotron a uma taxa constante R ; ao mesmo tempo está decaindo com uma constante de desintegração λ . Suponha que o radionuclídeo vem sendo fabricado durante um tempo muito maior que sua meia-vida. (a) Mostre que nessas condições o número de núcleos radioativos presentes permanece constante e é dado por $N = R/\lambda$, independentemente do número de núcleos radioativos inicialmente presentes. Em uma situação como essa dizemos que o nuclídeo está em *equilíbrio secular* com sua fonte; a taxa de decaimento é igual à taxa de produção.

••44 O isótopo do plutônio ^{239}Pu decai emitindo uma partícula alfa, com uma meia-vida de 24 100 anos. Quantos miligramas de hélio estão presentes em uma amostra de 12,0 g de ^{239}Pu , inicialmente pura, após 20 000 anos? (Considere apenas o hélio produzido diretamente pelo decaimento do plutônio.)

••45 O radionuclídeo ^{56}Mn tem uma meia-vida de 2,58 h e é produzido em um ciclotron através do bombardeio de um alvo de manganês com dêuterons. O alvo contém apenas o isótopo estável do manganês ^{55}Mn , e a reação que produz o ^{56}Mn é a seguinte:



Depois de ser bombardeado por um tempo muito maior que a meia-vida do ^{56}Mn a atividade do ^{56}Mn produzido no alvo atinge o valor-limite de $8,88 \times 10^{10}$ Bq. Nessa situação, (a) qual é a taxa de produção de núcleos de ^{56}Mn ? (b) Quantos núcleos de ^{56}Mn estão presentes no alvo? (c) Qual é a massa total desses núcleos?

••46 Calcule a massa de uma amostra (inicialmente pura) de ^{40}K com uma taxa de decaimento inicial de $1,70 \times 10^5$ desintegrações/s. O isótopo tem uma meia-vida de $1,28 \times 10^9$ anos.

••47 O ar de algumas cavernas contém uma concentração significativa do gás radônio, que pode produzir câncer do pulmão se for respirado por muito tempo. Entre as cavernas inglesas a mais contaminada com radônio tem uma atividade de $1,55 \times 10^5$ Bq por metro cúbico de ar. Suponha que um explorador passe dois dias inteiros no interior dessa caverna. Quantos átomos de ^{222}Rn são inalados e exalados durante este período? O radionuclídeo ^{222}Rn tem uma meia-vida de 3,82 dias. (Para resolver o problema é preciso estimar a capacidade pulmonar e a taxa média de respiração do explorador.)

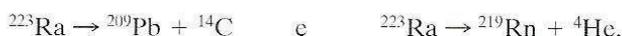
seção 42-5 Decaimento Alfa

•48 Qual é o valor da energia liberada quando um núcleo de ²³⁸U decai emitindo (a) uma partícula alfa e (b) uma seqüência de nêutron, próton, nêutron, próton? (c) Mostre, através de argumentos teóricos e de cálculos numéricos, que a diferença entre os valores calculados dos itens (a) e (b) é igual à energia de ligação da partícula alfa. (d) Determine a energia de ligação. Os dados necessários são os seguintes:

²³⁸ U	238,050 79 u	²³⁴ Th	234,043 63 u
²³⁷ U	237,048 73 u	⁴ He	4,002 60 u
²³⁶ Pa	236,048 91 u	¹ H	1,007 83 u
²³⁵ Pa	235,045 44 u	n	1,008 66 u

•49 Os núcleos muito pesados são os mais sujeitos a decaimento alfa. Assim, por exemplo, o isótopo mais estável do urânio, o ²³⁸U, decai por decaimento alfa com uma meia-vida de $4,5 \times 10^9$ anos. Outros nuclídeos que sofrem o mesmo tipo de decaimento são o ²⁴⁴Pu, o isótopo mais estável do plutônio, com uma meia-vida de $8,0 \times 10^7$ anos, e o ²⁴⁸Cm, o isótopo mais estável do cúrio, com uma meia-vida de $3,4 \times 10^5$ anos. Em um intervalo de tempo no qual metade dos átomos de uma amostra de ²³⁸U decai, que fração dos átomos resta em amostras (a) de ²⁴⁴Pu e (b) de ²⁴⁸Cm?

