dos átomos de um material ferromagnético são alinhados por uma interação de origem quântica denominada *interação de câmbio*, o que dá origem a regiões (domínios) no interior do material que apresentam um momento dipolar magnético diferente de zero. Um campo magnético externo $\vec{B}_{ext}$ pode alinhar esses domínios, produzindo um momento dipolar magnético elevado no material como um todo, orientado na direção de $\vec{B}_{ext}$. Esse momento dipolar magnético pode persistir parcialmente quando $\vec{B}_{ext}$ é removido. Se $\vec{B}_{ext}$ é não uniforme, um material ferromagnético é atraído para as regiões onde o campo é mais intenso. Essas propriedades recebem o nome de *ferromagnetismo*. Um material ferromagnético se torna paramagnético quando a temperatura ultrapassa a *temperatura de Curie*.

Perguntas

1 A Fig. 32-19*a* mostra um capacitor de placas circulares que está sendo carregado. O ponto *a* (perto de um dos fios de ligação do capacitor) e o ponto *b* (no espaço entre as placas) estão à mesma distância do eixo central; o mesmo acontece com pontos *c* (um pouco mais afastado do fio da esquerda que o ponto *a*) e *d* (na mesma posição horizontal que o ponto *b*, mas fora do espaço entre as placas). Na Fig. 32-19*b*, uma curva mostra a variação com a distância *r* do módulo do campo magnético do lado de dentro e do lado de fora do fio da esquerda; a outra mostra a variação com a distância *r* do módulo do campo magnético dentro e fora do espaço entre as placas. As duas curvas se superpõem parcialmente. Determine a correspondência entre os três pontos assinalados na Fig. 32-19*b* e os quatro pontos da Fig. 32-19*a*.

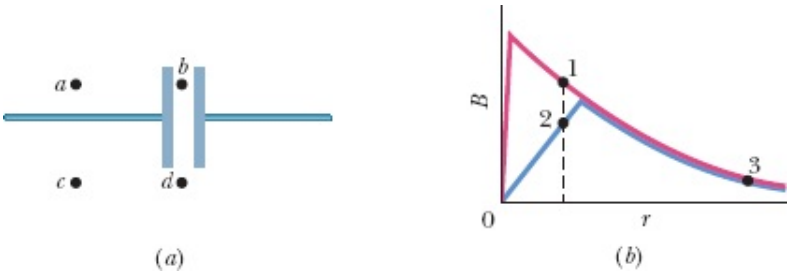


Figura 32-19 Pergunta 1.

2 A Fig. 32-20 mostra um capacitor de placas paralelas e a corrente nos fios de ligação do capacitor enquanto está sendo descarregado. (a) O campo elétrico $\vec{E}$ aponta para a esquerda ou para a direita? (b) O sentido da corrente de deslocamento i_d é para a esquerda ou para a direita? (c) O campo magnético no ponto *P* aponta para dentro ou para fora do papel?

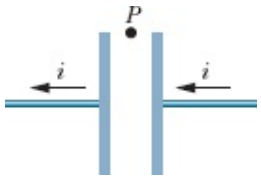


Figura 32-20 Pergunta 2.

3 A Fig. 32-21 mostra, em duas situações, o vetor campo elétrico $\vec{E}$ e uma linha de campo magnético

induzido. Determine, nos dois casos, se o módulo de $\vec{E}$ está aumentando ou diminuindo.

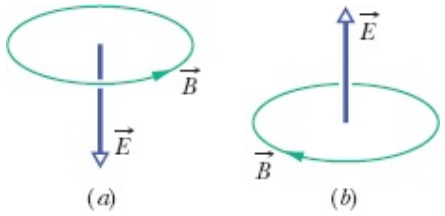


Figura 32-21 Pergunta 3.

4 A Fig. 32-22*a* mostra duas orientações possíveis para o spin de um elétron em relação a um campo magnético externo $\vec{B}_{ext}$. A Fig. 32-22*b* mostra três possibilidades para o gráfico da energia associada às duas orientações em função do módulo de $\vec{B}_{ext}$. As possibilidades *b* e *c* envolvem retas que se interceptam e a possibilidade *a* envolve retas paralelas. Qual das três é a correta?

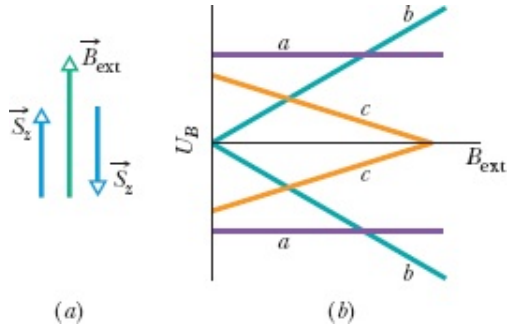


Figura 32-22 Pergunta 4.

