

EXERCÍCIO 5 - PRINCÍPIOS DE MECÂNICA QUÂNTICA

RESUMO

Fótons As ondas eletromagnéticas (como a luz, por exemplo) são quantizadas e os quanta recebem o nome de *fótons*. Para uma onda eletromagnética de frequência f e comprimento de onda λ , a energia E e o momento p de um fóton são dados por

$$E = hf \quad (\text{energia do fóton}) \quad (38-2)$$

e
$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (\text{momento do fóton}). \quad (38-7)$$

Efeito Fotelétrico Quando uma onda luminosa incide em uma superfície metálica, a interação entre os fótons e os elétrons do metal pode fazer com que elétrons sejam emitidos da superfície, de acordo com a equação

$$hf = K_{\text{máx}} + \Phi, \quad (38-5)$$

onde hf é a energia dos fótons, $K_{\text{máx}}$ é a energia cinética máxima dos elétrons emitidos e Φ é a **função trabalho** do material de que é feito o alvo, ou seja, a energia mínima que um elétron deve adquirir para poder escapar do material. Quando $hf < \Phi$, o efeito fotoelétrico não é observado.

Deslocamento de Compton Quando raios X são espalhados por elétrons quase livres de um alvo, os raios X espalhados têm maior comprimento de onda que os raios X incidentes. Esse **deslocamento de Compton** (do comprimento de onda) é dado por

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \phi), \quad (38-11)$$

onde ϕ é o ângulo de espalhamento dos raios X.

Ondas Luminosas e Fótons Quando a luz interage com a matéria, energia e momento são transferidos através de fótons. Quando a luz não está interagindo com a matéria, pode ser interpretada como uma **onda de probabilidade** na qual a probabilidade (por unidade de tempo) de que um fóton seja detectado é proporcional a E_{e}^2 , onde E_{e} é a amplitude do campo elétrico associado à luz.

Ondas de Matéria Uma partícula em movimento, como um elétron ou um próton, pode ser descrita por uma **onda de matéria** cujo comprimento de onda (conhecido como **comprimento de onda de de Broglie**) é dado por $\lambda = h/p$, onde p é o momento da partícula.

Função de Onda Uma onda de matéria é descrita por uma **função de onda** $\psi(x, y, z, t)$ que pode ser separada em uma parte que depende apenas das coordenadas espaciais, $\psi(x, y, z)$ e uma parte que depende apenas da coordenada temporal, $e^{-iEt/\hbar}$. Para uma partícula de massa m que está se movendo sobre o eixo x com energia total constante E em uma região na qual a energia potencial é $U(x)$, a função $\psi(x)$ pode ser obtida resolvendo a **equação de Schrödinger** simplificada

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2} [E - U(x)]\psi = 0. \quad (38-15)$$

As ondas de matéria, como as ondas luminosas, são ondas de probabilidade no sentido de que se um detector de partículas for posicionado em um certo local, a probabilidade de que o detector registre a presença de uma partícula nesse local em um intervalo de tempo especificado é proporcional a $|\psi|^2$, uma grandeza conhecida como **densidade de probabilidade**.

No caso de uma partícula livre, isto é, de uma partícula que se move no eixo x com $U(x) = 0$, $|\psi|^2$ tem o mesmo valor para todos os pontos do eixo x .

Princípio de Indeterminação de Heisenberg A natureza probabilística da física quântica está associada a uma importante limitação para a medida da posição e momento de uma partícula: é impossível medir simultaneamente a posição \bar{r} e o momento \bar{p} de uma partícula com precisão ilimitada. As indeterminações das componentes dessas grandezas satisfazem as seguintes desigualdades:

$$\begin{aligned} \Delta x \cdot \Delta p_x &\geq \hbar \\ \Delta y \cdot \Delta p_y &\geq \hbar \\ \Delta z \cdot \Delta p_z &\geq \hbar. \end{aligned} \quad (38-20)$$

Efeito Túnel De acordo com a física clássica, uma partícula não consegue transpor uma barreira de energia potencial cuja altura seja maior que a energia cinética da partícula. Segundo a física quântica, por outro lado, existe uma probabilidade finita de que a partícula atravesse a barreira; é o chamado **efeito túnel**. A probabilidade de que uma partícula de massa m e energia E atravesse uma barreira de altura U_0 e largura L é dada pelo coeficiente de transmissão T :

$$T \approx e^{-2bt}, \quad (38-21)$$

onde
$$b = \sqrt{\frac{8\pi^2m(U_0 - E)}{h^2}}, \quad (38-22)$$

RESUMO

O Princípio de Confinamento O princípio de confinamento se aplica a ondas de todos os tipos, como as ondas em uma corda, as ondas do mar, as ondas luminosas e as ondas de matéria da física quântica. De acordo com esse princípio, o confinamento de uma onda leva à quantização, ou seja, à existência de estados discretos com energias discretas. Estados intermediários com valores intermediários de energia não são possíveis.

Um Elétron em um Poço de Potencial Infinito Um elétron pode ser confinado em um poço de potencial infinito. De acordo com o princípio de confinamento, a onda de matéria associada a um elétron confinado pode ter apenas estados discretos. No caso de um poço de potencial infinito unidimensional, as energias associadas a esses *estados quânticos* são dadas por

$$E_n = \left(\frac{h^2}{8mL^2} \right) n^2, \quad \text{para } n = 1, 2, 3, \dots, \quad (39-4)$$

onde L é a largura do poço de potencial e n é um **número quântico**. Quando um elétron passa de um estado para outro, sofre uma variação de energia dada por

acordo com o **princípio de correspondência**, segundo o qual os resultados da mecânica quântica tendem para os resultados na mecânica clássica quando os números quânticos tendem a infinito.

Normalização e Energia de Ponto Zero A amplitude A^2 na Eq. 39-12 pode ser determinada a partir da **equação de normalização**,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi_n^2(x) dx = 1, \quad (39-14)$$

segundo a qual o elétron deve ser encontrado em *algum ponto* do interior do poço, já que probabilidade 1 significa certeza.

De acordo com a Eq. 39-4, a menor energia permitida para o elétron não é zero e sim a energia correspondente a $n = 1$. Essa energia mínima é chamada de **energia de ponto zero** do sistema.

Um Elétron em um Poço de Potencial Finito Em um poço de potencial finito, existe uma diferença de potencial finita, U_0 , entre a energia potencial do lado de fora do poço e a energia potencial no interior. A função de onda de um elétron confinado em um poço desse tipo é diferente de zero em pontos fora do poço; isso significa que existe uma probabilidade finita de que o elétron consiga escapar do poço.

