

$$hf = E_x - E_0 \quad (40-28)$$

pode fazer com que um átomo sofra uma transição de um estado excitado, de energia E_x , para um estado de energia $E_0 < E_x$, emitindo outro fóton com a mesma frequência. O fóton que estimula a emissão e o fóton emitido são iguais sob todos os aspectos, e ambos contribuem para a luz do *laser*.


Para que a emissão estimulada predomine sobre a absorção em geral é preciso que exista uma **inversão de população**, isto é, que haja mais átomos no estado de maior energia que no estado de menor energia.

PERGUNTAS

- Um elétron de um átomo de mercúrio está na subcamada $3d$. Entre os valores de m_ℓ que aparecem a seguir, indique quais são os valores possíveis: $-3, -1, 0, 1, 2$.
 - Em um átomo de urânio as subcamadas $6p$ e $7s$ estão completas. Qual das subcamadas tem o maior número de elétrons?
 - Em um átomo de prata as subcamadas $3d$ e $4d$ estão completas. Uma das subcamadas tem mais elétrons que a outra ou as duas têm o mesmo número de elétrons?
 - Um elétron em um átomo de ouro se encontra em um estado com $n = 4$. Entre os valores de ℓ que aparecem a seguir, indique quais são os valores possíveis: $-3, 0, 2, 3, 4, 5$.
 - (a) Quantas subcamadas e (b) quantos estados eletrônicos existem na camada $n = 2$? (c) Quantas subcamadas e (d) quantos estados eletrônicos existem na camada $n = 5$?
 - A Fig. 40-23 mostra três pontos nos quais pode ser colocado um elétron com o spin para cima em uma região onde o campo magnético não é uniforme (existe um gradiente ao longo do eixo z). (a) Coloque os três pontos na ordem da energia potencial U do momento magnético intrínseco $\vec{\mu}_s$ do elétron, começando pelo maior valor positivo. (b) Qual é a orientação da força que o campo magnético exerce sobre o elétron se ele se encontra no ponto 2?
-
- FIG. 40-23** Pergunta 6.
- Indique quais das afirmações a seguir são verdadeiras e quais são falsas: (a) Uma (e apenas uma) das seguintes subcamadas não pode existir: $2p, 4f, 3d, 1p$. (b) O número de valores de m_ℓ permitidos depende de ℓ , mas não de n . (c) A camada $n = 4$ tem quatro subcamadas. (d) O menor valor de n para um dado valor de ℓ é $\ell + 1$. (e) Todos os estados com $\ell = 0$ também têm $m_\ell = 0$. (f) Existem n subcamadas para cada valor de n .
 - Nos pares de elementos a seguir, indique de que elemento é mais fácil remover um elétron: (a) criptônio e bromo; (b) rubídio e cério; (c) hélio e hidrogênio.
 - De que números quânticos a energia de um elétron depende (a) em um átomo de hidrogênio; (b) em um átomo de vanádio?
 - O espectro de raios X da Fig. 40-14 é para elétrons de $35,0$ keV incidindo em um alvo de molibdênio ($Z = 42$). Se o alvo de molibdênio é substituído por um alvo de prata ($Z = 47$), determine se cada uma das seguintes grandezas aumenta, diminui ou permanece constante: (a) o comprimento de corte λ_{\min} ; (b) o comprimento de onda da linha K_α ; (c) o comprimento de onda da linha K_β .
 - A Fig. 40-22 mostra os níveis de energia dos átomos de hélio e neônio envolvidos no funcionamento do *laser* de hélio-neônio. É dito no texto que um átomo de hélio no estado E_3 pode colidir com um átomo de neônio no estado fundamental e excitá-lo para o estado E_2 . A energia do estado E_3 do hélio ($20,61$ eV) não é exatamente igual à energia do estado E_2 do neônio ($20,66$ eV). Como pode ocorrer a transferência de energia se as duas energias não são *exatamente* iguais?
 - Considere os elementos criptônio e rubídio. (a) Qual dos dois elementos é mais apropriado para um experimento como o de Stern-Gerlach, ilustrado na Fig. 40-8? (b) Seria impossível realizar o experimento com um dos elementos? Qual?
 - A linha K_α do espectro de raios X de qualquer elemento se deve a uma transição entre a camada K ($n = 1$) e a camada L ($n = 2$). A Fig. 40-14 mostra essa linha (para um alvo de molibdênio) como uma linha única. Quando a linha é examinada com maior resolução, porém, observa-se que é formada por várias linhas com comprimentos de onda ligeiramente diferentes, já que os diferentes estados da camada L não possuem exatamente a mesma energia. (a) De quantas linhas é composta a linha K_α ? (b) De quantas linhas é composta a linha K_β ?
 - Indique quais das condições a seguir são essenciais para o funcionamento de um *laser* baseado em transições entre dois níveis de energia de um átomo. (a) Existem mais átomos no nível de maior energia que no nível de menor energia. (b) O nível de maior energia é metaestável. (c) O nível de menor energia é metaestável. (d) O nível de menor energia é o estado fundamental. (e) A substância está no estado gasoso.