5 Um elétron é submetido a um campo magnético externo $\vec{B}_{ext}$ com a componente S_z do spin do elétron antiparalela a $\vec{B}_{ext}$. Se o elétron sofre uma *inversão de spin* que torna a componente S_z paralela a $\vec{B}_{ext}$, o elétron ganha ou perde energia?

6 O módulo da força que age sobre a espira das Figs. 32-12*a* e 32-12*b* aumenta, diminui ou permanece constante (a) quando o módulo de $\vec{B}_{ext}$ aumenta e (b) quando a divergência de $\vec{B}_{ext}$ aumenta?

7 A Fig. 32-23 mostra a vista frontal de uma das duas placas quadradas de um capacitor de placas paralelas e quatro curvas fechadas situadas no espaço entre as placas. O capacitor está sendo descarregado. (a) Desprezando o efeito de borda, coloque as curvas na ordem decrescente do valor absoluto de $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ ao longo das curvas. (b) Ao longo de que curva(s) o ângulo entre as direções de $\vec{B}$ e $d\vec{s}$ é constante (o que facilita o cálculo do produto escalar dos dois vetores)? (c) Ao longo de que curva(s) o valor de *B* é constante (o que permite colocar *B* do lado de fora do sinal de integral da Eq. 32-3)?

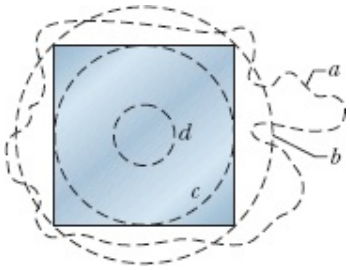


Figura 32-23 Pergunta 7.

8 A Fig. 32-24 mostra três elétrons girando em órbita no sentido anti-horário na presença de um campo magnético. O campo é não uniforme nas configurações 1 e 2 e uniforme na configuração 3. Para cada configuração, responda às seguintes perguntas: (a) O momento dipolar magnético orbital do elétron aponta para cima, para baixo ou é nulo? (b) A força magnética que age sobre o elétron aponta para cima, para baixo ou é nula?

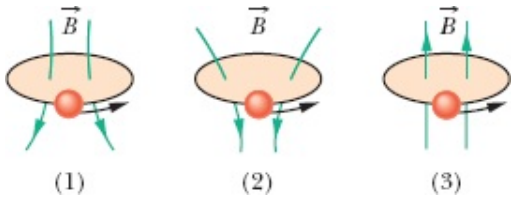


Figura 32-24 Perguntas 8, 9 e 10.

9 Substitua as órbitas da Pergunta 8 e da Fig. 32-24 por esferas diamagnéticas. Para cada configuração do campo magnético, responda às seguintes perguntas: (a) O momento dipolar magnético da esfera aponta para cima, para baixo ou é nulo? (b) A força magnética que age sobre o elétron aponta para cima, para baixo ou é nula?

10 Substitua as órbitas da Pergunta 8 e da Fig. 32-24 por esferas paramagnéticas. Para cada configuração do campo magnético, responda às seguintes perguntas: (a) O momento dipolar magnético da esfera aponta para cima, para baixo ou é nulo? (b) A força magnética que age sobre o elétron aponta para cima, para baixo ou é nula?

11 A Fig. 32-25 mostra três placas retangulares de um material ferromagnético no qual os dipolos magnéticos dos domínios foram orientados para fora da página (ponto preto) por um campo magnético muito intenso B_0. Nas três amostras, pequenos domínios residuais conservaram o sentido para dentro da página (cruz). A placa 1 é um cristal puro; as outras placas contêm impurezas concentradas em linhas; as paredes dos domínios não podem cruzar facilmente essas linhas.

O campo B_0 é removido e um outro campo, muito mais fraco, é aplicado no sentido oposto. A mudança faz com que os domínios residuais aumentem de tamanho. (a) Coloque as amostras na ordem do tamanho dos domínios residuais após a aplicação do segundo campo, começando pelo maior. Os materiais ferromagnéticos em que a orientação dos domínios pode ser mudada com facilidade são chamados de *magneticamente macios*; os materiais em que a orientação dos domínios não pode ser

mudada com facilidade são chamados de *magneticamente duros*. (b) Das três amostras, qual é a magneticamente a mais dura?



Figura 32-25 Pergunta 11.

12 A Fig. 32-26 mostra quatro barras de aço; três são ímãs permanentes. Um dos polos está indicado. Observa-se que as extremidades *a* e *d* se atraem, as extremidades *c* e *f* se repelem, as extremidades *e* e *h* se atraem e as extremidades *a* e *h* se atraem. (a) Que extremidades são polos norte? (b) Qual das barras não é um ímã permanente?

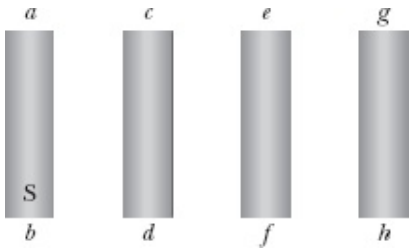


Figura 32-26 Pergunta 12.