O Átomo de Hidrogênio Tanto o modelo (incorreto) de Bohr para o átomo de hidrogênio como a aplicação (correta) da equação de Schrödinger ao mesmo átomo mostram que os níveis de energia quantizados do átomo de hidrogênio são dados por

$$\Delta E = E_{\text{alta}} - E_{\text{baixa}}, \quad (39-5)$$

onde E_{alta} é a energia do estado de maior energia e E_{baixa} é a energia do estado de menor energia. Quando a mudança ocorre por absorção ou emissão de um fóton, a energia do fóton deve ser

$$hf = \Delta E = E_{\text{alta}} - E_{\text{baixa}}, \quad (39-6)$$

As **funções de onda** associadas aos estados quânticos são

$$\psi_n(x) = A \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right), \quad \text{para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (39-10)$$

A probabilidade de que um elétron seja detectado no intervalo entre x e $x + dx$ é $\psi_n^2(x)dx$, onde $\psi_n^2(x)$ é a **densidade de probabilidade** do estado em que se encontra o elétron. No caso de um elétron em um poço infinito, as densidades de probabilidade são dadas por

$$\psi_n^2(x) = A^2 \sin^2\left(\frac{n\pi}{L}x\right), \quad \text{para } n = 1, 2, 3, \dots \quad (39-12)$$

Para valores elevados do número quântico n , o elétron tende a se comportar como uma partícula clássica, ocupando todos os pontos do poço com igual probabilidade. Esse comportamento está de

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{13,60 \text{ eV}}{n^2}, \quad (39-32, 39-33)$$

para $n = 1, 2, 3, \dots$

De acordo com as Eqs. 39-32 e 39-33, se o átomo sofre uma transição entre dois níveis de energia causada pela emissão ou absorção de um fóton de luz, o comprimento de onda da luz é dado por

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_{\text{baixo}}^2} - \frac{1}{n_{\text{alto}}^2} \right), \quad (39-36)$$

onde

$$R = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} = 1,097\,373 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \quad (39-37)$$

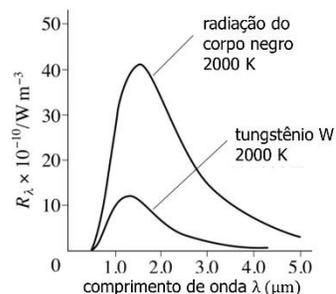
é a *constante de Rydberg*.

Lista adicional:

1. Mostrar que a energia de um fóton (em eV) está relacionada com o comprimento de onda (em nm) por

$$E = \frac{1240}{\lambda} \text{ (eV)}$$

2. Na figura a radiância espectral do tungstênio a 2.000 K é comparada com a radiância espectral de *um irradiador de cavidade ideal ou corpo negro*. A radiância total R é definida pela área entre a curva e o eixo das abscissas (comprimentos de onda λ). Supor que para o tungstênio a radiância total seja igual a $23,3 \text{ W/cm}^2$. Calcular a emissividade ϵ do tungstênio a 2.000 K.

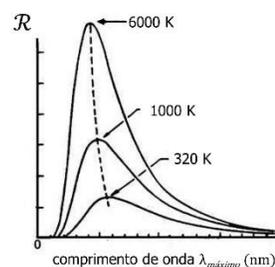


(Resposta: $\epsilon = 0,259$)

3. Em um aposento à temperatura $T_{\text{ambiente}} = 27^\circ\text{C}$ encontra-se um forno, cuja temperatura interna é igual a 227°C e que possui, em um de seus lados, uma pequena abertura de área igual a $5,0 \text{ cm}^2$. Determinar a potência líquida transferida para o aposento. (*Sugestão*: considerar o forno e o aposento como cavidades).

(Resposta: $1,54 \text{ W}$)

4. Considere um irradiador de cavidade ideal. Utilize para a constante da Lei de Deslocamento de Wien o valor de $2,898 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$. Determine o comprimento de onda para o qual a emissão assume seu valor máximo para as seguintes temperaturas: **(a)** 6.000 K; **(b)** 2.000 K; **(c)** 1.000 K; **(d)** 320 K.



(Resposta: (a) 4.800 \AA ; (b) $1,45 \text{ }\mu\text{m}$; (c) $2,90 \text{ }\mu\text{m}$; (d) $9,06 \text{ }\mu\text{m}$)

5. Um certo fóton de raio X tem o comprimento de onda de 35 pm . Calcular **(a)** a energia do fóton; **(b)** a frequência do fóton; **(c)** o momento do fóton.

(Resposta: **(a)** $35,4 \text{ keV}$; **(b)** $8,57 \times 10^{18} \text{ Hz}$; **(c)** $1,89 \times 10^{-23} \text{ kg}\cdot\text{m/s}$)

6. Deseja-se escolher uma substância para fotocélula, que irá operar pelo efeito fotoelétrico, com luz visível. As substâncias disponíveis são (com seus valores de função trabalho): tântalo ($4,2 \text{ eV}$); tungstênio ($4,5 \text{ eV}$); alumínio ($4,2 \text{ eV}$); bário ($2,5 \text{ eV}$); lítio ($2,3 \text{ eV}$). Qual (ou quais) seria (m) escolhida(s)?

(Resposta: bário ou lítio)

7. Uma luz de comprimento de onda igual a 5.890 \AA incide sobre uma superfície metálica. O potencial que freia os elétrons e os impede de atingir a outra placa é $0,36 \text{ V}$. Calcular:

(a) a energia máxima dos elétrons emitidos; **(b)** a função trabalho deste metal; **(c)** o comprimento de onda de corte.

(Resposta: **(a)** $0,36 \text{ eV}$; **(b)** $E_0 = 1,8 \text{ eV}$; **(c)** 6.900 \AA)

8. Fótons incidentes atingem uma superfície de sódio com uma função trabalho $E_0 = 2,2$ eV, dando lugar a emissão fotoelétrica. Ao se impor o potencial de corte $V_0 = 4,5$ V, deixa de haver fotocorrente. Determine o comprimento de onda dos fótons incidentes.

(Resposta: 1852 Å)

9. A função trabalho do tungstênio é 4,50 eV. Calcular a velocidade dos fotoelétrons mais energéticos emitidos por uma película de tungstênio, iluminada por uma luz, cujos fótons tem a energia de 5,80 eV.

(Resposta: 676 km/s)

10. A energia necessária para remover um elétron do átomo de sódio é 2,3 eV. Se o sistema for iluminado por luz alaranjada de comprimento de onda 6.800 Å, haverá ou não efeito fotoelétrico?

(Resposta: Não.)

11. Um átomo absorve um fóton de 3.750 Å e emite outro fóton de 5.800 Å. Determine a variação de energia absorvida ou emitida no processo e seu valor.

(Resposta: absorvida, 1,17 eV)

12. Determinar a energia cinética máxima de fotoelétrons, supondo que a função trabalho do material seja $2,5 \times 10^{-19}$ J e a frequência de radiação seja $3,0 \times 10^{15}$ Hz.

(Resposta: 10,85 eV)

13. Um fóton de raios X de comprimento de onda 0,10 Å, atinge um elétron frontalmente ($\phi = 180^\circ$). Determinar: **(a)** a variação de comprimento de onda do fóton; **(b)** a variação na energia do fóton; **(c)** a energia cinética final do elétron.