•50 Em raros casos um núcleo pode decair emitindo uma partícula de massa maior que uma partícula alfa. Considere os decaimentos

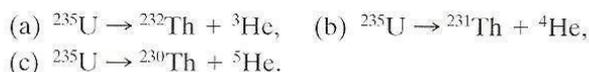


Calcule o valor de Q (a) para o primeiro decaimento e (b) para o segundo decaimento e verifique que ambos são energeticamente possíveis. (c) A altura da barreira de Coulomb para a emissão de uma partícula alfa é 30,0 MeV. Qual é a altura da barreira para a emissão de ¹⁴C? Os dados necessários são os seguintes:

²²³ Ra	223,018 50 u	¹⁴ C	14,003 24 u
²⁰⁹ Pb	208,981 07 u	⁴ He	4,002 60 u
²¹⁹ Rn	219,009 48 u		

•51 Um núcleo de ²³⁸U emite uma partícula alfa de 4,196 MeV. Calcule a energia de desintegração Q para esse processo, levando em conta a energia de recuo do núcleo residual de ²³⁴Th.

•52 Os radionuclídeos pesados emitem partículas alfa em vez de outras combinações de núcleons porque as partículas alfa formam uma estrutura particularmente estável. Para confirmar essa tese calcule as energias de desintegração para as reações hipotéticas a seguir, e discuta os resultados:



Os dados necessários são os seguintes:

²³² Th	232,0381 u	³ He	3,0160 u
²³¹ Th	231,0363 u	⁴ He	4,0026 u
²³⁰ Th	230,0331 u	⁵ He	5,0122 u
²³⁵ U	235,0429 u		

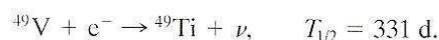
seção 42-6 Decaimento Beta

•53 Um nêutron livre decai de acordo com a Eq. 42-26. Se a diferença de massa entre o nêutron e o átomo de hidrogênio é 840 μu , qual é a máxima energia cinética $K_{\text{máx}}$ do elétron emitido?

•54 Um elétron é emitido por um nuclídeo de massa intermediária ($A = 150$, por exemplo) com uma energia cinética de 1,0 MeV. (a) Qual é o comprimento de onda de de Broglie do elétron? (b) Calcule o raio do núcleo responsável pela emissão. (c) Um elétron com essas características pode ser confinado em uma “caixa” com as mesmas dimensões do núcleo? (d) É possível usar o resultado do item (c) para rejeitar a hipótese (já descartada) de que existem elétrons permanentemente no interior do núcleo?

•55 O isótopo do célio ¹³⁷Cs é produzido nas explosões nucleares. Como decai para ¹³⁷Ba com uma meia-vida relativamente longa (30,2 anos), liberando uma quantidade considerável de energia no processo, é considerado muito perigoso. As massas atômicas do ¹³⁷Cs e do ¹³⁷Ba são 136,9071 e 136,9058 u, respectivamente; calcule a energia total liberada no decaimento de um átomo de ¹³⁷Cs.

•56 Alguns radionuclídeos decaem capturando um dos elétrons atômicos, que pode pertencer à camada K ou (mais raramente) à camada L . Um exemplo desse tipo de reação é

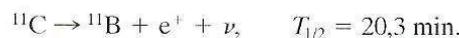


Mostre que a energia de desintegração Q para esse processo, supondo que o elétron capturado pertencia à camada K , é dado por

$$Q = (m_V - m_{\text{Ti}})c^2 - E_K,$$

onde m_V e m_{Ti} são as massas atômicas do ⁴⁹V e do ⁴⁹Ti, respectivamente, e E_K é a energia de ligação de um elétron da camada K do vanádio. (Sugestão: Chame as massas nucleares correspondentes de m_V e m_{Ti} e proceda como no Exemplo 42-7.)