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 40-4 Momento Angular e Momento Magnético

- 1 Um elétron de um átomo tem $m_\ell = +4$. Para esse elétron, determine (a) o valor de ℓ ; (b) o menor valor possível de n ; (c) o número de valores possíveis de m_s .
- 2 Na subcamada $\ell = 3$, (a) qual é o maior valor possível de m_ℓ ? (b) Quantos estados existem com o maior valor possível de m_ℓ ? Qual é o número total de estados disponíveis nessa subcamada?
- 3 (a) Quantos valores de ℓ estão associados ao estado $n = 3$? (b) Quantos valores de m_ℓ estão associados ao estado $\ell = 1$?
- 4 Determine quantos estados eletrônicos existem nas seguintes subcamadas: (a) $n = 4, \ell = 3$; (b) $n = 3, \ell = 1$; (c) $n = 4, \ell = 1$; (d) $n = 2, \ell = 0$.
- 5 (a) Qual é o módulo do momento angular orbital em um estado com $\ell = 3$? (b) Qual é o módulo da maior projeção desse momento em um eixo arbitrário z ?
- 6 Determine quantos estados eletrônicos existem nas seguintes camadas: (a) $n = 4$; (b) $n = 1$; (c) $n = 2$.
- 7 Um elétron de um átomo de hidrogênio se encontra em um estado com $\ell = 5$. Qual é o menor valor possível do ângulo semi-clássico entre \vec{L} e L_z ?
- 8 Quantos estados eletrônicos existem na camada $n = 5$?
- 9 Mostre que se a componente L_z do momento angular orbital \vec{L} for medida o máximo que se pode dizer a respeito das outras duas componentes do momento angular orbital é que obedecem à relação

$$(L_x^2 + L_y^2)^{1/2} = [\ell(\ell + 1) - m_\ell^2]^{1/2}\hbar$$

- 10 Um elétron de um átomo se encontra em um estado com $n = 3$. Determine (a) o número de valores possíveis de ℓ ; (b) o número de valores possíveis de m_ℓ ; (c) o número de valores possíveis de m_s ; (d) o número de estados da camada $n = 3$; (e) o número de subcamadas da camada $n = 3$.
- 11 Um elétron de um átomo se encontra em um estado com $\ell = 3$. Determine (a) o módulo de \vec{L} (em múltiplos de \hbar); (b) o módulo de $\vec{\mu}$ (em múltiplos de μ_B); (c) o maior valor possível de m_ℓ ; (d) o valor correspondente de L_z (em múltiplos de \hbar); (e) o valor correspondente de $\mu_{orb,z}$ (em múltiplos de μ_B); (f) o valor do ângulo semi-clássico θ entre as direções de L_z e \vec{L} ; o valor de θ para (g) o segundo maior valor possível de m_ℓ e (h) o menor valor possível (isto é, o mais negativo) de m_ℓ .
- 12 Um campo magnético é aplicado a uma esfera uniforme de ferro, de raio $R = 2,00$ mm, que flutua livremente no espaço. O momento magnético da esfera inicialmente é nulo, mas o campo alinha 12% dos momentos magnéticos dos átomos (ou seja, 12% dos momentos magnéticos dos elétrons fracamente ligados da esfera, que correspondem a um elétron por átomo de ferro). A soma do momento magnético desses elétrons alinhados constitui o momento magnético intrínseco da esfera, $\vec{\mu}_s$. Qual é a velocidade angular ω induzida na esfera pelo campo?

seção 40-5 O Experimento de Stern–Gerlach

- 13 Determine (a) o menor e (b) o maior valor do ângulo se-

mi-clássico entre o vetor momento angular de spin do elétron e o campo magnético no Exemplo 40-1. Não se esqueça de que o momento angular orbital do elétron de valência do átomo de prata é zero.

- 14 Suponha que no experimento de Stern–Gerlach executado com átomos neutros de prata o campo magnético \vec{B} tem um módulo de 0,50 T. (a) Qual é a diferença de energia entre os átomos de prata nos dois subfeixes? (b) Qual é a frequência da radiação que induziria transições entre esses dois estados? (c) Qual é o comprimento de onda da radiação? (d) Em que região do espectro eletromagnético está situada?
- 15 Qual é a aceleração de um átomo de prata ao passar pelo ímã do Exemplo 40-1?
- 16 Um átomo de hidrogênio no estado fundamental se desloca 80 cm perpendicularmente a um campo magnético vertical não-uniforme cujo gradiente é $dB/dz = 1,6 \times 10^2$ T/m. (a) Qual é o módulo da força exercida pelo campo magnético sobre o átomo devido ao momento magnético do elétron, que é aproximadamente 1 magneton de Bohr? (b) Qual é a distância vertical percorrida pelo átomo nos 80 cm de percurso se ele está se movendo com uma velocidade de $1,2 \times 10^5$ m/s?