(Resposta: **(a)** 0,049 Å; **(b)** -41 keV; **(c)** 41 keV)

14. Fótons de comprimento de onda 0,024 Å incidem sobre elétrons livres. Determinar: **(a)** o comprimento de onda de um fóton que é espalhado a 30° a partir da direção incidente; **(b)** o mesmo para um ângulo de espalhamento de 120° .

(Resposta: **(a)** 0,027 Å; **(b)** 0,060 Å)

15. Usando o modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio, escreva as equações apropriadas para a determinação das seguintes grandezas: **(a)** o raio da órbita; **(b)** a velocidade do elétron em cada órbita; **(c)** o momento angular do elétron em cada órbita; **(d)** a energia cinética do elétron; **(e)** a energia total do elétron.

(Resposta: **(a)** o raio da órbita; **(b)** a velocidade do elétron em cada órbita; **(c)** o momento angular do elétron em cada órbita; **(d)** a energia cinética do elétron; **(e)** a energia total do elétron.)

16. Determinar: **(a)** e energia; **(b)** o momento; **(c)** o comprimento de onda do fóton emitido quando um átomo de hidrogênio sofre uma transição do estado $n = 3$ para o estado com $n = 1$.
constante de Rydberg $R = 1,0 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

(Resposta: **(a)** 12 eV; **(b)** $6,5 \times 10^{-27} \text{ kg}\cdot\text{m/s}$; **(c)** 1.020 Å)

17. Luz de comprimento de onda de 4.863 \AA é emitida por um átomo de hidrogênio. **(a)** Determine a transição do átomo de hidrogênio responsável por essa radiação; **(b)** Determine a série a qual pertence essa radiação.

(Resposta: (a) $n = 4$ para $n = 2$; (b) Série de Balmer)

18. Realizando uma experiência de efeito fotoelétrico, com luz de determinada frequência, é necessário para anular a corrente, um potencial de $-1,25 \text{ V}$. Determinar (a) energia cinética máxima, (b) velocidade máxima dos fotoelétrons emitidos.

(Resposta: (a) $K_{\text{máx}} = 1,25 \text{ eV}$; (b) $v_{\text{máx}} = 6.63 \times 10^5 \text{ m/s}$)

19. Para um certo material do cátodo de uma experiência de efeito fotoelétrico, verifica-se um potencial de corte igual a $1,0 \text{ V}$, para luz de 600 nm ; $2,0 \text{ V}$ para 400 nm e $3,0 \text{ V}$ para 300 nm . Determinar (a) função trabalho para o material, (b) a constante de Planck.

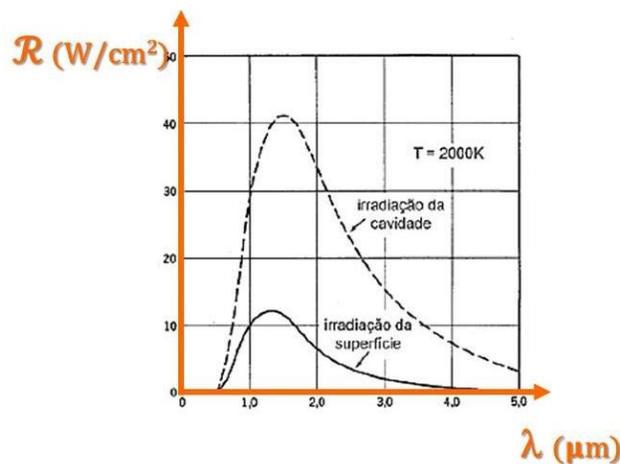
(Resposta: (a) $E_0 = 1,0 \text{ eV}$; (b) $h = 6.4 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

20. Qual o comprimento de onda de *de Broglie* de um elétron com energia cinética igual a 120 eV ?

(Resposta: $\lambda = 1.12 \text{ \AA}$)

21. Utilize o gráfico da figura para responder a questão.

- Considere da área sob o gráfico, faça uma estimativa da radiância da cavidade, para a temperatura de 2000K .
- Determine a razão entre a radiância da superfície do tungstênio a 2000K ($23,5\text{W}/\text{cm}^2$) e a radiância da cavidade na mesma temperatura.



(Resposta: (a) Cerca de $90 \text{ W}/\text{cm}^2$; (b) $0,26$.

Esse valor comparativo é denominado emissividade (e) do material, para aquela temperatura. A tabela a seguir apresenta os valores exatos, para três metais distintos

metal	emissividade (a 2000K)
molibdênio	0,212
tântalo	0,232
tungstênio	0,259

22. Diz a lei de Stefan - Boltzmann:

“A radiância de um corpo negro é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta:

$$\mathfrak{R} = \sigma T^4, \text{ onde } \sigma \text{ é a constante de Stefan - Boltzmann}”$$

- (a) Utilize a análise dimensional e determine a unidade SI da constante de Stefan - Boltzmann.
(b) Sabendo que a radiância de um corpo negro a 2000 K é de 90 W/cm², determine o valor de σ , em unidades SI.
(c) Determine a radiância de um corpo negro a 4000 K.

(Resposta: (a) W/(m².K⁴); (b) b) 5,6 x 10⁻⁸ W/ W/(m².K⁴) O valor correto, com três algarismos, é 5,67 x 10⁻⁸ W/(m².K⁴); (c) c) 24 vezes maior, ou seja, 16 x 90 = 1440 W/cm²)

23. Diz a lei de Wien:

“Na emissão de um corpo negro, o comprimento de onda da radiação dominante é inversamente proporcional à temperatura absoluta: $\lambda_{\text{máx}} \cdot T = \text{constante}$ ”

- (a) Utilize a análise dimensional e determine a unidade SI da constante da lei de Wien.
(b) A partir do gráfico da figura do exercício 21, faça uma estimativa do valor dessa constante, em unidades SI.
(c) Consulte a resposta do item (b) e determine, com o valor que lá se encontra, a temperatura mínima de um corpo negro para que a frequência dominante seja visível (dado: $f_{\text{vermelho}} = 4,8 \times 10^{14}$ Hz).

(Resposta: (a) m.K; (b) Algo próximo de 3 x 10⁻³ m.K. O valor correto, com três algarismos, é 2,90 x 10⁻³ m.K; (c) 4,64 x 10³ K)

Exercícios extraídos do livro Fundamentos de Física – volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica – 9ª. edição – cap39. Autores: Halliday, Resnick & Walker – Editora LTC – Tradução Ronaldo Sergio de Biasi. – 2012.

•2 Que velocidade deve ter um elétron para que sua energia cinética seja igual à energia dos fótons de uma luz de sódio com um comprimento de onda de 590 nm?

•6 A luz amarela de uma lâmpada de vapor de sódio usada em iluminação pública é mais intensa em um comprimento de onda de 589 nm. Qual é a energia dos fótons com esse comprimento de onda?