•57 O radionuclídeo ¹¹C decai através da seguinte reação:



A energia máxima do pósitron emitido é 0,960 MeV. (a) Mostre que a energia de desintegração para esse processo é dada por

$$Q = (m_C - m_B - 2m_e)c^2,$$

onde m_C e m_B são as massas atômicas do ¹¹C e do ¹¹B, respectivamente, e m_e é a massa do pósitron. (b) Dadas as massas $m_C = 11,011 424 \text{ u}$, $m_B = 11,009 305 \text{ u}$ e $m_e = 0,000 548 6 \text{ u}$, calcule o valor de Q e compare-o com a máxima energia do pósitron emitido. (Sugestão: Chame as massas nucleares de m_C e m_B e proceda como no Exemplo 42-7. Observe que no decaimento beta mais, ao contrário do que acontece no decaimento beta menos, é preciso levar em conta explicitamente a massa da partícula emitida.)

•58 Dois nuclídeos que são instáveis em relação ao decaimento alfa, o ²³⁸U e o ²³²Th, e um que é instável em relação ao decaimento beta, o ⁴⁰K, são suficientemente abundantes no granito para contribuir significativamente para o aquecimento da Terra. Os isótopos que emitem partículas alfa dão origem a cadeias de decaimentos que resultam na formação de isótopos estáveis do chumbo. O isótopo ⁴⁰K sofre apenas um decaimento beta. (Suponha que esse é o único modo de decaimento desse isótopo.) Os dados relevantes são os seguintes:

Nuclídeo Inicial	Modo de Decaimento	Meia-vida (anos)	Nuclídeo Final	Q (MeV)	f (ppm)
²³⁸ U	α	$4,47 \times 10^9$	²⁰⁶ Pb	51,7	4
²³² Th	α	$1,41 \times 10^{10}$	²⁰⁸ Pb	42,7	13
⁴⁰ K	β	$1,28 \times 10^9$	⁴⁰ Ca	1,31	4

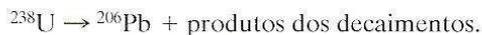
Na tabela, Q é a energia total liberada em toda a cadeia de decaimentos e f é a abundância do isótopo em quilogramas por quilograma de granito; ppm significa partes por milhão. (a) Mostre que esses isótopos produzem energia à taxa de $1,0 \times 10^{-9}$ W por quilograma de granito. (b) Supondo que existam $2,7 \times 10^{22}$ kg de granito em uma casca esférica de 20 km de espessura na superfície da Terra, estime a potência associada a esses processos de decaimento. Compare essa potência com a potência solar recebida pela Terra, $1,7 \times 10^{17}$ W.

•••59 O radionuclídeo ^{32}P decai para ^{32}S de acordo com a Eq. 42-24. Em um desses decaimentos é emitido um elétron de 1,71 MeV, o valor máximo possível para a energia cinética do elétron. Qual é a energia cinética do ^{32}S após a emissão? (*Sugestão:* No caso do elétron é necessário usar as expressões relativísticas da energia cinética e do momento linear; no caso do ^{32}S , que se move muito mais devagar, não há problema em usar as expressões clássicas.)

seção 42-7 Datação Radioativa

•60 Em uma amostra de 5,00 g de carvão vegetal, proveniente dos restos de uma antiga fogueira, o ^{14}C tem uma atividade de 63,0 desintegrações/min. Em uma árvore viva o ^{14}C tem uma atividade de 15,3 desintegrações/g · min. O ^{14}C possui uma meia-vida de 5730 anos. Qual é a idade da amostra?