seção 40-6 Ressonância Magnética

- 17 Qual é o comprimento de onda de um fóton capaz de produzir uma transição do spin de um elétron em um campo magnético de 0,200 T? Suponha que $\ell = 0$.
- 18 O estado fundamental do átomo de hidrogênio é na verdade um par de estados muito próximos, já que o elétron está sujeito ao campo magnético \vec{B} do núcleo (próton). Em consequência existe uma energia potencial associada à orientação no momento magnético $\vec{\mu}$ do elétron em relação a \vec{B} , e podemos dizer que o spin do elétron está para cima (estado de maior energia) ou para baixo (estado de menor energia) em relação ao campo. Quando o elétron é excitado para o estado de maior energia pode passar espontaneamente para o estado de menor energia invertendo a orientação do spin e emitindo um fóton com um comprimento de onda de 21 cm. (Esse processo é muito comum na Via Láctea, e a radiação de 21 cm, que pode ser detectada com o auxílio de radiotelescópios, revela a existência de nuvens de hidrogênio no espaço sideral.) Qual é o valor do campo magnético efetivo B experimentado pelo elétron no estado fundamental do átomo de hidrogênio?
- 19 Em um experimento de ressonância magnética nuclear a frequência da fonte de RF é 34 MHz e a ressonância dos átomos de hidrogênio da amostra é observada quando a intensidade do campo magnético \vec{B}_{ext} do eletroímã é 0,78 T. Suponha que \vec{B}_{int} e \vec{B}_{ext} são paralelos e que a componente μ_z do momento magnético dos prótons é $1,41 \times 10^{-26}$ J/T. Qual é o módulo de \vec{B}_{int} ?

seção 40-8 Armadilhas Retangulares com Mais de um Elétron

- 20 A Fig. 40-24 mostra o diagrama de níveis de energia para um elétron de um poço de potencial unidimensional infinito de largura L . O número de estados degenerados em cada nível está indicado na figura: “não” significa não-degenerado (o que tam-

bém se aplica ao estado fundamental), “duplo” significa 2 estados, e “triplo” significa 3 estados. Suponha que o poço de potencial contém 11 elétrons. Desprezando a interação eletrostática dos elétrons, que múltiplo de $h^2/8mL^2$ corresponde à energia do primeiro estado excitado do sistema de 11 elétrons?

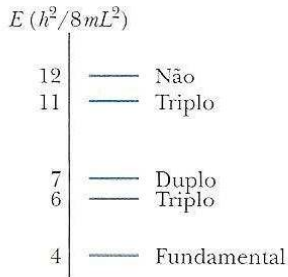


FIG. 40-24 Problema 20.

•21 Sete elétrons são confinados em um poço potencial unidimensional infinito de largura L . Qual é a energia do estado fundamental do sistema em múltiplos de $h^2/8mL^2$? Suponha que os elétrons não interagem, e não se esqueça de levar em conta o spin.

•22 Um curral retangular de dimensões $L_x = L_y = 2L$ contém sete elétrons. Qual é a energia do estado fundamental do sistema, em múltiplos de $h^2/8mL^2$? Suponha que os elétrons não interagem, e não se esqueça de levar em conta o spin.

••23 Para a situação do Problema 21, em múltiplos de $h^2/8mL^2$, qual é a energia (a) do primeiro estado excitado; (b) do segundo estado excitado; (c) do terceiro estado excitado do sistema de sete elétrons? (d) Construa um diagrama de níveis de energia para os primeiros quatro níveis de energia do sistema.

••24 Para a situação do Problema 22, em múltiplos de $h^2/8mL^2$, qual é a energia (a) do primeiro estado excitado, (b) do segundo estado excitado e (c) do terceiro estado excitado do sistema de sete elétrons? (d) Construa um diagrama de níveis de energia para os primeiros quatro níveis de energia do sistema.

••25 Uma caixa cúbica de dimensões $L_x = L_y = L_z = L$ contém oito elétrons. Qual é a energia do estado fundamental do sistema, em múltiplos de $h^2/8mL^2$? Suponha que os elétrons não interagem, e não se esqueça de levar em conta o spin.

•••26 Para a situação do Problema 25, em múltiplos de $h^2/8mL^2$, qual é a energia (a) do primeiro estado excitado; (b) do segundo estado excitado; (c) do terceiro estado excitado do sistema de oito elétrons? (d) Construa um diagrama de níveis de energia para os primeiros quatro níveis de energia do sistema.

seção 40-9 Construção da Tabela Periódica

•27 Um elemento descoberto há relativamente pouco tempo é o darmstádio (Ds), que possui 110 elétrons. Suponha que os níveis de energia disponíveis para os elétrons fossem ocupados na ordem crescente de n e, dentro de cada camada, na ordem crescente de ℓ . Nesse caso, com o átomo no estado fundamental, qual seria o número quântico ℓ do último elétron, em notação espectroscópica?

•28 Para um átomo de hélio no estado fundamental, quais são os números quânticos (n, ℓ, m_ℓ e m_s) (a) quando o spin do elétron está para cima e (b) quando o spin do elétron está para baixo?

