

50 INTRODUÇÃO À FÍSICA QUÂNTICA

7. Explique a razão de os resultados das experiências de efeito fotoelétrico poderem ser diferentes se for usada uma luz incandescente, com filtros, em vez de tubos de descarga em gás.
8. Suponha que o efeito fotoelétrico ocorra num alvo gasoso, e não num alvo sólido. Os fotoelétrons serão produzidos em *todas* as frequências do fóton incidente? Explique.
9. Em que o efeito Compton difere do efeito fotoelétrico?
10. Quais as hipóteses de Compton para analisar o espalhamento de um fóton por um elétron?
11. A teoria de Bohr para o átomo de hidrogênio baseia-se em diversas hipóteses. Discuta estas hipóteses e o respectivo significado de cada uma. Estas hipóteses contradizem a física clássica?
12. Suponha que o elétron no átomo de hidrogênio obedeça à mecânica clássica e não à mecânica quântica. Por que este átomo “hipotético” emitiria um espectro contínuo e não o espectro de raias, descontínuo, que se observa?
13. O elétron, no estado fundamental do átomo de hidrogênio, pode absorver um fóton com energia (a) *menor* do que 13,6 eV e (b) *maior* do que 13,6 eV?
14. Através do estudo das intensidades relativas das diversas raias espectrais emitidas por um gás, a temperatura, a pressão e a densidade do gás podem ser determinadas. Explique como as três variáveis podem afetar as diversas camadas que os elétrons poderiam ocupar em torno do núcleo do átomo.
15. Por que as intensidades relativas das diversas raias espectrais emitidas por um gás não são iguais?
16. Por que as raias espectrais do hidrogênio diatômico devem ser diferentes das raias espectrais do hidrogênio monoatômico?
17. Explique o significado subjacente ao fato de a energia total do átomo, no modelo de Bohr, ser negativa.
18. Quais as limitações do modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio?
19. Um fóton de raio X é espalhado por um elétron. O que acontece à frequência do fóton espalhado comparada à frequência do fóton incidente?
20. Por que a existência de um limiar de frequência, no efeito fotoelétrico, favorece a teoria corpuscular da luz em vez da teoria ondulatória?
21. Com a lei de Wien, calcule o comprimento de onda da radiação de maior intensidade emitida pelo corpo humano. Com a informação obtida, explique por que um detector de infravermelho seria um dispositivo útil em um serviço de segurança.
22. Todos os corpos irradiam energia. Por que então não percebemos os corpos em um quarto escuro?
23. O que tem mais energia, um fóton de radiação ultravioleta ou um fóton de luz amarela?
24. Qual o efeito, se houver, que você esperaria da temperatura de um corpo sobre a facilidade de emissão de elétrons no efeito fotoelétrico?
25. Algumas estrelas, observa-se, são avermelhadas, enquanto outras são azuladas. Quais as estrelas que têm temperatura superficial mais elevada?

PROBLEMAS

Seção 40.1 A Radiação do Corpo Negro e as Hipóteses de Planck

1. Calcular a energia de um fóton cuja frequência seja (a)  $6,2 \times 10^{14}$  Hz, (b) 3,1 GHz, (c) 46 MHz. Dar as respostas em eV.
2. Determinar os comprimentos de onda dos fótons descritos no Problema 1.
3. Um radiotransmissor de FM tem a potência de emissão de 150 kW e opera na frequência de 99,7 MHz. Quantos fótons por segundo o transmissor emite?
4. A potência média gerada pelo Sol é igual a  $3,74 \times 10^{26}$  W. Admitindo que o comprimento de onda médio da radiação do Sol seja 500 nm, achar o número de fótons emitidos pelo Sol em 1 s.
5. Considere o sistema massa-mola descrito no Exemplo 40.2. Se o número quântico  $n$  se alterar por uma unidade, calcular a variação *relativa* da energia do oscilador.
6. Uma lâmpada de vapor de sódio tem a potência de 10 W. Calcular o número de fótons emitidos por segundo, pela lâmpada, admitindo que o comprimento de onda médio da luz da fonte seja 589,3 nm.
7. Com a lei do deslocamento de Wien, calcular a temperatura superficial de uma estrela gigante vermelha que irradia com o pico de intensidade em  $\lambda_{\text{máx}} = 650$  nm.
8. O raio do Sol é  $6,96 \times 10^8$  m e a sua potência total  $3,77 \times 10^{26}$  W. (a) Admitindo que a superfície do Sol emita como um corpo negro, calcular a sua temperatura superficial. (b) Com o resultado da parte (a), achar o comprimento de onda

do máximo na distribuição espectral de energia da radiação do Sol.