•61 O ^{238}U decai para ^{206}Pb com uma meia-vida de $4,47 \times 10^9$ anos. Embora esse decaimento ocorra em várias etapas, a meia-vida da primeira dessas etapas é muito maior do que as das etapas subsequentes; assim, podemos supor que esse decaimento leva diretamente ao chumbo e escrever:



Uma certa rocha contém 4,20 mg de ^{238}U e 2,135 mg de ^{206}Pb . Estudos geológicos revelam que a rocha provavelmente não continha chumbo na época em que se formou, de modo que todo o chumbo presente pode ser atribuído ao decaimento do urânio. Quantos átomos de (a) ^{238}U e (b) ^{206}Pb contém a rocha? (c) Quantos átomos de ^{238}U a rocha continha na época em que se formou? (d) Qual é a idade da rocha?

••62 Estima-se que uma rocha tem uma idade de 260 milhões de anos. Se a rocha contém 3,70 mg de ^{238}U , quantos miligramas de ^{206}Pb deve conter? Veja o Problema 61.

••63 Uma rocha extraída do subsolo contém 0,86 mg de ^{238}U , 0,15 mg de ^{206}Pb e 1,6 mg de ^{40}Ar . Quantos miligramas de ^{40}K deve conter a rocha? Suponha que o ^{40}K decai apenas para ^{40}Ar com uma meia-vida de $1,25 \times 10^9$ anos. Suponha também que o ^{238}U tem uma meia-vida de $4,47 \times 10^9$ anos.

•••64 O isótopo ^{40}K pode se transformar em ^{40}Ca ou em ^{40}Ar ; suponha que nos dois casos a meia-vida é $1,26 \times 10^9$ anos. A razão entre o número de átomos de Ca produzidos e o número de átomos de Ar produzidos é 8,54. Uma amostra, que continha inicialmente apenas ^{40}K , agora contém quantidades iguais de ^{40}K e ^{40}Ar . Qual é a idade da amostra? (*Sugestão:* Analise o problema da mesma forma que qualquer problema de datação radioativa, mas levando em conta o fato de que existem dois produtos do decaimento em vez de apenas um.)

seção 42-8 Medida da Dose de Radiação

•65 Uma amostra orgânica com uma massa de 4,00 kg absorve uma energia de 2,00 mJ proveniente de nêutrons lentos (RBE = 5). Qual é a dose equivalente em mSv?

•66 Um detector de radiação registra 8700 contagens em 1,00 min. Supondo que o detector tenha registrado todos os decai-

mentos, determine a atividade da fonte de radiação (a) em becquerels e (b) em curies.

•67 O nuclídeo ^{198}Au , com uma meia-vida de 2,70 d, é usado no tratamento do câncer. Qual é a massa desse nuclídeo necessária para produzir uma atividade de 250 Ci?

••68 Um indivíduo de 75 kg recebe uma dose de corpo inteiro de $2,4 \times 10^{-4}$ Gy na forma de partículas alfa com um fator RBE de 12. Determine (a) a energia absorvida em joules; (b) a dose equivalente (b) em sieverts e (c) em rem.

••69 Um operário de 85 kg, que trabalha em um reator regenerador, ingere acidentalmente 2,5 mg de ^{239}Pu em pó. O ^{239}Pu tem uma meia-vida de 24 100 anos e é um emissor alfa. A energia das partículas alfa emitidas é 5,2 MeV, com um fator RBE de 13. Supondo que o plutônio permanece por 12 h no corpo do operário e que 95% das partículas alfa emitidas são absorvidas pelos tecidos do corpo, determine (a) o número de átomos de plutônio ingeridos; (b) o número de átomos que decaem durante o tempo que o plutônio permanece no corpo do operário; (c) a energia absorvida pelo corpo do operário; (d) a dose recebida pelo operário, em grays; (e) a dose equivalente recebida pelo operário, em sieverts.

seção 42-9 Modelos Nucleares

•70 Na lista de nuclídeos a seguir, identifique (a) os que possuem camadas completas de núcleons; (b) os que possuem um núcleon a mais que uma camada completa; (c) os que possuem um núcleon a menos que uma camada completa: ^{13}C , ^{18}O , ^{40}K , ^{49}Ti , ^{60}Ni , ^{91}Zr , ^{92}Mo , ^{121}Sb , ^{143}Nd , ^{144}Sm , ^{205}Tl e ^{207}Pb .