•29 Considere os elementos selênio ($Z = 34$), bromo ($Z = 35$) e criptônio ($Z = 36$). Nessa região da tabela periódica as subca-

madras dos estados eletrônicos são preenchidas na ordem

$$1s \ 2s \ 2p \ 3s \ 3p \ 3d \ 4s \ 4p \ \dots$$

Determine (a) a última subcamada ocupada do selênio e (b) o número de elétrons que ocupam essa subcamada; (c) a última subcamada ocupada do bromo e (d) o número de elétrons que ocupam essa subcamada; (e) a última subcamada ocupada do criptônio e (f) o número de elétrons que ocupam essa subcamada.

•30 Suponha que dois elétrons de um átomo possuem números quânticos $n = 2$ e $\ell = 1$. (a) Quantos estados são possíveis para esses dois elétrons? (Não se esqueça de que é impossível distinguir dois elétrons.) (b) Se o princípio de exclusão de Pauli não existisse, quanto estados seriam possíveis?

•31 Dois dos três elétrons de um átomo de lítio têm números quânticos (n, ℓ, m_ℓ e m_s) iguais a $(1, 0, 0, +1/2)$ e $(1, 0, 0, -1/2)$. Que números quânticos são possíveis para o terceiro elétron se o átomo se encontra (a) no estado fundamental; (b) no primeiro estado excitado?

•32 Mostre que o número de estados com o mesmo número quântico n é $2n^2$.

seção 40-10 Os Espectros de Raios X dos Elementos

•33 Qual a menor diferença de potencial a que um elétron deve ser submetido em um tubo de raios X para produzir raios X com um comprimento de onda de $0,100 \text{ nm}$?

••34 Um elétron de 20 keV fica em repouso depois de sofrer duas colisões com átomos, como a da Fig. 40-15. (Suponha que os átomos permanecem estacionários.) O comprimento de onda do fóton emitido na segunda colisão é 130 pm maior que o comprimento de onda do fóton emitido na primeira colisão. (a) Qual é a energia cinética do elétron após a primeira colisão? Determine (b) o comprimento de onda λ_1 e (c) a energia E_1 do primeiro fóton. Determine (d) o comprimento de onda λ_2 e (e) a energia E_2 do segundo fóton.

••35 Raios X são produzidos em um tubo de raios X por elétrons acelerados por uma diferença de potencial de $50,0 \text{ kV}$. Seja K_0 a energia cinética de um elétron após a aceleração. O elétron colide com um átomo do alvo (suponha que o átomo permanece estacionário) e passa a ter uma energia cinética $K_1 = 0,500K_0$. (a) Qual é o comprimento de onda do fóton emitido? O elétron colide com outro átomo do alvo (suponha que esse átomo também permanece estacionário) e passa a ter uma energia cinética $K_2 = 0,500K_1$. (b) Qual é o comprimento de onda do fóton emitido?

••36 O comprimento de onda da linha K_α do ferro é 193 pm . Qual é a diferença de energia entre os dois estados do átomo de ferro entre os quais ocorre a transição?

••37 Na Fig. 40-14 os raios X são produzidos quando elétrons de $35,0 \text{ keV}$ incidem em um alvo de molibdênio ($Z = 42$). Se o mesmo potencial de aceleração é usado e o alvo é substituído por um alvo de prata ($Z = 47$), determine os novos valores (a) de $\lambda_{\text{mín}}$; (b) do comprimento de onda da linha K_α ; (c) do comprimento de onda da linha K_β . Os níveis K, L e M do átomo de prata (compare com a Fig. 40-16) são $25,51; 3,56; 0,53 \text{ keV}$.

••38 Quando um alvo de molibdênio é bombardeado com elétrons são produzidos um espectro contínuo e um espectro característico de raios X, como na Fig. 40-14. Na figura a energia cinética dos elétrons incidentes é $35,0 \text{ keV}$. Se o potencial de aceleração dos elétrons é aumentado para $50,0 \text{ keV}$, (a) determine o valor médio de $\lambda_{\text{mín}}$; (b) os comprimentos de onda das linhas K_α e K_β aumentam, diminuem ou permanecem iguais?

••39 Mostre que um elétron em movimento não pode se transformar espontaneamente em um fóton; um terceiro corpo (átomo ou núcleo) deve sempre estar presente. Por quê? (*Sugestão:* Verifique o que é necessário para que as leis de conservação da energia e do momento sejam obedecidas.)

••40 A partir da Fig. 40-14, estime a diferença de energia $E_L - E_M$ para o molibdênio. Compare o resultado com o valor obtido a partir da Fig. 40-16.

••41 Calcule a razão entre os comprimentos de onda da linha K_α do nióbio (Nb) e do gálio (Ga). Os dados necessários podem ser encontrados na tabela periódica do Apêndice G.

••42 A tabela a seguir mostra o comprimento de onda da linha K_α para alguns elementos.