9. Qual o comprimento de onda do pico de radiação emitida pelo corpo humano? Admitir que a temperatura do corpo seja 35°C e use a lei do deslocamento de Wien. Em que parte do espectro eletromagnético está este comprimento de onda?
10. O filamento de uma lâmpada de tungstênio é aquecido até uma temperatura de 800°C. Qual o comprimento de onda da radiação mais intensa?
11. O olho humano é mais sensível à luz com o comprimento de onda  $\lambda = 560$  nm. Qual a temperatura do corpo negro que irradiaria, com maior intensidade, neste comprimento de onda?
12. Mostrar que, nos comprimentos de onda *grandes*, a lei da radiação de Planck (Eq. 40.3) se reduz à lei de Rayleigh-Jeans (Eq. 40.2).
13. Mostrar que nos comprimentos de onda *curtos*, ou nas temperaturas *baixas*, a lei da radiação de Planck prevê uma diminuição exponencial de  $I(\lambda, T)$ , dado pela *lei da radiação de Wien*:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} e^{-hc/\lambda kT}$$

Seção 40.2 O Efeito Fotoelétrico

14. A fotocorrente de uma célula, iluminada por uma radiação de comprimento de onda de 750 nm, é reduzida a zero por um potencial frenador de 0,54 V. Achar a função trabalho do material.