- 29 Um feixe de raios X tem um comprimento de onda de 35,0 pm. (a) Qual é a frequência correspondente? Determine (b) a energia dos fótons do feixe e (c) o momento dos fótons do feixe, em keV/c .
- 42 Calcule o comprimento de onda de de Broglie (a) de um elétron de 1,00 keV; (b) de um fóton de 1,00 keV; (c) de um nêutron de 1,00 keV.
- 43 No tubo de imagem de um velho aparelho de televisão, os elétrons são acelerados por uma diferença de potencial de 25,0 kV. Qual é o comprimento de onda de de Broglie desses elétrons? (Não
- 45 Íons de sódio monoionizados são acelerados por uma diferença de potencial de 300 V. (a) Qual é o momento final dos íons? (b) Qual é o comprimento de de Broglie correspondente?
- 47 O comprimento de onda da linha amarela do sódio é 590 nm. Qual é a energia cinética de um elétron cujo comprimento de onda de de Broglie é igual ao comprimento de onda da linha amarela do sódio?
- 49 Calcule o comprimento de onda (a) de um fóton com uma energia de 1,00 eV; (b) de um elétron com uma energia de 1,00 eV; (c) de um fóton com uma energia de 1,00 GeV; (d) de um elétron com uma energia de 1,00 GeV.
- 50 Um elétron e um fóton têm o mesmo comprimento de onda, 0,20 nm. Calcule o momento (em $\text{kg} \cdot \text{m/s}$) (a) do elétron e (b) do fóton. Calcule a energia (em eV) (c) do elétron e (d) do fóton.

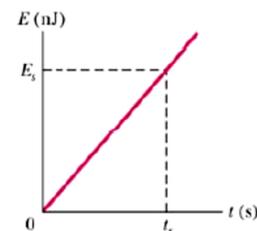
Os exercícios foram extraídos do Livro Halliday & Resnick – Fundamentos de Física, 9ª edição. Cap38 e 39 – volume 4

Seção 38-2 O Fóton, o Quantum da Luz

- 1 Um feixe de luz monocromática é absorvido por um filme fotográfico e fica registrado no filme. Um fóton é absorvido pelo filme se a energia do fóton for igual ou maior que a energia mínima de 0,6 eV necessária para dissociar uma molécula de AgBr do filme. (a) Qual é o maior comprimento de onda que pode ser registrado no filme? (b) A que região do espectro eletromagnético pertence esse comprimento de onda?
- 2 Que velocidade deve ter um elétron para que sua energia cinética seja igual à energia dos fótons de uma luz de sódio com um comprimento de onda de 590 nm?
- 3 Quantos fótons o Sol emite por segundo? Para simplificar o cálculo, suponha que a potência luminosa emitida pelo Sol é constante e igual a $3,9 \times 10^{26}$ W e que toda a radiação do Sol é emitida no comprimento de onda de 550 nm.
- 4 Um laser de hélio-neônio emite luz vermelha com um comprimento de onda $\lambda = 633$ nm, em um feixe de 3,5 mm de diâmetro, com uma potência de 5,0 mW. Um detector colocado à frente do laser absorve totalmente a luz do feixe. Qual é o número de fótons absorvidos pelo detector por unidade de área e por unidade de tempo?
- 5 O metro já foi definido como 1.650.763,73 comprimentos de onda da luz laranja emitida por átomos de criptônio 86. Qual é a energia dos fótons com esse comprimento de onda?
- 6 A luz amarela de uma lâmpada de vapor de sódio usada em iluminação pública é mais intensa em um comprimento de onda de 589 nm. Qual é a energia dos fótons com esse comprimento de onda?
- 7 Um detector de luz (o olho humano) tem uma área de $2,00 \times 10^{-6}$ m² e absorve 80% da luz incidente, cujo comprimento de onda é 500 nm. O detector é colocado diante de uma fonte luminosa isotrópica, a 3,00 m da fonte. Se o detector absorve fótons à taxa de exatamente 4.000 s⁻¹, qual é a potência da fonte?
- 8 O feixe produzido por um laser de argônio ($\lambda = 515$ nm) de 1,5 W tem um diâmetro d de 3,00 mm. O feixe é focalizado por um sistema de lentes com uma distância focal efetiva f_L de 2,5 mm. O feixe focalizado incide em uma tela totalmente absorvente, onde forma uma figura de difração circular cujo disco central tem um raio R dado por $1,22\lambda_L/d$. É possível demonstrar que 84% da energia incidente está concentrada nesse disco central. Quantos fótons são absorvidos por segundo pela tela no disco central da figura de difração?
- 9 Uma lâmpada de sódio de 100 W ($\lambda = 589$ nm) irradia energia uniformemente em todas as direções. (a) Quantos fótons por segundo são emitidos pela lâmpada? (b) A que distância da lâmpada uma tela

totalmente absorvente absorve fótons à taxa de 1,00 fóton/cm² · s? (c) Qual é o fluxo de fótons (fótons por unidade de área e por unidade de tempo) em uma pequena tela situada a 2,00 m da lâmpada?

- 10 Um satélite em órbita em torno da Terra utiliza um painel de células solares com uma área de 2,60 m², que é mantido perpendicular à direção dos raios solares. A intensidade da luz que incide no painel é 1,39 kW/m². (a) Qual é potência luminosa incidente no painel? (b) Quantos fótons por segundo são absorvidos pelo painel? Suponha que a radiação solar seja monocromática, com um comprimento de onda de 550 nm, e que toda a radiação solar que incide no painel seja absorvida. (c) Quando tempo é necessário para que um “mol de fótons” seja absorvido pelo painel?
- 11 Uma lâmpada ultravioleta emite luz com um comprimento de onda de 400 nm, com uma potência de 400 W. Uma lâmpada infravermelha emite luz com um comprimento de onda de 700 nm, também com uma potência de 400 W. (a) Qual das duas lâmpadas emite mais fótons por segundo? (b) Quantos fótons por segundo essa lâmpada emite?
- 12 Em condições ideais, o sistema de visão humano é capaz de perceber uma luz com um comprimento de onda de 550 nm se os fótons forem absorvidos pela retina à razão de pelo menos 100 fótons por segundo. Qual é a potência luminosa absorvida pela retina nessas condições?
- 13 Um tipo especial de lâmpada emite luz monocromática com um comprimento de onda de 630 nm. A lâmpada consome uma potência elétrica de 60 W e converte a eletricidade em energia luminosa com uma eficiência de 93%. Quantos fótons são emitidos pela lâmpada durante sua vida útil de 730 h?
- 14 Um detector de luz possui uma área útil de $2,00 \times 10^{-6}$ m² e absorve 50% da luz incidente, cujo comprimento de onda é 600 nm. O detector é colocado diante de uma fonte luminosa isotrópica, a 12,0 m da fonte. A Fig. 38-24 mostra a energia E emitida pela fonte em função do tempo t . A escala do eixo vertical é definida por $E_s = 7,2$ nJ e a escala do eixo horizontal é definida por $t_s = 2,0$ s. Quantos fótons por segundo são absorvidos pelo detector?