Elemento	λ (pm)	Elemento	λ (pm)
Ti	275	Co	179
V	250	Ni	166
Cr	229	Cu	154
Mn	210	Zn	143
Fe	193	Ga	134

Faça um gráfico de Moseley (semelhante ao da Fig. 40-17) com base nesses dados e verifique, a partir da inclinação da reta, que o valor de C é o que aparece na Seção 40-10.

••43 As energias de ligação dos elétrons da camada K e da camada L do cobre são 8,979 e 0,951 keV, respectivamente. Se um feixe de raios X da linha K_α do cobre incide em um cristal de cloreto de sódio e produz uma reflexão de Bragg de primeira ordem com um ângulo de $74,1^\circ$ em relação a planos paralelos de átomos de sódio, qual é a distância entre esses planos paralelos?

••44 (a) Usando a Eq. 40-26, estime a razão entre as energias dos fótons associados às linhas K_α de dois elementos cujos números atômicos são Z e Z' . Qual é essa razão para os elementos urânio e alumínio? (c) Qual é essa razão para os elementos urânio e lítio?

••45 Um alvo de tungstênio ($Z = 74$) é bombardeado com elétrons em um tubo de raios X. Os níveis K , L e M do átomo de tungstênio (compare com a Fig. 40-16) são 69,5; 11,3; 2,30 keV, respectivamente. (a) Qual é o menor valor do potencial de aceleração que permite a produção das linhas características K_α e K_β do tungstênio? (b) Para esse mesmo potencial de aceleração, qual é o valor de λ_{\min} ? Quais são os comprimentos de onda das linhas (c) K_α e (d) K_β ?

••46 Determine a constante C da Eq. 40-27 com cinco algarismos significativos, expressando C em termos das constantes fundamentais da Eq. 40-24 e usando os valores do Apêndice B para essas constantes. Usando esse valor de C na Eq. 40-27, determine a energia teórica $E_{\text{teór}}$ do fóton K_α para os elementos leves que aparecem na tabela a seguir. A tabela mostra o valor experimental E_{exp} , em elétrons-volts, da energia do fóton K_α para os mesmos elementos. A diferença percentual entre $E_{\text{teór}}$ e E_{exp} é dada por

$$\text{diferença percentual} = \frac{E_{\text{teór}} - E_{\text{exp}}}{E_{\text{exp}}} 100.$$

Determine a diferença percentual (a) para o Li; (b) para o Be; (c) para o B; (d) para o C; (e) para o N; (f) para o O; (g) para o F; (h) para o Ne; (i) para o Na; (j) para o Mg.

Li	54,3	O	524,9
Be	108,5	F	676,8
B	183,3	Ne	848,6
C	277	Na	1041
N	392,4	Mg	1254

(Existe na verdade mais de uma linha K_α por causa do desdobramento do nível L , mas o desdobramento é desprezível no caso dos elementos leves.)

seção 40-12 Como Funcionam os Lasers

•47 Um *laser* pulsado emite luz com um comprimento de onda de 694,4 nm. A duração dos pulsos é 12 ps e a energia por pulso é 0,150 J. (a) Qual é a largura dos pulsos? (b) Quantos fótons são emitidos em cada pulso?

•48 Um *laser* emite fótons de 424 nm em um único pulso que dura 0,500 μs . A potência do pulso é 2,80 MW. Supondo que os átomos do *laser* sofreram emissão estimulada apenas uma vez, quantos átomos contribuíram para o pulso luminoso?

•49 Um átomo hipotético possui níveis de energia com uma separação uniforme de 1,2 eV. À temperatura de 2000 K, qual é a razão entre o número de átomos no $13.^\circ$ estado excitado e o número de átomos no $11.^\circ$ estado excitado?

•50 Nas condições do Exemplo 40-6a, quantos mols de neônio são necessários para excitar 10 átomos para o estado E_x ?

•51 Um *laser* de hélio-neônio emite luz com um comprimento de onda de 632,8 nm e uma potência de 2,3 mW. Quantos fótons são emitidos por segundo pelo *laser*?

•52 Um átomo hipotético possui apenas dois níveis de energia, separados por 3,2 eV. Suponha que na atmosfera de uma estrela, a uma certa altitude, existam $6,1 \times 10^{13}$ desses átomos por centímetro cúbico no estado de maior energia e $2,5 \times 10^{15}$ átomos por centímetro cúbico no estado de menor energia. Qual é a temperatura da atmosfera da estrela nessa altitude?

•53 Suponha que o comprimento de onda dos *lasers* pudesse ser ajustado para qualquer frequência na faixa da luz visível, ou seja, de 450 nm a 650 nm, e que esses *lasers* pudessem ser usados para transmitir programas de televisão. Se cada canal de televisão ocupa 10 MHz, quantos canais de televisão poderiam ser acomodados nesse intervalo?

•54 Uma inversão de população entre dois níveis de energia às vezes é representada atribuindo uma temperatura absoluta negativa ao sistema. Que temperatura negativa descreveria um sistema no qual a população do nível de maior energia excede de 10% a população do nível de menor energia e a diferença de energia entre os dois níveis é 2,26 eV?