Problemas

. - ... O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema.

Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física* de Jearl Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Módulo 32-1 Lei de Gauss para Campos Magnéticos

·1 O fluxo magnético através de cinco faces de um dado é $\Phi_B = \pm N$ Wb, em que $1 \leq N \leq 5$ é o número de pontos da face. O fluxo é positivo (para fora), se N for par, e negativo (para dentro), se N for ímpar. Qual é o fluxo através da sexta face do dado?

·2 A Fig. 32-27 mostra uma superfície fechada. Na face plana superior, que tem um raio de 2,0 cm, um campo magnético perpendicular $\vec{B}$ de módulo 0,30 T aponta para fora da superfície. Na face plana inferior, um fluxo magnético de 0,70 mWb aponta para fora da superfície. Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para dentro ou para fora) do fluxo magnético através da parte lateral da superfície.

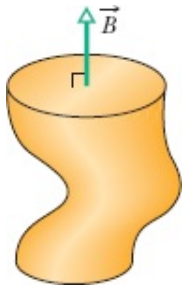


Figura 32-27 Problema 2.

··3 Uma superfície gaussiana em forma de cilindro circular reto tem um raio de 12,0 cm e um comprimento de 80,0 cm. Em uma das bases existe um fluxo, para dentro, de 25,0 μWb. Na outra base existe um campo magnético uniforme de 1,60 mT, normal à superfície e dirigido para fora. Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para dentro ou para fora) do fluxo magnético através da superfície lateral do cilindro.

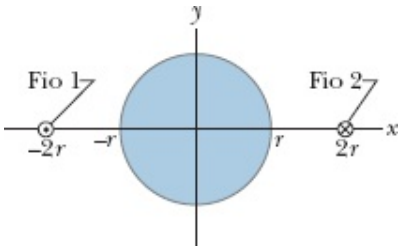


Figura 32-28 Problema 4.

···4 Dois fios, paralelos ao eixo z e separados por uma distância de $4r$, conduzem correntes iguais i em sentidos opostos, como mostra a Fig. 32-28. Um cilindro circular de raio r e comprimento L tem o eixo central no eixo z, a meio caminho entre os fios; as bases do cilindro estão à mesma distância da origem. Usando a lei de Gauss, escreva uma expressão para o fluxo magnético através da parte da superfície lateral do cilindro que está acima do eixo x. (*Sugestão*: Calcule o fluxo através da parte do plano xz que está no interior do cilindro.)

Módulo 32-2 Campos Magnéticos Induzidos

·5 O campo magnético induzido a 6,0 mm do eixo central de um capacitor de placas circulares e paralelas é $2{,}0 \times 10^{-7}$ T. As placas têm 3,0 mm de raio. Qual é a taxa de variação $d\vec{E}/dt$ do campo elétrico entre as placas?

·6 Um capacitor de placas quadradas de lado L está sendo descarregado por uma corrente de 0,75 A. A Fig. 32-29 é uma vista frontal de uma das placas, do ponto de vista do interior do capacitor. A linha tracejada mostra uma trajetória retangular no espaço entre as placas. Se L = 12 cm, W = 4,0 cm e H = 2,0 cm, qual é o valor de $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ ao longo da linha tracejada?

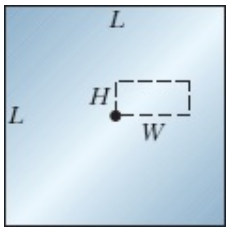


Figura 32-29 Problema 6.

··7 *Fluxo elétrico uniforme.* A Fig. 32-30 mostra uma região circular de raio $R = 3{,}00$ cm na qual um fluxo elétrico uniforme aponta para fora do papel. O fluxo elétrico total através da região é $\Phi_E = (3{,}00\ \text{mV} \cdot \text{m/s})t$, em que t está em segundos. Determine o módulo do campo magnético induzido a uma distância radial (a) de 2,00 cm e (b) de 5,00 cm.

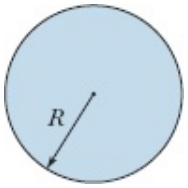


Figura 32-30 Problemas 7 a 10 e 19 a 22.

··8 *Fluxo elétrico não uniforme.* A Fig. 32-30 mostra uma região circular de raio $R = 3{,}00$ cm na qual um fluxo elétrico aponta para fora do papel. O fluxo elétrico envolvido por uma circunferência concêntrica de raio r é dado por $\Phi_{E,\text{env}} = (0{,}600\ \text{V} \cdot \text{m/s})(r/R)t$, em que $r \leq R$ e t está em segundos. Determine o módulo do campo magnético induzido a uma distância radial (a) de 2,00 cm e (b) de 5,00 cm.