15. A função trabalho do potássio é 2,24 eV. Se uma superfície de potássio metálico for iluminada por luz de comprimento de onda de 480 nm, achar (a) a energia cinética máxima dos fotoelétrons e (b) o limiar de comprimento de onda.
16. A função trabalho do molibdênio é 4,2 eV. (a) Achar o limiar de comprimento de onda e o limiar de frequência do efeito fotoelétrico. (b) Calcular o potencial frenador se a luz incidente tiver o comprimento de onda de 180 nm.
17. Quando o metal césio for iluminado por luz de comprimento de onda de 500 nm, os fotoelétrons emitidos terão a energia cinética máxima de 0,57 eV. Achar (a) a função trabalho do césio e (b) o potencial frenador se a luz incidente tiver comprimento de onda de 600 nm.
18. A função trabalho do lítio é  $\phi = 2,3$  eV. (a) Calcular o limiar de frequência do lítio. (b) Calcular o potencial frenador quando luz de 500 nm cai sobre uma superfície limpa de lítio.
19. Duas fontes de luz são usadas em uma experiência de efeito fotoelétrico que visa a determinar a função trabalho de uma certa superfície metálica. Quando é usada a luz verde de uma lâmpada de mercúrio ( $\lambda = 546,1$  nm), o potencial retardador de 1,70 V reduz a fotocorrente a zero. Com esta medida, qual a função trabalho deste metal? (b) Qual o potencial frenador que seria observado se fosse usada a luz amarela de um tubo de descarga em hélio ( $\lambda = 587,5$  nm)?
20. De uma superfície metálica são ejetados elétrons com velocidades que vão até  $4,6 \times 10^5$  m/s, quando se usa luz de comprimento de onda  $\lambda = 625$  nm. (a) Qual a função trabalho da superfície? (b) Qual o limiar de frequência nesta superfície?
21. Considere os metais lítio, berílio e mercúrio, cujas funções trabalho são 2,3 eV, 3,9 eV e 4,5 eV, respectivamente. Se uma luz de comprimento de onda de 400 nm incidir sobre cada um destes metais, determinar (a) quais dos metais exibirá efeito fotoelétrico e (b) a energia cinética máxima dos fotoelétrons, em cada caso.
22. Luz de comprimento de onda de 300 nm incide sobre uma superfície metálica. O potencial frenador no efeito fotoelétrico é 1,2 V. Achar (a) a energia cinética máxima dos elétrons emitidos, (b) a função trabalho e (c) o limiar de comprimento de onda.
23. O material ativo em uma fotocélula tem a função trabalho 3,1 eV. Em condições de polarização inversa, o limiar de frequência é 270 nm. Qual o valor da voltagem de polarização?
24. A luz ultravioleta incide normalmente sobre a superfície de uma certa substância. A função trabalho dos elétrons nesta substância é 3,44 eV. A luz incidente tem uma intensidade de 0,055 W/m<sup>2</sup>. Os elétrons emitidos no efeito fotoelétrico têm a velocidade máxima de  $4,2 \times 10^5$  m/s. Qual a taxa possível de emissão dos elétrons por centímetro quadrado de superfície? Admita que nenhum fóton seja refletido nem seja absorvido termicamente na substância.
27. Qual o ângulo de espalhamento sob o qual o deslocamento do comprimento de onda de um raio X de 1 nm é 0,02%?
28. Um fóton de raio gama com uma energia igual à energia de repouso do elétron (511 keV) colide com um elétron que está inicialmente em repouso. Calcular a energia cinética adquirida pelo elétron se o fóton for espalhado sob um ângulo de 30° com a direção inicial.
29. Um fóton de raio X com 0,03 nm é espalhado por um elétron livre. (a) Se o deslocamento no comprimento de onda do raio X for igual ao comprimento de onda Compton do elétron, qual será a energia cinética do elétron depois da colisão? (b) Qual a sua velocidade?
30. Raios X com energia de 300 keV sofrem espalhamento num certo alvo. Se os raios espalhados forem recebidos a 37° com relação aos raios incidentes, achar (a) o deslocamento Compton que ocorre neste ângulo, (b) a energia do raio X espalhado e (c) a energia do elétron que recua.
31. Depois de espalhar o fóton de um raio X com 0,80 nm, um elétron livre recua com velocidade igual a  $1,4 \times 10^6$  m/s. (a) Qual foi o deslocamento Compton no comprimento de onda do fóton? (b) Sob que ângulo o fóton foi espalhado?
32. Um alvo metálico é colocado em um feixe de raios gama, de 662 keV, emitidos por um isótopo radioativo do césio (<sup>137</sup>Cs). Achar a energia dos fótons que são espalhados sob um ângulo de 90°. Os elétrons no alvo podem ser considerados elétrons livres.
33. Os raios X com comprimento de onda de 0,12 nm sofrem espalhamento Compton. (a) Achar o comprimento de onda dos fótons espalhados sob os ângulos de 30, 60, 90, 120, 150 e 180°. (b) Achar a energia dos elétrons espalhados correspondentes aos raios X espalhados. (c) Qual o ângulo de espalhamento que proporciona ao elétron a maior energia?
34. Um fóton de raio X com 0,5 nm é desviado por um ângulo de 134° num evento de espalhamento Compton por um elétron livre. Sob que ângulo (com relação ao feixe incidente) recua o elétron?
35. Um fóton de 0,0016 nm é espalhado por um elétron livre. Sob que ângulo de espalhamento (do fóton) o elétron que recua e o fóton espalhado têm a mesma energia cinética?

#### Seção 40.4 Espectros Atômicos

36. Calcular os comprimentos de onda das três primeiras raias da série de Paschen do hidrogênio, usando a Eq. 40.18.
37. Calcular os comprimentos de onda das três primeiras raias da série de Lyman do hidrogênio, usando a Eq. 40.17.
38. (a) Calcular o comprimento de onda mais curto em cada uma das séries espectrais de: Lyman, Balmer, Paschen e Brackett. (b) Calcular a energia (em eV) do fóton de maior energia emitido em cada uma destas séries.
39. (a) Qual o valor de  $n$  associado à raia da série de Lyman do hidrogênio que tem comprimento de onda de 94,96 nm? (b) Este comprimento de onda poderia ser associado à série de Paschen ou à série de Brackett?
40. O oxigênio líquido tem uma coloração azulada. Isto quer dizer que o líquido absorve preferencialmente luz com os comprimentos de onda na região vermelha do espectro visível. Embora a molécula de oxigênio (O<sub>2</sub>) não absorva fortemente no espectro visível, absorve fortemente no comprimento de onda de 1269 nm, que está na região infravermelha do espectro. Investigações mostraram que é possível que duas moléculas colidentes de O<sub>2</sub> absorvam

#### Seção 40.3 O Efeito Compton

25. Calcular a energia e o momento de um fóton de comprimento de onda de 700 nm.
26. Raios X com comprimento de onda de 0,200 nm são espalhados por um bloco de carbono. A radiação espalhada é recebida sob um ângulo de 60° com relação à radiação incidente. Achar (a) o deslocamento Compton  $\Delta\lambda$  e (b) a energia cinética atribuída ao elétron que recua.

um *único* fóton, repartindo igualmente a energia do fóton. A transição que as duas moléculas efetuam é a mesma transição que efetuariam se absorvessem radiação com comprimento de onda de 1269 nm. Qual é o comprimento de onda do fóton que provoca esta dupla transição? Qual a cor correspondente a esta radiação?