•55 O volume ativo de um *laser* semiconductor de GaAlAs é apenas $200 \mu\text{m}^3$ (menor que o volume de um grão de areia) e, no entanto, o *laser* é capaz de fornecer uma potência de 5,0 mW com um comprimento de onda de $0,80 \mu\text{m}$. Quantos fótons o *laser* emite por segundo?

•56 Um *laser* de alta potência ($\lambda = 600 \text{ nm}$, diâmetro do feixe 12 cm) é apontado para a Lua, a $3,8 \times 10^5 \text{ km}$ de distância. O feixe diverge apenas por causa da difração. A posição angular da borda do disco central de difração (veja a Eq. 36-12) é dada por

$$\text{sen } \theta = \frac{1,22\lambda}{d},$$

onde d é o diâmetro da abertura de saída do *laser*. Qual é o diâmetro do disco central de difração na superfície da Lua?

••57 A Fig. 40-25 mostra os níveis de energia de dois tipos de átomo. Os átomos A estão em um tubo e os átomos B estão em outro tubo. As energias (em relação à energia do estado fundamental, tomada como sendo zero) estão indicadas; o tempo médio de vida dos átomos em cada nível também está indicado. Todos os átomos são inicialmente excitados para níveis mais altos que aqueles que aparecem na figura. Em seguida os átomos decaem, passando pelos níveis da figura, e muitos ficam “presos” em certos níveis, o que resulta em uma inversão de população e na possibilidade da existência do efeito *laser*. A luz emitida por A ilumina B e pode causar emissão estimulada por parte de B . Qual é a energia por fóton dessa emissão estimulada?

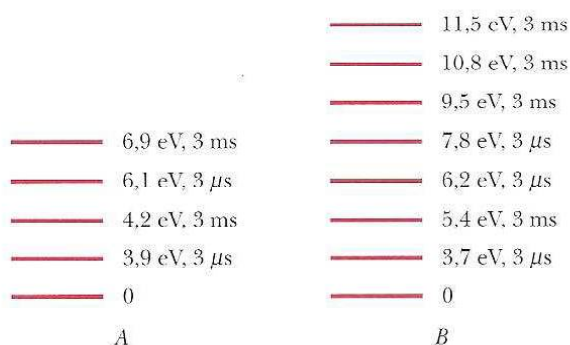


FIG. 40-25 Problema 57.

••58 O *laser* de rubi tem um comprimento de onda de 694 nm. Um certo cristal de rubi possui $4,00 \times 10^{19}$ átomos de Cr (os átomos responsáveis pelo efeito *laser*). A transição envolvida é do primeiro estado excitado para o estado fundamental, e o pulso produzido dura 2,00 μs. Quando o pulso começa 60,0% dos íons de Cr estão no primeiro estado excitado, e os outros estão no estado fundamental. Qual é a potência média emitida durante o pulso? (Sugestão: Não ignore os íons que estão no estado fundamental.)

••59 O meio ativo de um certo *laser* que produz fótons com um comprimento de onda de 694 nm tem 6,00 cm de comprimento e 1,00 cm de diâmetro. (a) Considere o meio como uma cavidade ótica ressonante semelhante a um tubo de órgão fechado. Quantos nós possui uma onda estacionária ao longo do eixo do *laser*? (b) Qual teria que ser o aumento Δf da frequência do *laser* para que a onda estacionária tivesse mais um nó? (c) Mostre que Δf é igual ao inverso do tempo que a luz leva para fazer uma viagem de ida e volta ao longo do eixo do *laser*. (d) Qual é o aumento relativo da frequência, $\Delta f/f$? O índice de refração do meio ativo (um cristal de rubi) é 1,75.

••60 Os espelhos do *laser* da Fig. 40-21, que estão separados por uma distância de 8,0 cm, formam uma cavidade ótica na qual podem se estabelecer ondas estacionárias da luz do *laser*. Para qualquer onda estacionária a distância de 8,0 cm deve corresponder a um número inteiro n de meios comprimentos de onda. Na prática n é um número muito grande e, portanto, a diferença entre os comprimentos de onda das ondas estacionárias é muito pequena. Nas proximidades de $\lambda = 533$ nm qual é a diferença entre os comprimentos de onda de duas ondas estacionárias correspondentes a valores sucessivos de n ?

••61 Um átomo hipotético possui dois níveis de energia, e a transição entre eles produz luz com um comprimento de onda de

580 nm. Em uma certa amostra a 300 K, $4,0 \times 10^{20}$ átomos se encontram no estado de menor energia. (a) Quantos átomos estão no estado de maior energia, supondo que a amostra se encontra em equilíbrio térmico? (b) Suponha que $3,0 \times 10^{20}$ dos átomos são “bombeados” para o estado de maior energia por um processo externo, com $1,0 \times 10^{20}$ átomos permanecendo no estado de menor energia. Qual é a maior energia que pode ser liberada pelos átomos em um único pulso luminoso se todos os átomos sofrerem uma única transição entre os dois níveis (por absorção ou emissão estimulada)?