··9 *Campo elétrico uniforme.* Na Fig. 32-30, um campo elétrico uniforme aponta para fora do papel em uma região circular de raio $R = 3{,}00$ cm. O módulo do campo elétrico é dado por $E = (4{,}50 \times 10^{-3}\ \text{V/m}\cdot\text{s})t$, em que t está em segundos. Determine o módulo do campo magnético induzido a uma distância radial (a) de 2,00 cm e (b) de 5,00 cm.

··10 *Campo elétrico não uniforme.* Na Fig. 32-30, um campo elétrico aponta para fora do papel em uma região circular de raio $R = 3{,}00$ cm. O módulo do campo elétrico é dado por $E = (0{,}500\ \text{V/m}\cdot\text{s})(1 - R/r)t$, em que t está em segundos e r é a distância radial ($r \leq R$). Determine o módulo do campo magnético induzido a uma distância radial (a) de 2,00 cm e (b) de 5,00 cm.

··11 Um capacitor de placas paralelas possui placas circulares de raio $R = 30$ mm, e a distância entre as placas é 5,0 mm. Uma diferença de potencial senoidal com um valor máximo de 150 V e uma frequência de 60 Hz é aplicada às placas, ou seja, a tensão entre as placas é

$$V = (150\ \text{V})\ \text{sen}[2\pi(60\ \text{Hz})t]$$

(a) Determine $B_{\text{máx}}(R)$, o valor máximo do campo magnético induzido a uma distância radial $r = R$. (b) Plote $B_{\text{máx}}(r)$ para $0 < r < 10$ cm.

··12 Um capacitor de placas paralelas com placas circulares de 40 mm de raio está sendo descarregado por uma corrente de 6,0 A. A que distância radial (a) do lado de dentro e (b) do lado de fora do espaço entre as placas o campo magnético induzido é igual a 75% do valor máximo? (c) Qual é o valor máximo?

Módulo 32-3 Corrente de Deslocamento

·13 Qual deve ser a taxa de variação da diferença de potencial entre as placas de um capacitor de placas paralelas com uma capacitância de 2 μF para que seja produzida uma corrente de deslocamento de 1,5 A?

·14 Um capacitor de placas paralelas com placas circulares de raio R está sendo carregado. Mostre que o módulo da densidade de corrente da corrente de deslocamento é $J_d = \varepsilon_0(dE/dt)$ para $r \leq R$.

·15 Prove que a corrente de deslocamento em um capacitor de placas paralelas de capacitância C pode ser escrita na forma $i_d = C(dV/dt)$, em que V é a diferença de potencial entre as placas.

·16 Um capacitor de placas paralelas com placas circulares de 0,10 m de raio está sendo descarregado. Um anel circular com 0,20 m de raio, concêntrico com o capacitor, está a meio caminho entre as placas. A corrente de deslocamento através do anel é de 2,0 A. Qual é a taxa de variação do campo elétrico entre as placas?

··17 Um fio de prata tem uma resistividade $\rho = 1{,}62 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot$ m e uma seção reta de 5,00 mm^2. A corrente no fio é uniforme e varia à taxa de 2000 A/s quando a corrente é 100 A. (a) Determine o módulo do campo elétrico (uniforme) no fio quando a corrente é 100 A. (b) Determine a corrente de deslocamento no fio nesse instante. (c) Determine a razão entre o módulo do campo magnético produzido pela corrente de deslocamento e o módulo do campo magnético produzido pela corrente a uma distância r do fio.

··18 O circuito da Fig. 32-31 é formado por uma chave S, uma fonte ideal de 12,0 V, um resistor de 20,0 MΩ e um capacitor cujo dielétrico é o ar. O capacitor tem placas circulares paralelas com 5,00 cm de raio, separadas por uma distância de 3,00 mm. No instante $t = 0$, a chave S é fechada e o capacitor começa a se carregar. O campo elétrico entre as placas é uniforme. No instante $t = 250\ \mu$s, qual é o módulo do campo magnético no interior do capacitor, a uma distância radial de 3,00 cm?

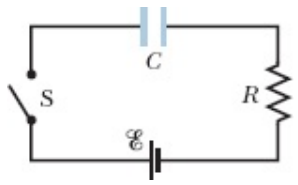


Figura 32-31 Problema 18.

··19 *Densidade de corrente de deslocamento uniforme*. A Fig. 32-30 mostra uma região circular de raio $R = 3{,}00$ cm na qual existe uma corrente de deslocamento dirigida para fora do papel. A corrente de

deslocamento possui uma densidade de corrente uniforme cujo valor absoluto é J_d = 6,00 A/m^2. Determine o módulo do campo magnético produzido pela corrente de deslocamento (a) a 2,00 cm do centro da região e (b) a 5,00 cm do centro da região.

··20 *Corrente de deslocamento uniforme*. A Fig. 32-30 mostra uma região circular de raio R = 3,00 cm na qual existe uma corrente de deslocamento uniforme i_d = 0,500 A dirigida para fora do papel. Determine o módulo do campo magnético produzido pela corrente de deslocamento (a) a 2,00 cm do centro da região e (b) a 5,00 cm do centro da região.