Seção 38-3 O Efeito Fotelétrico

- 15 Um feixe luminoso incide na superfície de uma placa de sódio,

Figura 38-24 Problema 14.

produzindo uma emissão fotoelétrica. O potencial de corte dos elétrons ejetados é 5,0 V e a função trabalho do sódio é 2,2 eV. Qual é o comprimento de onda da luz incidente?

•16 Determine a energia cinética máxima dos elétrons ejetados de um certo material se a função trabalho do material é 2,3 eV e a frequência da radiação incidente é $3,0 \times 10^{15}$ Hz.

•17 A função trabalho do tungstênio é 4,50 eV. Calcule a velocidade dos elétrons mais rápidos ejetados da superfície de uma placa de tungstênio quando fótons com uma energia de 5,80 eV incidem na placa.

•18 O leitor precisa escolher um elemento para uma célula fotoelétrica que funcione com luz visível. Quais dos seguintes elementos são apropriados (a função trabalho aparece entre parênteses): tântalo (4,2 eV); tungstênio (4,5 eV); alumínio (4,2 eV); bário (2,5 eV); lítio (2,3 eV)?

•19 (a) Se a função trabalho de um certo metal é 1,8 eV, qual é o potencial de corte dos elétrons ejetados quando uma luz com um comprimento de onda de 400 nm incide no metal? (b) Qual é a velocidade máxima dos elétrons ejetados?

•20 A eficiência relativa de uma superfície de césio (cuja função trabalho é 1,80 eV) é $1,0 \times 10^{-16}$, o que significa que, em média, um elétron é ejetado para cada 10^{16} fótons que incidem na superfície. Qual é a corrente elétrica produzida pelos elétrons ejetados de uma placa de césio iluminada pela luz de 600 nm produzida por um laser de 2,00 mW? Suponha que todos os elétrons ejetados contribuam para a corrente.

•21 Um feixe de raios X com um comprimento de onda de 71 pm incide em uma folha de ouro e ejeta elétrons firmemente presos aos átomos de ouro. Os elétrons ejetados descrevem órbitas circulares de raio r na presença de um campo magnético uniforme \vec{B} . Para os elétrons ejetados de maior velocidade, $Br = 1,88 \times 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{m}$. Determine (a) a energia cinética máxima dos elétrons; (b) o trabalho executado para remover esses elétrons dos átomos de ouro.

•22 O comprimento de onda correspondente à frequência de corte da prata é 325 nm. Determine a energia cinética máxima dos elétrons ejetados de uma placa de prata iluminada por luz ultravioleta com um comprimento de onda de 254 nm.

•23 Uma placa de alumínio é iluminada por luz com um comprimento de onda de 200 nm. No alumínio, uma energia de 4,20 eV é necessária para que um elétron seja ejetado. Qual é a energia cinética (a) do elétron ejetado mais rápido? (b) do elétron ejetado mais lento? (c) Qual é o potencial de corte? (d) Qual é o comprimento de onda de corte do alumínio?

•24 Em um experimento do efeito fotoelétrico usando uma placa de sódio, é encontrado um potencial de corte de 1,85 V para um comprimento de onda de 300 nm e um potencial de corte de 0,820 V para um comprimento de onda de 400 nm. A partir desses dados, determine (a) o valor da constante de Planck (b) a função trabalho Φ do sódio; (c) a comprimento de onda de corte λ_0 do sódio.

•25 O potencial de corte para elétrons emitidos de uma superfície iluminada por uma luz com um comprimento de onda de 491 nm é 0,710 V. Quando o comprimento de onda da luz incidente é mudado para um novo valor, o potencial de corte muda para 1,43 V. (a) Qual é o valor do novo comprimento de onda? (b) Qual é a função trabalho da superfície?

•26 A luz solar pode ejetar elétrons da superfície de um satélite em órbita, carregando-o eletricamente; os projetistas de satélites procuram minimizar este efeito através de revestimentos especiais.

Suponha que um satélite seja revestido de platina, um metal com uma função trabalho muito elevada ($\Phi = 5,32$ eV). Determine o maior comprimento de onda da luz solar incidente que é capaz de ejetar elétrons de uma superfície revestida com platina.

Seção 38-4 Os Fótons Possuem Momento

•27 Um feixe luminoso com um comprimento de onda de 2,40 pm incide em um alvo que contém elétrons livres. (a) Determine o comprimento de onda da luz espalhada a 30° com a direção do feixe incidente. (b) Faça o mesmo para um ângulo de espalhamento de 120° .

•28 (a) Qual é o momento, em MeV/c, de um fóton cuja energia é igual à energia de repouso de um elétron? Quais são (b) o comprimento de onda e (c) a frequência da radiação correspondente?

•29 Um feixe de raios X tem um comprimento de onda de 35,0 pm. (a) Qual é a frequência correspondente? Determine (b) a energia dos fótons do feixe e (c) o momento dos fótons do feixe, em keV/c.

•30 Qual é o máximo deslocamento do comprimento de onda possível para uma colisão de Compton entre um fóton e um próton livre?

•31 Que aumento percentual do comprimento de onda leva a uma perda de 75% da energia do fóton em uma colisão entre um fóton e um elétron livre?

•32 Um feixe de raios X com um comprimento de onda de 0,0100 nm, no sentido positivo do eixo x , incide em um alvo que contém elétrons quase livres. Para o espalhamento de Compton a 180° de um fóton por um destes elétrons, determine (a) o deslocamento de Compton; (b) a variação da energia do fóton; (c) a energia cinética do elétron após o espalhamento; (d) o ângulo entre o semieixo x positivo e a direção de movimento do elétron após o espalhamento.

•33 Calcule a variação percentual da energia do fóton em uma colisão como a da Fig. 38-5 para $\phi = 90^\circ$ e uma radiação (a) na faixa de micro-ondas, com $\lambda = 3,0$ cm; (b) na faixa da luz visível, com $\lambda = 500$ nm; (c) na faixa dos raios X, com $\lambda = 25$ pm; (d) na faixa dos raios gama, com uma energia de 1,0 MeV por fóton. (e) O que pensa o leitor a respeito da possibilidade de detectar o deslocamento de Compton nestas regiões do espectro eletromagnético, usando apenas o critério da perda de energia em um único espalhamento fóton-elétron?

•34 Um fóton sofre espalhamento Compton por parte de um elétron livre estacionário. O ângulo de espalhamento é $90,0^\circ$ em relação à direção inicial e o comprimento de onda inicial é $3,00 \times 10^{-12}$ m. Qual é a energia cinética do elétron?