••62 O feixe de um *laser* de argônio (com um comprimento de onda de 515 nm) tem um diâmetro d de 3,00 mm e uma potência contínua de 5,00 W. O feixe é focalizado em uma superfície por uma lente cuja distância focal f é 3,50 cm. Uma figura de difração como a da Fig. 36-10 é formada, na qual o raio do disco central é dado por

$$R = \frac{1,22 f\lambda}{d}$$

(Veja a Eq. 36-12 e o Exemplo 36-4.) É possível demonstrar que o disco central contém 84% da potência incidente. (a) Qual é o raio do disco central? (b) Qual é a intensidade média (potência por unidade de área) do feixe incidente? (c) Qual é a intensidade média no disco central?

Problemas Adicionais

63 Os átomos de sódio excitados emitem duas linhas espectrais muito próximas (o chamado *dubleto do sódio*; veja a Fig. 40-26) com comprimentos de onda de 588,995 nm e 589,592 nm. (a) Qual é a diferença de energia entre os dois níveis superiores ($n = 3, \ell = 1$)? (b) Essa diferença de energia se deve ao fato de que o momento magnético de spin do elétron pode estar orientado paralelamente ou antiparalelamente ao campo magnético associado ao movimento orbital do elétron. Use o resultado do item (a) para calcular o módulo desse campo magnético interno.

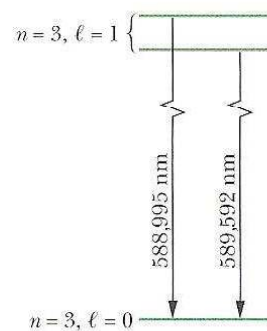


FIG. 40-26 Problema 63.

64 *Emissão estimulada em cometas.* Quando um cometa se aproxima do Sol o calor faz com que o gelo da superfície do cometa sublime, produzindo uma tênue atmosfera de vapor d’água. A luz solar dissocia as moléculas de vapor d’água, produzindo H e OH. A luz solar também pode excitar os radicais OH para níveis de maior energia, dois dos quais estão representados na Fig. 40-27.

Quando o cometa ainda está relativamente distante do Sol a luz solar excita os átomos para os níveis E_1 e E_2 com igual probabilidade (Fig. 40-27a). Assim, não ocorre uma inversão de população entre os dois níveis. Quando o cometa se aproxima do Sol, porém, a excitação de elétrons para o nível E_1 diminui e acontece uma inversão de população. A razão tem a ver com um

dos muitos comprimentos de onda (as chamadas *linhas de Fraunhofer*) que estão ausentes da luz solar por causa da absorção dos átomos da atmosfera solar.

Quando o cometa se aproxima do Sol a velocidade do cometa em relação ao Sol aumenta e o efeito Doppler se acentua, fazendo uma das linhas de Fraunhofer coincidir com o comprimento de onda necessário para excitar os elétrons dos radicais OH para o nível E_1 . A inversão de população resultante faz com que o radical comece a irradiar por emissão estimulada (Fig. 40-27b). Ao se aproximar do Sol em dezembro de 1973 e janeiro de 1974 o cometa Kouhoutek apresentou uma forte emissão na frequência de 1666 MHz em meados de janeiro. (a) Qual é a diferença de energia $E_2 - E_1$ para essa emissão? (b) Em que região do espectro eletromagnético fica essa frequência?

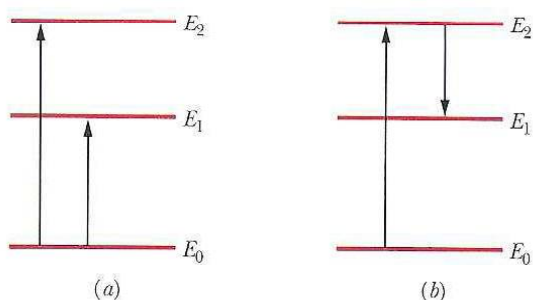


FIG. 40-27 Problema 64.

65 Um míssil balístico intercontinental pode ser destruído por um *laser* de alta potência? Um feixe com uma intensidade de 10^8 W/m² provavelmente seria suficiente para destruir um míssil em 1 s. (a) Um *laser* com uma potência de 5,0 MW, um comprimento de onda de $3,0 \mu\text{m}$ e um feixe com 4,0 m de diâmetro (essa descrição corresponde a um *laser* de grande porte) seria capaz de destruir um míssil a uma distância de 3000 km? (b) Qual deveria ser, no máximo, o valor do comprimento de onda do *laser* para que o míssil fosse destruído a essa distância? Use a equação para o disco central de difração dada pela Eq. 36-12 ($\text{sen } \theta = 1,22\lambda/d$).

66 *Laser de CO₂ marciano*. Quando a luz solar banha a atmosfera de Marte as moléculas de dióxido de carbono a uma altitude de aproximadamente 75 km se comportam como o meio ativo de um *laser*. Os níveis de energia envolvidos aparecem na Fig. 40-28; uma inversão de população acontece entre os níveis E_2 e E_1 . (a) Que comprimento de onda da luz solar excita as moléculas para o nível E_2 ? (b) Qual é o comprimento de onda da luz emitida pelo *laser*? (c) Em que região do espectro eletromagnético estão os comprimentos de onda calculados nos itens (a) e (b)?