**Seção 40.5 Modelo Quântico de Bohr para o Átomo**

- 41. Use a Eq. 40.25 para calcular o raio da primeira, da segunda e da terceira órbita de Bohr no hidrogênio.
- 42. Use o modelo de Bohr para calcular, no átomo de hidrogênio, no seu estado fundamental, (a) a velocidade orbital do elétron, (b) a energia cinética (em eV) do elétron e (c) a energia potencial elétrica (em eV) do átomo.
- 43. (a) Construir o diagrama de níveis de energia do íon He<sup>+</sup> no qual Z = 2. (b) Qual a energia de ionização do He<sup>+</sup>?
- 44. Construa o diagrama de níveis de energia do íon Li<sup>2+</sup>, no qual Z = 3.
- 45. Qual o raio da primeira órbita de Bohr no (a) He<sup>+</sup>, (b) Li<sup>2+</sup> e (c) Be<sup>3+</sup>?
- 46. Dois átomos de hidrogênio colidem frontalmente e ficam com a energia cinética nula. Cada qual emite um fóton com comprimento de onda 121,6 nm (transição n = 2 a n = 1). Qual a velocidade dos átomos antes da colisão?

- 47. Um fóton é emitido por um átomo de hidrogênio que sofre uma transição do estado n = 6 para o estado n = 2. Calcule (a) a energia, (b) o comprimento de onda e (c) a frequência do fóton emitido.
- 48. Qual a energia do fóton que poderia provocar (a) uma transição eletrônica do estado n = 3 para o estado n = 5 e (b) uma transição eletrônica do estado n = 5 para o estado n = 7, no átomo de hidrogênio?
- 49. Na relação abaixo aparecem quatro transições possíveis em um átomo de hidrogênio:

- (A) n<sub>i</sub> = 2; n<sub>f</sub> = 5
- (B) n<sub>i</sub> = 5; n<sub>f</sub> = 3
- (C) n<sub>i</sub> = 7; n<sub>f</sub> = 4
- (D) n<sub>i</sub> = 4; n<sub>f</sub> = 7

- (a) Em qual transição é emitido o fóton de comprimento de onda mais curto? (b) Em qual transição o átomo ganha energia? (c) Em qual transição (ou em quais transições) o átomo perde energia?
- 50. (a) Com a Eq. 40.19, calcular o comprimento de onda mais longo e o comprimento de onda mais curto, na série de Brackett. (b) Determinar as energias dos fótons correspondentes a estes comprimentos de onda.
- 51. Ache a energia potencial e a energia cinética de um elétron no primeiro estado excitado do átomo de hidrogênio.

**PROBLEMAS ADICIONAIS**

- 52. Um átomo de hidrogênio está no seu primeiro estado excitado (n = 2). Com a teoria de Bohr sobre o átomo, calcular (a) o raio da órbita, (b) o momento linear do elétron, (c) o momento angular do elétron, (d) a energia cinética, (e) a energia potencial e (f) a energia total.
- 53. O *positrônio* é um átomo hidrogenóide constituído por um pósitron (um elétron com carga positiva) e um elétron que orbitam um em torno do outro. Com o modelo de Bohr, achar os raios permitidos (em relação ao centro de massa das duas partículas) e as energias permitidas no sistema.
- 54. A Fig. 40.17 mostra o potencial frenador contra a frequência do fóton incidente no efeito fotoelétrico com o sódio. Usar os dados a fim de achar (a) a função trabalho, (b) a razão h/e e (c) o limiar de comprimento de onda. (Dados de R. A. Millikan, *Phys. Rev.* 7:362 [1916].)

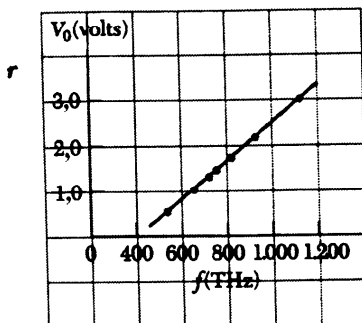


Fig. 40.17 (Problema 54).