•71 Um produto intermediário de uma certa reação nuclear decai menos de 10^{-22} s depois de se formar. (a) Qual é a indeterminação ΔE da energia desse estado intermediário? (b) Esse estado pode ser considerado um núcleo composto? (*Sugestão:* Veja o Exemplo 42-10.)

•72 A energia cinética de um núcleon em um núcleo de massa intermediária é da ordem de 5,00 MeV. A que temperatura efetiva corresponde essa energia, de acordo com o modelo coletivo do núcleo?

••73 Considere os três processos de formação indicados na Fig. 42-14 para o núcleo composto ^{20}Ne . As massas das partículas envolvidas são as seguintes:

^{20}Ne	19,992 44 u	α	4,002 60 u
^{19}F	18,998 40 u	p	1,007 83 u
^{16}O	15,994 91 u		

Que energia deve ter (a) a partícula alfa; (b) o próton e (c) o fóton de raios γ para que o núcleo composto seja formado com uma energia de excitação de 25,0 MeV?

Problemas Adicionais

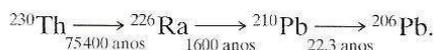
74 Quando a Segunda Guerra Mundial terminou as autoridades holandesas prenderam o artista holandês Hans van Meegeren, acusando-o de ter vendido um quadro valioso ao criminoso de guerra nazista Hermann Goering. As pinturas, *Cristo* e a *Adúltera*, como várias outras de autoria do mestre holandês Johannes Vermeer (1632-1675), tinham sido encontradas por van Meegeren depois de permanecer desaparecida durante quase 300 anos. Vender aquele tesouro nacional ao inimigo só podia ser considerado um ato de alta traição.

Pouco depois de ser detido, porém, van Meegeren declarou, para surpresa geral, que *Cristo* e a *Adúltera* e os outros quadros

“descobertos” por ele não passavam de falsificações. Explicou que havia imitado o estilo de Vermeer, usando telas de 300 anos de idade e pigmentos da época; assinara os trabalhos como se fossem de Vermeer e submetera as pinturas a um processo de envelhecimento acelerado em um forno para que parecessem autênticas.

Estaria van Meegeren mentindo para escapar à acusação da alta traição, na esperança de ser condenado a uma pena menor pelo crime de fraude? Para os peritos, *Cristo e Seus Discípulos em Emaús* certamente parecia um legítimo Vermeer, mas na época do julgamento de van Meegeren, em 1947, não existia nenhum método científico capaz de esclarecer a questão. Depois de pintar uma imitação de Vermeer enquanto estava na prisão, van Meegeren conseguiu convencer os acusadores e foi condenado a apenas um ano de prisão por fraude. Alguns especialistas, porém, continuaram a sustentar que os Vermeer eram autênticos.

Em 1968 Bernard Keisch, da Carnegie-Mellon University, chegou a uma resposta definitiva usando uma pequena amostra de pigmento à base de chumbo removido do mais famoso dentre os quadros supostamente descobertos por Meegeren, *Cristo e Seus Discípulos em Emaús*. Esse pigmento é obtido a partir de minério de chumbo, no qual parte do chumbo é produzida através de uma longa série de decaimentos que começa com o ^{238}U e termina com o ^{206}Pb . Para acompanhar o raciocínio da Keisch, vamos concentrar nossa atenção na parte da série que começa com o ^{230}Th e termina com o ^{206}Pb e que pode ser resumida da seguinte forma (alguns radionuclídeos intermediários, de meia-vida relativamente curta, foram omitidos):



As meias-vidas mais longas e mais importantes desta parte da série de decaimentos estão indicadas.