•35 Determine o comprimento de onda de Compton (a) de um elétron; (b) de um próton. Qual é a energia dos fótons de uma onda eletromagnética com um comprimento de onda igual ao comprimento de onda de Compton (c) do elétron; (d) do próton?

•36 Um feixe de raios gama cujos fótons têm uma energia de 0,511 MeV incide em um alvo de alumínio e é espalhado em várias direções por elétrons quase livres do alvo. (a) Qual é o comprimento de onda dos raios gama incidentes? (b) Qual é o comprimento de onda dos raios gama espalhados a $90,0^\circ$ com o feixe incidente? (c) Qual é a energia dos fótons espalhados nessa direção?

•37 Considere uma colisão entre um fóton de raios X de energia inicial 50,0 keV e um elétron em repouso na qual o fóton é espalhado para trás e o elétron é espalhado para a frente. (a) Qual é a energia do fóton espalhado? (b) Qual é a energia cinética do elétron espalhado?

****38** Mostre que se um fóton de energia E for espalhado por um elétron livre em repouso, a energia cinética máxima do elétron espalhado será

$$K_{\max} = \frac{E^2}{E + mc^2/2}.$$

****39** Qual deve ser o ângulo de espalhamento de um fóton de 200 keV por um elétron livre para que o fóton perca 10% da energia?

****40** Qual é a energia cinética máxima dos elétrons ejetados de uma folha fina de cobre pelo espalhamento de Compton de um feixe de raios X com uma energia de 17,5 keV? Suponha que a função trabalho pode ser desprezada.

****41** Determine (a) o deslocamento de Compton $\Delta\lambda$; (b) o deslocamento de Compton relativo $\Delta\lambda/\lambda$; (c) a variação da energia ΔE de um fóton pertencente a um feixe luminoso com um comprimento de onda $\lambda = 590$ nm espalhado por um elétron livre, inicialmente estacionário, se o ângulo de espalhamento do fóton for 90° em relação à direção do feixe incidente. Determine (d) $\Delta\lambda$; (e) $\Delta\lambda/\lambda$ e (f) ΔE para o espalhamento a 90° se o fóton tiver uma energia de 50,0 keV (faixa dos raios X).

Seção 38-6 Elétrons e Ondas de Matéria

****42** Calcule o comprimento de onda de de Broglie (a) de um elétron de 1,00 keV; (b) de um fóton de 1,00 keV; (c) de um nêutron de 1,00 keV.

****43** No tubo de imagem de um velho aparelho de televisão, os elétrons são acelerados por uma diferença de potencial de 25,0 kV. Qual é o comprimento de onda de de Broglie desses elétrons? (Não é necessário levar em conta efeitos relativísticos.)

****44** A resolução de um microscópio eletrônico (menor dimensão linear que pode ser observada) é igual ao comprimento de onda dos elétrons. Qual é a tensão de aceleração dos elétrons necessária para que um microscópio eletrônico tenha a mesma resolução que um microscópio ótico operando com raios gama de 100 keV?

****45** Íons de sódio monoionizados são acelerados por uma diferença de potencial de 300 V. (a) Qual é o momento final dos íons? (b) Qual é o comprimento de de Broglie correspondente?

****46** Elétrons com uma energia cinética de 50 GeV têm um comprimento de onda de de Broglie λ tão pequeno que podem ser usados para estudar detalhes da estrutura do núcleo atômico através de colisões. Essa energia é tão grande que a relação relativística extrema $p = E/c$ entre o momento p e a energia E pode ser usada. (Nessa situação extrema, a energia cinética de um elétron é muito maior que a energia de repouso.) (a) Qual é o valor de λ ? (b) Se os núcleos do alvo têm um raio $R = 5,0$ fm, qual é o valor da razão R/λ ?

****47** O comprimento de onda da linha amarela do sódio é 590 nm. Qual é a energia cinética de um elétron cujo comprimento de onda de de Broglie é igual ao comprimento de onda da linha amarela do sódio?

****48** Um feixe de prótons que se movem com uma velocidade de $0,9900c$ incide em um anteparo com duas fendas separadas por uma distância de $4,00 \times 10^{-9}$ m. Uma figura de interferência é observada em uma tela. Qual é o ângulo entre o centro da figura e o segundo mínimo?

****49** Calcule o comprimento de onda (a) de um fóton com uma energia de 1,00 eV; (b) de um elétron com uma energia de 1,00 eV; (c) de um fóton com uma energia de 1,00 GeV; (d) de um elétron com uma energia de 1,00 GeV.

****50** Um elétron e um fóton têm o mesmo comprimento de onda, 0,20 nm. Calcule o momento (em $\text{kg} \cdot \text{m/s}$) (a) do elétron e (b) do fóton. Calcule a energia (em eV) (c) do elétron e (d) do fóton.

****51** A resolução de um microscópio depende do comprimento de onda usado; o menor objeto que pode ser resolvido tem dimensões da ordem do comprimento de onda. Suponha que estamos interessados em “observar” o interior do átomo. Como um átomo tem um diâmetro da ordem de 100 pm, isso significa que devemos ser capazes de resolver dimensões da ordem de 10 pm. (a) Se um microscópio eletrônico for usado para este fim, qual deverá ser, no mínimo, a energia dos elétrons? (b) Se um microscópio ótico for usado, qual deverá ser, no mínimo, a energia dos fótons? (c) Qual dos dois microscópios parece ser mais prático? Por quê?

****52** O núcleo atômico foi descoberto em 1911 por Ernest Rutherford, que interpretou corretamente uma série de experimentos nos quais um feixe de partículas alfa era espalhado por folhas finas de metais com o ouro, a prata e o cobre. (a) Se as partículas alfa tinham uma energia cinética de 7,5 MeV, qual era o comprimento de onda de de Broglie das partículas? (b) A natureza ondulatória das partículas alfa deveria ter sido levada em conta na interpretação dos experimentos? A massa de uma partícula alfa é 4,00 u (unidades de massa atômica) e a distância de máxima aproximação entre as partículas alfa e o centro do núcleo nos experimentos era da ordem de 30 fm. (A natureza ondulatória da matéria só foi descoberta mais de uma década após a realização desses experimentos.)

****53** Uma partícula não relativística está se movendo três vezes mais depressa que um elétron. A razão entre o comprimento de onda de de Broglie da partícula e o comprimento de onda de de Broglie do elétron é $1,813 \times 10^{-4}$. Identifique a partícula, calculando sua massa.

****54** Determine (a) a energia de um fóton com um comprimento de onda de 1,00 nm; (b) a energia cinética de um elétron com um comprimento de onda de de Broglie de 1,00 nm; (c) a energia de um fóton com um comprimento de onda de 1,00 fm; (d) a energia cinética de um elétron com um comprimento de onda de de Broglie de 1,00 fm.

****55** Se o comprimento de onda de de Broglie de um próton é 100 fm, (a) qual é a velocidade de próton? (b) A que diferença de potencial deve ser submetido o próton para chegar a essa velocidade?