- 55. O *processo Auger*. Um elétron, no cromo, faz uma transição do estado n = 2 para o estado n = 1, sem emitir um fóton.

O excesso de energia é transferido para um elétron externo (no estado n = 4), que é ejetado pelo átomo. (Este é o *efeito Auger* e o elétron emitido é um *elétron Auger*.) Usar a teoria de Bohr para achar a energia cinética do elétron Auger.

- 56. Fótons com comprimento de onda de 450 nm incidem sobre um metal. Os elétrons ejetados com a maior energia são forçados, por um campo magnético de 2 × 10<sup>-5</sup> T, em uma trajetória circular cujo raio tem 20 cm. Qual a função trabalho do metal?
- 57. Raios gama (fótons com alta energia) com energia de 1,02 MeV são espalhados por elétrons que estão inicialmente em repouso. Se o espalhamento for *simétrico*, isto é, se θ = φ, achar (a) o ângulo de espalhamento θ e (b) a energia dos fótons espalhados.
- 58. Um fóton de 200 MeV é espalhado, a 40°, por um próton livre que está inicialmente em repouso. (a) Achar a energia (em MeV) do fóton espalhado. (b) Qual a energia cinética (em MeV) que o próton adquire?
- 59. Um *múon* é uma partícula com a carga -e e a massa igual a 207 vezes a massa de um elétron. Forma-se chumbo muônico quando um núcleo de <sup>208</sup>Pb captura um múon. De acordo com a teoria de Bohr, quais são o raio e a energia do chumbo muônico no estado fundamental?
- 60. Usar o modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio a fim de mostrar que, quando o átomo faz uma transição do estado n para o estado n - 1, a frequência da luz emitida é dada por

$$f = \frac{2\pi^2mk^2e^4}{h^3} \left[ \frac{2n-1}{(n-1)^2n^2} \right]$$

Mostrar que, quando n → ∞, a expressão anterior varia com 1/n<sup>3</sup> e se reduz à frequência que se esperaria na emissão

clássica do átomo. (Sugestão: Para calcular a frequência da emissão clássica, observe que a frequência de revolução é  $v/2\pi r$ , onde  $r$  é dado pela Eq. 40.25.) Este é um exemplo do princípio da correspondência, que exige a concordância entre o modelo quântico e o clássico quando os valores de  $n$  forem grandes.

- 61. Um múon (Problema 59) é capturado por um deuteron para formar um átomo muônico. (a) Achar a energia do estado fundamental e a do primeiro estado excitado. (b) Qual o comprimento de onda do fóton emitido quando o átomo faz uma transição do primeiro estado excitado para o estado fundamental?
- 62. Mostrar que um fóton não pode transferir toda a sua energia para um elétron livre. (Sugestão: Observe que a energia e o momento têm que ser conservados.)
- 63. Um fóton com energia inicial de 0,1 MeV sofre um espalhamento Compton sob o ângulo de  $60^\circ$ . Achar (a) a energia do fóton espalhado, (b) a energia de recuo do elétron e (c) o ângulo de recuo do elétron.
- 64. A potência total irradiada por um corpo negro, por unidade de área, na temperatura  $T$  é dada pela área subtendida pela curva de  $I(\lambda, T)$  contra  $\lambda$ , como está na Fig. 40.2. (a) Mostrar que esta potência por unidade de área é dada por

$$\int_0^\infty I(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

onde  $I(\lambda, T)$  está dada pela lei da radiação de Planck e  $\sigma$  é uma constante independente de  $T$ . Este resultado é conhecido como a lei de Stefan-Boltzmann (ver a Eq. 20.11). Para efetuar a integração, é necessário passar para a variável  $x = hc/\lambda kT$  e usar o resultado

$$\int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}$$

(b) Mostrar que a constante de Stefan-Boltzmann  $\sigma$  tem o valor

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

- 65. As experiências mostram que a vista humana, adaptada ao escuro, pode perceber um único fóton de luz visível. Con-

sidere uma fonte luminosa que emite 2 W de luz, com o comprimento de onda de 555 nm, uniformemente em todas as direções. Qual a distância entre esta fonte e o olho para que, em média, um fóton por segundo entre no olho através da pupila com o diâmetro de 6 mm?