(a) Mostre que em uma amostra de minério de chumbo a taxa de variação do número de núcleos de ^{210}Pb é dada por

$$\frac{dN_{210}}{dt} = \lambda_{226}N_{226} - \lambda_{210}N_{210}$$

onde N_{210} e N_{226} são os números de núcleos de ^{210}Pb e ^{226}Ra na amostra e λ_{210} e λ_{226} são as constantes de desintegração correspondentes.

Como os decaimentos vêm ocorrendo há bilhões de anos e a meia-vida do ^{210}Pb é muito menor que a do ^{226}Ra , os núclídeos ^{226}Ra e ^{210}Pb estão *em equilíbrio*, isto é, o número desses núclídeos na amostra não varia com o tempo. (b) Qual é a razão R_{226}/R_{210} das atividades desses núclídeos em uma amostra de minério de chumbo? (c) Qual é a razão N_{226}/N_{210} dos números desses núclídeos em uma amostra de minério de chumbo?

Quando o pigmento à base de chumbo é fabricado a partir do minério a maior parte do ^{226}Ra é perdida. Suponha que permanece apenas 1,00%. Pouco depois que o pigmento é produzido, quanto valem as razões (d) R_{226}/R_{210} e (e) N_{226}/N_{210} ?

Keisch sabia que, com o tempo, a razão R_{226}/R_{210} no pigmento tende novamente para o valor de equilíbrio. Se *Emaús* tivesse sido pintado por Vermeer e, portanto, o pigmento tivesse 300 anos de idade ao ser examinado em 1968 a razão entre as atividades estaria mais próxima da resposta do item (b) que da resposta do item (d). Se, por outro lado, *Emaús* tivesse sido pintado por van Meegeren na década de 1930 e o pigmento tivesse apenas 30 anos de idade a razão estaria mais próxima da resposta do item (d). Keisch encontrou uma razão de 0,09. (f) *Emaús* pode ter sido pintado por Vermeer?

75 Um dos resíduos mais perigosos das explosões nucleares é o ^{90}Sr , que decai com uma meia-vida de 29 anos. Como possui propriedades químicas muito parecidas com as do cálcio, o estrôncio, quando ingerido por uma vaca, se concentra no leite. Parte desse ^{90}Sr é incorporada aos ossos das pessoas que bebem o leite. Os elétrons de alta energia emitidos pelo ^{90}Sr danificam a medula óssea, reduzindo a produção de hemácias. Uma bomba de 1 megaton produz aproximadamente 400 g de ^{90}Sr . Se os resíduos se espalham uniformemente por uma área de 2000 km², que área contém uma radioatividade igual ao limite “tolerável” para uma pessoa, que é 74 000 contagens/s?

76 Quando um dos reatores de Chernobyl se incendiou e explodiu no norte da Ucrânia, em 1986, parte da Ucrânia ficou contaminada com ^{137}Cs , que decai por emissão de um elétron com uma meia-vida de 30,2 anos. Em 1996 a atividade total dessa contaminação em uma área de $2,6 \times 10^5$ km² foi estimada em 1×10^{16} Bq. Supondo que o ^{137}Cs se espalhou uniformemente em toda a área e que metade dos elétrons resultantes do decaimento foi emitida para cima, quantos elétrons emitidos pelo ^{137}Cs atingiriam uma pessoa que permanecesse deitada no chão na região contaminada durante 1 h (a) em 1996; (b) em 2006? (O leitor terá que estimar a área da seção reta de um indivíduo adulto.)

77 O radionuclídeo ^{32}P ($T_{1/2} = 14,28$ d) é muito usado como traçador das reações bioquímicas que envolvem o fósforo. (a) Se a taxa de contagem em um determinado experimento é inicialmente 3050 contagens/s, quanto tempo é necessário para que a taxa de contagem caia para 170 contagens/s? (b) Uma solução contendo ^{32}P é aplicada à raiz de um pé de tomate, e a atividade do ^{32}P em uma folha é medida 3,48 dias depois. Por que fator essa leitura deve ser multiplicada para compensar o efeito do decaimento ocorrido desde que o experimento começou?