··21 *Densidade de corrente de deslocamento não uniforme*. A Fig. 32-30 mostra uma região circular de raio R = 3,00 cm na qual existe uma corrente de deslocamento dirigida para fora do papel. O módulo da densidade de corrente da corrente de deslocamento é dado por $J_d = (4{,}00\ \text{A/m}^2)(1 - r/R)$, em que $r \leq R$ é a distância do centro da região. Determine o módulo do campo magnético produzido pela corrente de deslocamento (a) em r = 2,00 cm e (b) em r = 5,00 cm.

··22 *Corrente de deslocamento não uniforme*. A Fig. 32-30 mostra uma região circular de raio R = 3,00 cm na qual existe uma corrente de deslocamento i_d dirigida para fora do papel. O módulo da corrente de deslocamento é dado por $i_d = (3{,}00\ \text{A})(r/R)$, em que $r \leq R$ é a distância do centro da região. Determine o módulo do campo magnético produzido por i_d (a) em r = 2,00 cm e (b) em r = 5,00 cm.

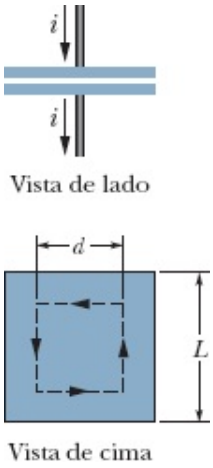


Figura 32-32 Problema 23.

··23 Na Fig. 32-32, um capacitor de placas paralelas possui placas quadradas, de lado L = 1,0 m. Uma corrente de 2,0 A carrega o capacitor, produzindo um campo elétrico uniforme $\vec{E}$ entre as placas, com $\vec{E}$ perpendicular às placas. (a) Qual é a corrente de deslocamento i_d na região entre as placas? (b) Qual é o valor de dE/dt nessa região? (c) Qual é a corrente de deslocamento envolvida pela trajetória tracejada, um quadrado com d = 0,50 m de lado? (d) Qual é o valor de $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ ao longo da trajetória tracejada?

··24 O módulo do campo elétrico entre as duas placas paralelas circulares da Fig. 32-33 é $E = (4{,}0 \times 10^5) - (6{,}0 \times 10^4 t)$, com E em volts por metro e t em segundos. No instante t = 0, $\vec{E}$ aponta para cima. A área das placas é 4,0 × 10^{-2} m^2. Para $t \geq 0$, determine (a) o módulo e (b) o sentido (para cima ou para

baixo) da corrente de deslocamento na região entre as placas. (c) Qual é o sentido do campo magnético induzido (horário ou anti-horário) do ponto de vista da figura?

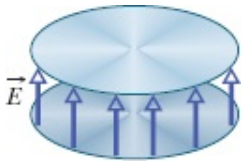


Figura 32-33 Problema 24.

··25 Enquanto um capacitor de placas paralelas com placas circulares de 20 cm de diâmetro está sendo carregado, a densidade de corrente da corrente de deslocamento na região entre as placas é uniforme e tem módulo de 20 A/m^2. (a) Calcule o módulo B do campo magnético a uma distância r = 50 mm do eixo de simetria dessa região. (b) Calcule dE/dt nessa região.

··26 Um capacitor com placas paralelas circulares, de raio R = 1,20 cm, está sendo descarregado por uma corrente de 12,0 A. Considere um anel de raio $R/3$, concêntrico com o capacitor, situado entre as placas. (a) Qual é a corrente de deslocamento envolvida pelo anel? O campo magnético máximo induzido tem módulo de 12,0 mT. A que distância radial (b) do lado de dentro e (c) do lado de fora do espaço entre as placas o módulo do campo magnético induzido é 3,00 mT?

··27 Na Fig. 32-34, um campo elétrico uniforme $\vec{E}$ é reduzido a zero. A escala do eixo vertical é definida por E_s = 6,0 × 10^5 N/C, e a escala do eixo horizontal é definida por t_s = 12,0 μs. Calcule o módulo da corrente de deslocamento através de uma área de 1,6 m^2 perpendicular ao campo durante os intervalos de tempo a, b e c mostrados no gráfico. (Ignore o comportamento da corrente na extremidade dos intervalos.)

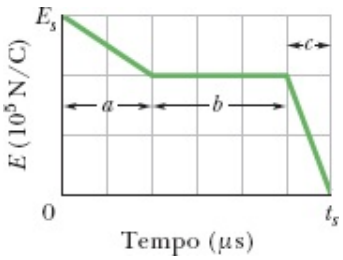


Figura 32-34 Problema 27.