- 66. Um fóton com energia inicial  $E_0$  sofre um espalhamento Compton por um elétron livre (massa  $m$ ), inicialmente em repouso, e o ângulo de desvio é  $\theta$ . Com as equações relativísticas da conservação da energia e da conservação do momento, deduzir a seguinte relação para a energia final  $E$  do fóton espalhado:  $E = E_0 [1 - (E_0/mc^2)(1 - \cos \theta)]^{-1}$ .
- 67. Mostrar que a razão entre o comprimento de onda Compton  $\lambda_c$  e o comprimento de onda de de Broglie  $\lambda$  de um elétron relativístico é dada por

$$\frac{\lambda_c}{\lambda} = \left[ \left( \frac{E}{mc^2} \right)^2 - 1 \right]^{1/2}$$

onde  $E$  é a energia total do elétron e  $m$  é a sua massa.

- 68. Deduzir a fórmula do deslocamento Compton (Eq. 40.11) a partir das Eqs. 40.12, 40.13 e 40.14.
- 69. Um elétron, inicialmente em repouso, recua em uma colisão frontal com um fóton. Mostrar que a energia cinética adquirida pelo elétron é dada por  $2hf\alpha/(1 + 2\alpha)$ , onde  $\alpha$  é a razão entre a energia inicial do fóton e a energia de repouso do elétron.

$\Delta$  70. A tabela seguinte mostra alguns dados obtidos em uma experiência de efeito fotoelétrico. (a) A partir dos dados, fazer um gráfico semelhante ao da Fig. 40.8, determinando a reta da interpolação. Pelo gráfico, determinar (b) o valor experimental da constante de Planck (em joules segundo) e a função trabalho (em elétrons-volt) da superfície. (Em cada resposta bastam dois algarismos significativos.)

Comprimento de Onda (nm)	Energia Cinética Máxima dos Fotolétrons (eV)
588	0,67
505	0,98
445	1,35
399	1,63

## Respostas dos Problemas Ímpares

### CAPÍTULO 40

- 1. (a) 2,57 eV (b)  $1,28 \times 10^{-5}$  eV (c)  $1,91 \times 10^{-7}$  eV
- 3.  $2,27 \times 10^{30}$  fótons/s
- 5.  $1,86 \times 10^{-34}$
- 7.  $4,46 \times 10^3$  K
- 9. 9,35  $\mu\text{m}$ : infravermelho

- 11.  $5,18 \times 10^3$  K
- 15. (a) 0,350 eV (b) 555 nm
- 17. (a) 1,92 eV (b) 0,159 V
- 19. (a) 0,571 eV (b) 1,54 V
- 21. (a) Somente o lítio (b) 0,808 eV
- 23. 1,50 V
- 25. 1,78 eV,  $9,47 \times 10^{-28}$  kg·m/s
- 27.  $23,4^\circ$
- 29. (a) 3,10 keV (b)  $0,110c = 32,9 \times 10^6$  m/s
- 31. (a)  $2,88 \times 10^{-12}$  m (b)  $101^\circ$
- 33. (a) 0,1203 nm, 0,1212 nm, 0,1224 nm, 0,1236 nm, 0,1245 nm, 0,1248 nm (b) 28,0 eV, 104 eV, 205 eV, 305 eV, 377 eV, 403 eV (c)  $180^\circ$
- 35.  $70,1^\circ$
- 37. 121 nm, 103 nm, 97,2 nm
- 39. (a) 5 (b) Não; Não
- 41. 0,529 Å, 2,12 Å, 4,77 Å
- 43. (a)  $E_n = -54,4 \frac{\text{eV}}{n^2}$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$  (b) -54,4 eV
- 45. (a) 0,265 Å (b) 0,177 Å (c) 0,132 Å
- 47. (a) 3,03 eV (b) 411 nm (c)  $7,32 \times 10^{14}$  Hz
- 49. (a) B (b) D (c) B e C
- 51. -6,80 eV, +3,40 eV
- 53.  $r_n = (1,06 \text{ Å})n^2$ ,  $E_n = -6,80 \text{ eV}/n^2$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$
- 55. 5,39 keV
- 57. (a) 41,4° (b) 680 keV
- 59. (a) 3,12 fm (b) - 18,9 MeV
- 61. (a) -6,67 keV, -668 eV (b) 0,621 nm
- 63. (a) 91,1 keV (b) 8,90 keV (c)  $57,5^\circ$
- 65.  $3,55 \times 10^6$  m