78 Em uma certa rocha a razão entre o número de átomos de chumbo e o número de átomos de urânio é 0,300. Tome a meia-vida do urânio como sendo $4,47 \times 10^9$ anos e suponha que a rocha não continha chumbo quando se formou. Qual é a idade da rocha?

79 A Fig. 42-20 mostra parte da série de decaimentos do ^{237}Np em um gráfico do número de massa A em função do número atômico Z ; cinco retas, que representam decaimentos alfa e decaimentos beta, ligam pontos que representam isótopos. Qual é o isótopo ao final dos cinco decaimentos (assinalado com um ponto de interrogação na Fig. 42-20)?

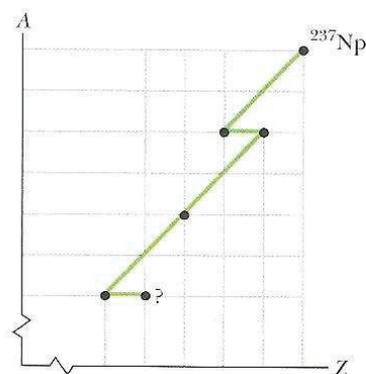


FIG. 42-20 Problema 79.

80 O elemento radioativo AA pode decair no elemento BB ou no elemento CC . A forma de decaimento é aleatória, mas a razão

entre o número resultante de átomos do elemento BB e os átomos do elemento CC é 2. O elemento AA tem uma meia-vida de 8,00 dias. Uma amostra contém inicialmente apenas o elemento AA . Após quanto tempo o número de átomos do elemento CC é 1,50 vez o número de átomos do elemento AA ?

81 A dose típica recebida em uma radiografia simples do tórax é $250 \mu\text{Sv}$, produzida por raios X com um fator RBE de 0,85. Supondo que um paciente tem uma massa de 88 kg e a massa do tecido exposto é metade da massa corporal, calcule a energia absorvida em joules.

82 Uma fonte de rádio contém 1,00 mg de ^{226}Ra , que decai com uma meia-vida de 1600 anos para produzir ^{222}Rn , um gás nobre. Esse isótopo do radônio, por sua vez, decai por emissão alfa com uma meia-vida de 3,82 d. Se o processo continua durante um intervalo de tempo muito mais longo que a meia-vida do ^{222}Rn a taxa de decaimento do ^{222}Rn atinge um valor-limite igual à taxa de produção do ^{222}Rn , que é aproximadamente constante por causa da meia-vida relativamente longa do ^{226}Ra . Para uma fonte nessas condições-limite determine (a) a atividade do ^{226}Ra , (b) a atividade do ^{222}Rn e (c) a massa total de ^{222}Rn .

83 Como um núcleon está confinado em um núcleo, podemos tomar a indeterminação Δx da posição do núcleon como sendo aproximadamente o raio r do núcleo e usar o princípio de indeterminação para calcular a indeterminação Δp do momento linear. Supondo que $p \approx \Delta p$ e que o núcleon é não-relativístico, calcule a energia cinética de um núcleon em um núcleo com $A = 100$.

84 Um núcleo de ouro tem um raio de 6,23 fm e uma partícula alfa tem um raio de 1,80 fm. Que energia deve ter uma partícula alfa incidente para “encostar” na superfície do núcleo de ouro? (Sugestão: Veja o Exemplo 42-1.)

85 Quantos anos são necessários para que a atividade do ^{14}C diminua para 0,020 do valor inicial? A meia-vida do ^{14}C é 5730 anos.

86 Quando uma amostra de prata é irradiada com nêutrons por um curto período de tempo dois isótopos radioativos se formam: ^{108}Ag ($T_{1/2} = 2,42$ min), com uma taxa de decaimento inicial de $3,1 \times 10^5/\text{s}$, e ^{110}Ag ($T_{1/2} = 24,6$ s), com uma taxa de decaimento inicial de $4,1 \times 10^6/\text{s}$. Faça um gráfico semilog semelhante ao da Fig. 42-8 mostrando a taxa de decaimento global em função do tempo entre $t = 0$ e $t = 10$ min. A Fig. 42-8 foi usada para ilustrar um método de determinação da meia-vida de um isótopo radioativo. Dado apenas o gráfico da taxa de decaimento global do sistema de dois isótopos, mostre que é possível analisá-lo e determinar as meias-vidas dos dois radioisótopos.