··28 A Fig. 32-35*a* mostra a corrente i que atravessa um fio de resistividade 1,62 × 10^{-8} Ω · m. O módulo da corrente em função do tempo t está indicado da Fig. 32-35*b*. A escala do eixo vertical é definida por i_s = 10,0 A, e a escala do eixo horizontal é definida por t_s = 50,0 ms. O ponto P está a uma distância radial de 9,00 mm do centro do fio. Determine o módulo do campo magnético $\vec{B}_i$ no ponto P devido à corrente i (a) em t = 20 ms, (b) em t = 40 ms, (c) em t = 60 ms. Suponha agora que o campo elétrico responsável pela corrente exista apenas no interior do fio; determine o módulo do campo magnético $\vec{B}_{id}$ no ponto P devido à corrente de deslocamento i_d no fio (d) em t = 20 ms, (e) em t = 40 ms e (f) em t = 60 ms. No ponto P em t = 20 s, determine o sentido (para dentro ou para fora do papel (g) de $\vec{B}_i$

e (h) de $\vec{B}_{id}$.

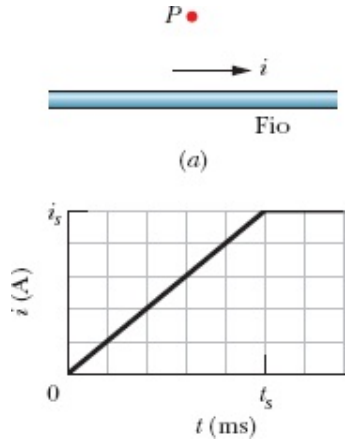


Figura 32-35 Problema 28.

···29 Na Fig. 32-36, um capacitor de placas circulares, de raio R = 18,0 cm, está ligado a uma fonte de força eletromotriz $\mathscr{E}$ sen ωt, em que $\mathscr{E}$ = 220 V e ω = 130 rad/s. O valor máximo da corrente de deslocamento é i_d = 7,60 μA. Despreze o efeito de borda. (a) Qual é o valor máximo da corrente i no circuito? (b) Qual é o valor máximo de $d\Phi_E/dt$, em que Φ_E é o fluxo elétrico através da região entre as placas? (c) Qual é a distância d entre as placas? (d) Determine o valor máximo do módulo de $\vec{B}$ entre as placas a uma distância r = 11,0 cm do centro.

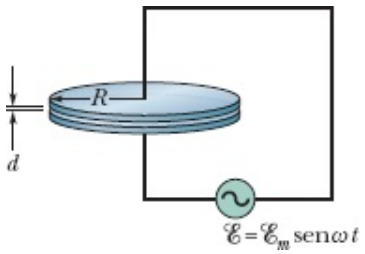


Figura 32-36 Problema 29.

Módulo 32-4 Ímãs Permanentes

·30 Suponha que o valor médio da componente vertical do campo magnético da Terra seja 43 μT (para baixo) em todo o estado americano do Arizona, que tem uma área de 2,95 × 10^5 km^2. Determine (a) o valor absoluto e (b) o sentido (para dentro ou para fora) do fluxo magnético da Terra no resto da superfície do planeta (ou seja, em toda a superfície terrestre, com exceção do Arizona).

·31 No estado americano de New Hampshire, o valor médio da componente horizontal do campo magnético da Terra em 1912 era de 16 μT, e a inclinação média era de 73°. Qual era o valor correspondente do módulo do campo magnético da Terra?

Módulo 32-5 O Magnetismo e os Elétrons

·32 A Fig. 32-37*a* mostra dois valores permitidos de energia (*níveis de energia*) de um átomo.

Quando o átomo é submetido a um campo magnético de 0,500 T, os níveis mudam para os que aparecem na Fig. 32-37*b* por causa da energia associada ao produto escalar $\vec{\mu}_{orb} \cdot \vec{B}$. (Estamos ignorando o efeito de $\vec{\mu}_s$.) O nível E_1 não é alterado, mas o nível E_2 se desdobra em três níveis muito próximos. Determine o valor de m_ℓ associado (a) ao nível de energia E_1 e (b) ao nível de energia E_2. (c) Qual é o valor, em joules, do espaçamento entre os níveis desdobrados?

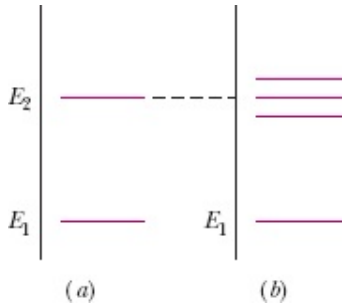


Figura 32-37 Problema 32.

·33 Se um elétron de um átomo possui um momento angular orbital com $m_\ell = 0$, determine as componentes (a) $L_{orb,z}$ e (b) $\mu_{orb,z}$. Se o átomo for submetido a um campo magnético externo $\vec{B}$ de módulo 35 mT, que aponta no sentido positivo do eixo z, determine (c) a energia U_{orb} associada a $\vec{\mu}_{orb}$ e (d) a energia U_{spin} associada a $\vec{\mu}_s$. Se, em vez disso, o átomo possuir um momento angular orbital com $m_\ell = -3$, determine (e) $L_{orb,z}$, (f) $\mu_{orb,z}$, (g) U_{orb} e (h) U_{spin}.