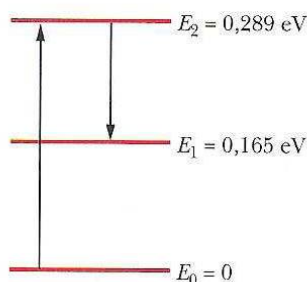


FIG. 40-28 Problema 66.

67 A Fig. 40-29 mostra o diagrama de níveis de energia para um elétron de um poço de potencial unidimensional infinito de

largura L . O número de estados degenerados em cada nível está indicado na figura: “não” significa não-degenerado (o que também se aplica ao estado fundamental), “duplo” significa 2 estados e “triplo” significa 3 estados. Suponha que o poço de potencial contém 22 elétrons. Desprezando a interação eletrostática dos elétrons, que múltiplo de $h^2/8mL^2$ corresponde à energia do primeiro estado excitado do sistema de 22 elétrons?

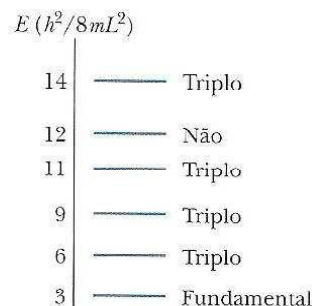


FIG. 40-29 Problema 67.

68 Um alvo de molibdênio ($Z = 42$) é bombardeado com elétrons de 35,0 keV, produzindo o espectro de raios X da Fig. 40-14. Os comprimentos de onda das linhas K_β e K_α são 63,0 e 71,0 pm, respectivamente. Determine as energias dos fótons responsáveis (a) pela linha K_α e (b) pela linha K_β . Deseja-se filtrar a radiação, usando uma das substâncias da tabela abaixo, de modo a obter uma predominância da linha K_α . Uma substância absorve mais a radiação x_1 que a radiação x_2 se um fóton da radiação x_1 tem energia suficiente para ejetar um elétron K de um átomo da substância, mas o mesmo não acontece com um fóton da radiação x_2 . A tabela mostra a energia de ionização do elétron K no molibdênio e em quatro outras substâncias. (c) Qual é a substância mais apropriada para ser usada como filtro? (d) Qual é a segunda substância mais apropriada?

	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru
Z	40	40	42	43	44
E_K (keV)	18,00	18,99	20,00	21,04	22,12

69 Mostre que a frequência de corte (em picômetros) do espectro contínuo de raios X de qualquer alvo é dada por $\lambda_{\text{min}} = 1240/V$, onde V é a diferença de potencial (em quilovolts) usada para acelerar os elétrons.

70 Medindo o tempo que um pulso de *laser* emitido por um observatório da Terra leva para ir e voltar da Lua depois de ser refletido por um espelho deixado pelos astronautas em nosso satélite é possível medir a distância entre os dois astros. (a) Qual é o valor previsto desse tempo? (b) A distância pode ser medida com uma precisão da ordem de 15 cm. A que indeterminação no tempo de percurso corresponde esse valor? (c) Se o *laser* ilumina uma região da Lua com um diâmetro de 3 km, qual é a divergência angular do feixe?

71 Os *lasers* podem ser usados para gerar pulsos luminosos muito estreitos, com uma duração de apenas 10 fs. (a) Quantos comprimentos de onda de luz visível ($\lambda = 500 \text{ nm}$) estão contidos em um pulso com esta duração? (b) Determine o valor de X (em anos) na seguinte relação:

$$\frac{10 \text{ fs}}{1 \text{ s}} = \frac{1 \text{ s}}{X}$$

- 72** (Um problema que envolve o princípio de correspondência.) Estime (a) o número quântico ℓ associado ao movimento da Terra em torno do Sol; (b) o número de orientações permitidas do plano da órbita da Terra, de acordo com as regras de quantização do momento angular. (c) Determine o valor de θ_{\min} , metade do ângulo do menor cone que pode ser varrido por uma perpendicular à órbita da Terra quando o planeta se move em torno do Sol.
- 73** Suponha que os elétrons não tivessem spin. Qual dos gases nobres permaneceria nessa categoria?

74 Mostre que se os 63 elétrons de um átomo de európio fossem distribuídos em camadas de acordo com a ordem “natural” dos números quânticos, esse elemento seria quimicamente semelhante ao sódio.

75 Com base na informação de que o comprimento de onda mínimo dos raios X produzidos por elétrons de 40,0 keV ao atingirem um alvo é 31,1 pm, estime o valor de h , a constante de Planck.

76 Mostre que $\hbar = 1,06 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 6,59 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}$.

77 Um elétron de um átomo tem o número quântico $\ell = 3$. Quais são os valores possíveis de n , m_ℓ e m_s ?