87 Um certo nuclídeo estável, depois de absorver um nêutron, emite um elétron, e o novo nuclídeo se divide espontaneamente

em duas partículas alfa. Identifique o nuclídeo.

88 Os nuclídeos pesados, que podem ser emissores alfa ou beta, pertencem a uma de quatro cadeias de decaimentos, caracterizadas por números de massa A da forma $4n$, $4n + 1$, $4n + 2$ ou $4n + 3$, onde n é um número inteiro positivo. (a) Justifique essa afirmação mostrando que se um nuclídeo pertencer a uma dessas famílias todos os produtos do decaimento pertencerão à mesma família. Determine a que família pertencem os seguintes nuclídeos: (b) ^{235}U , (c) ^{236}U , (d) ^{238}U , (e) ^{239}Pu , (f) ^{240}Pu , (g) ^{245}Cm , (h) ^{246}Cm , (i) ^{249}Cf e (j) ^{253}Fm .

89 Imagine um núcleo de ^{238}U como uma combinação de uma partícula alfa (^4He) e um núcleo residual (^{234}Th). Faça um gráfico da energia potencial eletrostática $U(r)$ em função de r , onde r é a distância entre as duas partículas, para $10 \text{ fm} < r < 100 \text{ fm}$. Compare o resultado com a Fig. 42-9.

90 A partir dos dados apresentados nos primeiros parágrafos da Seção 42-4, determine (a) a constante de desintegração λ e (b) a meia-vida do ^{238}U .

91 Faça uma carta de nuclídeos semelhante à da Fig. 42-5 para os 25 nuclídeos $^{118-122}\text{Te}$, $^{117-121}\text{Sb}$, $^{116-120}\text{Sn}$, $^{115-119}\text{In}$ e $^{114-118}\text{Cd}$. Trace e rotule (a) todas as retas isobáricas (A constante) e (b) todas as retas de excesso de nêutrons ($N - Z$) constante.

92 Localize na carta da Fig. 42-4 os nuclídeos que aparecem na Tabela 42-1 e mostre que estão na zona de estabilidade.

93 Se a unidade de massa atômica fosse definida de tal forma que a massa do ^1H tivesse o valor exato de 1,000 000 u, determine qual seria a massa (a) do ^{12}C (cuja massa é 12,000 000 u) e (b) do ^{238}U (cuja massa é 238,050 785 u).

94 Com o auxílio de uma carta de nuclídeos, escreva os símbolos (a) de todos os isótopos estáveis com $Z = 60$; (b) de todos os nuclídeos radioativos com $N = 60$; (c) de todos os nuclídeos com $A = 60$.

95 Medidas de espalhamento de elétrons revelam que o raio de um certo núcleo esférico é 3,6 fm. Qual é o número de massa do núcleo?

96 O tempo nuclear característico é uma grandeza útil mas vagamente definida, tomada como o tempo necessário para que um núcleon com uma energia cinética de alguns milhões de elétrons-volts percorra uma distância igual ao diâmetro de um nuclídeo de massa mediana. Qual é a ordem de grandeza desse tempo? Use a Eq. 42-3, supondo que os núcleons são nêutrons de 5 MeV e o diâmetro é o do núcleo de ^{197}Au .

97 Determine a energia de desintegração Q para o decaimento do ^{49}V por captura de um elétron da camada K (veja o Problema 56). Os dados necessários são os seguintes: $m_{\text{V}} = 48,948 52 \text{ u}$; $m_{\text{Ti}} = 48,947 87 \text{ u}$; $E_{\text{K}} = 5,47 \text{ keV}$.