·34 Determine a diferença de energia entre as orientações paralela e antiparalela da componente z do momento dipolar magnético de spin de um elétron submetido a um campo magnético de módulo 0,25 T que aponta no sentido positivo do eixo z.

·35 Determine o valor da componente medida do momento dipolar magnético orbital de um elétron (a) com $m_\ell = 1$ e (b) com $m_\ell = -2$.

·36 Um elétron é submetido a um campo magnético $\vec{B}$ que aponta no sentido positivo do eixo z. A diferença de energia entre os alinhamentos paralelo e antiparalelo da componente z do momento magnético de spin do elétron na presença de $\vec{B}$ é $6{,}00 \times 10^{-25}$ J. Determine o módulo de $\vec{B}$.

Módulo 32-6 Diamagnetismo

·37 A Fig. 32-38 mostra um anel (L) que serve de modelo para um material diamagnético. (a) Faça um esboço das linhas de campo magnético no interior e nas proximidades do anel devido ao ímã em forma de barra. Determine (b) a orientação do momento dipolar magnético $\vec{\mu}$ do anel, (c) o sentido da corrente convencional i no anel (horário ou anti-horário) e (d) a orientação da força magnética exercida pelo campo magnético do ímã sobre o anel.



Figura 32-38 Problemas 37 e 71.

···38 Um elétron, de massa m e carga $-e$, se move em uma órbita circular de raio r em torno de um núcleo quando um campo magnético uniforme $\vec{B}$ é aplicado perpendicularmente ao plano da órbita. Supondo que o raio da órbita não varia e que a variação da velocidade do elétron devido ao campo $\vec{B}$ é pequena, escreva uma expressão para a variação do momento dipolar magnético orbital do elétron devido à presença do campo.

Módulo 32-7 Paramagnetismo

·39 Em um teste para verificar se a magnetização de um sal paramagnético ao qual se aplica a curva da Fig. 32-14 obedece à lei de Curie, o sal é submetido a um campo magnético de 0,50 T, que permanece constante durante todo o experimento, e a magnetização M é medida em temperaturas que variam de 10 a 300 K. Os resultados estarão de acordo com a lei de Curie?

·40 Um sal paramagnético ao qual a curva de magnetização da Fig. 32-14 se aplica é mantido à temperatura ambiente (300 K). Determine para qual valor do campo magnético aplicado o grau de saturação magnética é (a) 50% e (b) 90%. (c) É possível produzir esses campos em laboratório?

·41 Um ímã de forma cilíndrica tem 5,00 cm de comprimento e 1,00 cm de raio. A magnetização é uniforme, com um módulo de $5{,}30 \times 10^3$ A/m. Qual é o momento dipolar magnético do ímã?

·42 Um campo magnético de 0,50 T é aplicado a um gás paramagnético cujos átomos possuem um momento dipolar magnético intrínseco de $1{,}0 \times 10^{-23}$ J/T. A que temperatura a energia cinética média de translação dos átomos é igual à energia necessária para inverter a orientação de um desses dipolos na presença do campo magnético?

··43 Um elétron com energia cinética K_e está se movendo em uma trajetória circular cujo plano é perpendicular a um campo magnético uniforme orientado no sentido positivo do eixo z. O elétron está sujeito apenas à força exercida pelo campo. (a) Mostre que o momento dipolar magnético do elétron, devido ao movimento orbital, tem o sentido oposto ao do campo magnético $\vec{B}$ e que seu módulo é dado por $\mu = K_e/B$. Determine (b) o módulo e (c) a orientação do momento dipolar magnético de um íon positivo de energia cinética K_i nas mesmas circunstâncias. (d) Um gás ionizado possui $5{,}3 \times 10^{21}$ elétrons/m^3 e a mesma concentração de íons. Supondo que a energia cinética média dos elétrons é $6{,}2 \times 10^{-20}$ J e a energia cinética média dos íons é $7{,}6 \times 10^{-21}$ J, calcule a magnetização do gás ao ser submetido a um campo magnético de 1,2 T.

··44 A Fig. 32-39 mostra a curva de magnetização de um material paramagnético. A escala do eixo vertical é definida por $a = 0{,}15$, e a escala do eixo horizontal é definida por $b = 0{,}2$ T/K. Sejam μ_{exp} o valor experimental do momento magnético de uma amostra e $\mu_{máx}$ o valor máximo possível do momento magnético da mesma amostra. De acordo com a lei de Curie, qual é o valor da razão $\mu_{exp}/\mu_{máx}$ quando a amostra é submetida a um campo magnético de 0,800 T a uma temperatura de 2,00 K?