Seção 38-7 A Equação de Schrödinger

****56** Suponha que tivéssemos feito $A = 0$ na Eq. 38-17 e chamado B de ψ_0 . (a) Qual seria a função de onda resultante? (b) Haveria alguma modificação na Fig. 38-12?

****57** A função $\psi(x)$ da Eq. 38-19 descreve uma partícula livre para a qual supusemos que $U(x) = 0$ na equação de Schrödinger (Eq. 38-15). Suponha que $U(x) = U_0$, onde U_0 é uma constante. Mostre que a Eq. 38-19 continua a ser uma solução da equação de Schrödinger, mas o valor do número de onda angular k da partícula passa a ser dado por

$$k = \frac{2\pi}{h} \sqrt{2m(E - U_0)}$$

****58** Suponha que $A = B = \psi_0$ na Eq. 38-18. Nesse caso, a equação representa a soma de duas ondas de matéria de mesma amplitude, propagando-se em sentidos opostos. (Lembre-se de que essa é a condição para uma onda estacionária.) (a) Mostre que, para esses valores de A e B , $|\psi(x,t)|^2$ é dado por

$$|\Psi(x, t)|^2 = 2\psi_0^2[1 + \cos 2kx].$$

(b) Plote essa função e mostre que representa o quadrado da amplitude de uma onda estacionária. (c) Mostre que os nós da onda estacionária estão situados nos pontos para os quais

$$x = (2n + 1)\left(\frac{\lambda}{4}\right), \quad \text{onde } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

e λ é o comprimento de onda de de Broglie da partícula. (d) Escreva uma expressão do mesmo tipo para as posições mais prováveis da partícula.

••59 Demonstre que a Eq. 38-17 é uma solução da Eq. 38-16 substituindo $\psi(x)$ e a derivada segunda de $\psi(x)$ na Eq. 38-16 e mostrando que o resultado é uma identidade.

••60 (a) Escreva a função de onda $\psi(x)$ da Eq. 38-19 na forma $\psi(x) = a + ib$, onde a e b são números reais. (Suponha que ψ_0 é real.) (b) Escreva a função de onda dependente do tempo $\psi(x, t)$ associada a $\psi(x)$.

••61 Mostre que o número de onda angular k de uma partícula livre não relativística de massa m pode ser escrito na forma

$$k = \frac{2\pi \sqrt{2mK}}{h},$$

onde K é a energia cinética da partícula.

••62 (a) Seja $n = a + ib$ um número complexo, onde a e b são números reais (positivos ou negativos). Mostre que o produto nm^* é um número real e positivo. (b) Seja $m = c + id$ outro número complexo. Mostre que $|nm| = |n||m|$.

Seção 38-8 O Princípio de Indeterminação de Heisenberg

••63 A indeterminação da posição de um elétron situado no eixo x é 50 pm, ou seja, um valor aproximadamente igual ao raio de um átomo de hidrogênio. Qual é a menor indeterminação possível da componente p_x do momento do elétron?

••64 No Capítulo 39 é dito que os elétrons não se comportam como os planetas do sistema solar, movendo-se em órbitas definidas em torno do núcleo. Para compreender por que esse tipo de modelo não é realista, imagine que tentamos “observar” um elétron em órbita usando um microscópio para determinar a posição do elétron com uma precisão da ordem de 10 pm (um átomo típico tem um raio da ordem de 100 pm). Para isso, o comprimento de onda da radiação usada no microscópio deve ser da ordem de 10 pm. (a) Qual é a energia dos fótons correspondentes a este comprimento de onda? (b) Que energia um desses fótons transfere a um elétron em uma colisão frontal? (c) O que o resultado do item (b) revela a respeito da possibilidade de “observar” um elétron em dois ou mais pontos de uma possível órbita? (Sugestão: a energia de ligação dos elétrons da última camada dos átomos é da ordem de alguns elétrons-volts.)

••65 A Fig. 38-12 mostra um caso em que a componente p_x do momento de uma partícula é dada e, portanto, $\Delta p_x = 0$. De acordo com o princípio de indeterminação de Heisenberg (Eq. 38-20), isso significa que a posição x da partícula é totalmente indeterminada. A recíproca também é verdadeira: se a posição da partícula é conhecida com precisão absoluta ($\Delta x = 0$), a indeterminação do momento é infinita.

Considere um caso intermediário no qual a posição de uma partícula é medida, não com precisão absoluta, mas com uma indeterminação da ordem de $\lambda/2\pi$, onde λ é o comprimento de onda de de Broglie da partícula. Mostre que, nesse caso, a indeterminação

da componente p_x do momento (medida simultaneamente) é igual ao próprio momento, isto é, que $\Delta p_x = p$. Nessas circunstâncias, seria surpreendente que o valor medido do momento da partícula fosse zero? $0,5p$? $2p$? $12p$?

Seção 38-9 O Efeito Túnel

••66 Considere uma barreira de energia potencial como a da Fig. 38-15 cuja altura U_b é 6,0 eV e cuja largura L é 0,70 nm. Qual é a energia de elétrons incidentes para os quais o coeficiente de transmissão é 0,0010?

••67 Prótons de 3,0 MeV incidem em uma barreira de energia potencial de 10 fm de espessura e 10 MeV de altura. Determine (a) o coeficiente de transmissão T , (b) a energia cinética K , dos prótons que atravessam a barreira por efeito túnel; (c) a energia cinética K_r dos prótons que são refletidos pela barreira. Dêuterons (partículas com a mesma carga que o próton e uma massa duas vezes maior) de 3,0 MeV incidem na mesma barreira. Determine os valores de (d) T , (e) K , e (f) K_r , para este caso.

••68 (a) Um feixe de prótons de 5,0 eV incide em uma barreira de energia potencial de 6,0 eV de altura e 0,70 nm de largura, a uma taxa correspondente a uma corrente de 1000 A. Quanto tempo é preciso esperar (em média) para que um próton atravesse a barreira? (b) Quanto tempo será preciso esperar se o feixe contiver elétrons em vez de prótons?

••69 Um feixe de elétrons de energia $E = 5,1$ eV incide em uma barreira de altura $U_b = 6,8$ eV e largura $L = 750$ pm. Qual é a variação percentual do coeficiente de transmissão T correspondente a uma variação de 1,0% (a) da altura da barreira; (b) da largura da barreira; (c) da energia cinética dos elétrons?

Problemas Adicionais

70 A Fig. 38-12 mostra que, por causa do princípio de indeterminação de Heisenberg, não é possível atribuir uma coordenada x a posição de um elétron livre que esteja se movendo com uma velocidade conhecida v ao longo do eixo x . (a) É possível atribuir uma coordenada y ou z ao elétron? (Sugestão: as componentes y e z do momento do elétron são nulas.) (b) Descreva a extensão da onda de matéria em três dimensões.

71 Uma linha de emissão é uma onda eletromagnética produzida em uma faixa tão estreita de comprimentos de onda que pode ser considerada monocromática em primeira aproximação. Uma dessas linhas de emissão, muito importante para a astronomia, tem um comprimento de onda de 21 cm. Qual é a energia dos fótons correspondentes a esse comprimento de onda?

72 Usando as equações clássicas para o momento e a energia cinética, mostre que o comprimento de onda de de Broglie, em nanômetros, pode ser escrito como $\lambda = 1,226/\sqrt{K}$, onde K é a energia cinética do elétron em elétrons-volts.

73 Demonstre a Eq. 38-11, a equação usada para calcular o deslocamento de Compton, a partir das Eqs. 38-8, 38-9 e 38-10, eliminando v e θ .

74 Os nêutrons em equilíbrio térmico com o meio em que se encontram (conhecidos como *nêutrons térmicos*) têm uma energia cinética média de $3kT/2$, onde k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura do meio. Para $T = 300$ K, determine (a) a energia cinética dos nêutrons térmicos; (b) o comprimento de onda de de Broglie correspondente.

75 Considere um balão cheio de gás hélio à temperatura ambiente e à pressão atmosférica. Calcule (a) o comprimento de onda de

39

•31 Qual é a razão entre o menor comprimento de onda da série de Balmer e o menor comprimento de onda da série de Lyman?

•32 Um átomo (que não é um átomo de hidrogênio) absorve um fóton com um comprimento de onda de 375 nm e emite um fóton com um comprimento de onda de 580 nm. Qual é a energia absorvida pelo átomo no processo?

•33 Qual é (a) a energia; (b) o módulo do momento; (c) o comprimento de onda do fóton emitido quando um átomo de hidrogênio sofre uma transição de um estado com $n = 3$ para um estado com $n = 1$?

39

••40 Determine (a) o intervalo de comprimentos de onda e (b) o intervalo de frequências da série de Lyman. Determine (c) o intervalo de comprimentos de onda e (d) o intervalo de frequências da série de Balmer.

39

62 (a) Qual é o comprimento de onda do fóton de menor energia emitido na série de Balmer do átomo de hidrogênio? (b) Qual é o comprimento de onda do limite da série?

Os exercícios foram extraídos do Livro Halliday & Resnick – Fundamentos de Física, 9ª. edição.,
 Capítulos 38 e 39.

Alguns deles tem as respostas apresentadas a seguir:

- 38 **PR** 1. (a) 2,1 μm ; (b) infravermelho 3. $1,0 \times 10^{45}$ fótons/s 5. 2,047 eV 7. $1,1 \times 10^{-10}$ W 9. (a) $2,96 \times 10^{20}$ fótons/s; (b) $4,86 \times 10^7$ m; (c) $5,89 \times 10^{18}$ fótons/m² · s 11. (a) a infravermelha; (b) $1,4 \times 10^{21}$ fótons/s 13. $4,7 \times 10^{26}$ fótons 15. 170 nm 17. 676 km/s 19. (a) 1,3 V; (b) $6,8 \times 10^2$ km/s 21. (a) 3,1 keV; (b) 14 keV 23. (a) 2,00 eV; (b) 0; (c) 2,00 V; (d) 295 nm 25. (a) 382 nm; (b) 1,82 eV 27. (a) 2,73 pm; (b) 6,05 pm 29. (a) $8,57 \times 10^{18}$ Hz; (b) $3,55 \times 10^4$ eV; (c) 35,4 keV/c 31. 300% 33. (a) $-8,1 \times 10^{-9}\%$; (b) $-4,9 \times 10^{-4}\%$; (c) $-8,9\%$; (d) -66% 35. (a) 2,43 pm; (b) 1,32 fm; (c) 0,511 MeV; (d) 939 MeV 37. (a) 41,8 keV; (b) 8,2 keV 39. 44° 41. (a) 2,43 pm; (b) $4,11 \times 10^{-6}$; (c) $-8,67 \times 10^{-6}$ eV; (d) 2,43 pm; (e) $9,78 \times 10^{-2}$; (f) $-4,45$ keV 43. 7,75 pm 45. (a) $1,9 \times 10^{21}$ kg · m/s; (b) 346 fm 47. 4,3 μeV 49. (a) 1,24 μm ; (b) 1,22 nm; (c) 1,24 fm; (d) 1,24 fm 51. (a) 15 keV; (b) 120 keV; (c) o microscópio eletrônico, porque a energia necessária é muito menor 53. nêutron 55. (a) $3,96 \times 10^6$ m/s; (b) 81,7 kV 63. $2,1 \times 10^{-24}$ kg · m/s 65. O único valor surpreendente seria 12p. 67. (a) $9,02 \times 10^{-6}$; (b) 3,0 MeV; (c) 3,0 MeV; (d) $7,33 \times 10^{-8}$; (e) 3,0 MeV; (f) 3,0 MeV 69. (a) -20% ; (b) -10% ; (c) $+15\%$ 71. 5,9 μeV 75. (a) 73 pm; (b) 3,4 nm; (c) sim, porque o comprimento de onda médio de de Broglie é menor que a distância média entre eles 79. $1,7 \times 10^{-35}$ m 81. 0,19 m
- 39 **PR** 1. 1,41 3. 0,65 eV 5. 0,85 nm 7. 1,9 GeV 9. (a) 72,2 eV; (b) 13,7 nm; (c) 17,2 nm; (d) 68,7 nm; (e) 41,2 nm; (g) 68,7 nm; (h) 25,8 nm 11. (a) 13; (b) 12 13. (a) 0,020; (b) 20 15. (a) 0,050; (b) 0,10; (c) 0,0095 17. 56 eV 19. 109 eV 23. 3,21 eV 25. $1,4 \times 10^{-3}$ 27. (a) 8; (b) 0,75; (c) 1,00; (d) 1,25; (e) 3,75; (f) 3,00; (g) 2,25 29. (a) 7; (b) 1,00; (c) 2,00; (d) 3,00; (e) 9,00; (f) 8,00; (g) 6,00 31. 4,0 33. (a) 12,1 eV; (b) $6,45 \times 10^{-27}$ kg · m/s; (c) 102 nm 35. (a) 291 nm⁻³; (b) 10,2 nm⁻¹ 41. (a) 0,0037; (b) 0,0054 43. (a) 13,6 eV; (b) $-27,2$ eV 45. (a) $(r^4/8a^5)[\exp(-r/a)]\cos^2 \theta$; (b) $(r^4/16a^5)[\exp(-r/a)]\text{sen}^2 \theta$ 47. $4,3 \times 10^3$ 49. (a) 13,6 eV; (b) 3,40 eV 51. 0,68 59. $(2\pi/h)[2m(U_0 - E)]^{0,5}$ 61. (b) metro^{-2,5} 63. (a) n ; (b) $2\lambda + 1$; (c) n^2