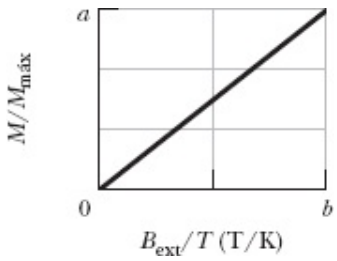


Figura 32-39 Problema 44.

···45 Considere um sólido com N átomos por unidade de volume, cada átomo com um momento dipolar magnético $\vec{\mu}$. Suponha que existam apenas duas orientações possíveis para $\vec{\mu}$: paralelo ou antiparalelo a um campo magnético externamente aplicado $\vec{B}$ (o que, segundo a física quântica, acontece quando apenas um elétron do átomo é responsável pelo spin $\vec{\mu}$). De acordo com a mecânica estatística, a probabilidade de que um átomo esteja em um estado de energia U é proporcional a $e^{-U/kT}$, em que T é a temperatura e k é a constante de Boltzmann. Assim, como a energia U é igual a $-\vec{\mu} \cdot \vec{B}$, a fração de átomos com o momento dipolar paralelo a $\vec{B}$ é proporcional a $e^{\mu B/kT}$ e a fração de átomos com o momento dipolar antiparalelo a $\vec{B}$ é proporcional a $e^{-\mu B/kT}$ (a) Mostre que o módulo da magnetização do sólido é $M = N\mu \tanh(\mu B/kT)$, em que tanh é a função tangente hiperbólica: $\tanh(x) = (e^x - e^{-x})/(e^x + e^{-x})$. (b) Mostre que o resultado do item (a) se reduz a $M = N\mu^2 B/kT$ para $\mu B \ll kT$. (c) Mostre que o resultado do item (a) se reduz a $M = N\mu$ para $\mu B \gg kT$. (d) Mostre que (b) e (c) concordam qualitativamente com a Fig. 32-14.

Módulo 32-8 Ferromagnetismo

··46 Uma bússola é colocada em uma superfície horizontal, e a agulha recebe um leve empurrão que a faz oscilar em torno da posição de equilíbrio. A frequência de oscilação é 0,312 Hz. O campo magnético da Terra no local possui uma componente horizontal de 18,0 μT, e a agulha possui um momento magnético de 0,680 mJ/T. Determine o momento de inércia da agulha em relação ao eixo (vertical) de rotação.

··47 A Terra possui um momento dipolar magnético de $8,0 \times 10^{22}$ J/T. (a) Se esse momento dipolar fosse causado por uma esfera de ferro magnetizado situada no centro da Terra, qual deveria ser o raio da esfera? (b) Que fração do volume da Terra a esfera ocuparia? Suponha um alinhamento perfeito dos dipolos. A massa específica do núcleo da Terra é 14 g/cm^3 e o momento dipolar magnético de um átomo de ferro é $2,1 \times 10^{-23}$ J/T. (*Nota*: O núcleo da Terra realmente contém uma grande quantidade de ferro, mas a possibilidade de que o magnetismo terrestre se deva a um ímã permanente parece remota, por várias razões. Para começar, a temperatura do núcleo é maior que a temperatura de Curie do ferro.)

··48 O módulo do momento dipolar associado a um átomo de ferro em uma barra de ferro é $2,1 \times 10^{-23}$ J/T. Suponha que os momentos dipolares de todos os átomos da barra, que tem 5,0 cm de comprimento e uma seção reta de 1,0 cm^2, estejam alinhados. (a) Qual é o momento dipolar da barra? (b) Que torque deve ser exercido sobre a barra para mantê-la perpendicular a um campo externo de 1,5 T? (A massa específica do ferro é de 7,9 g/cm^3.)

··49 O acoplamento de câmbio mencionado no Módulo 32-8 como responsável pelo ferromagnetismo

não é a interação entre dipolos magnéticos atômicos. Para mostrar o que leva a essa conclusão, calcule (a) o módulo do campo magnético a uma distância de 10 nm, ao longo do eixo do dipolo, de um átomo com um momento dipolar magnético de $1,5 \times 10^{-23}$ J/T (o átomo de cobalto) e (b) a energia mínima necessária para inverter um segundo dipolo magnético do mesmo tipo na presença do campo calculado do item (a). (c) Comparando o resultado do item (b) com a energia cinética média de translação de um átomo à temperatura ambiente, 0,039 eV, o que podemos concluir?

··50 Uma barra magnética com 6,00 cm de comprimento, 3,00 mm de raio e uma magnetização uniforme de $2,70 \times 10^3$ A/m pode girar em torno do centro como uma agulha de bússola. A barra é submetida a um campo magnético uniforme $\vec{B}$ de módulo 35,0 mT cuja direção faz um ângulo de 68,0° com a direção de momento dipolar da barra. (a) Determine o módulo do torque exercido pelo campo $\vec{B}$ sobre a barra. (b) Determine a variação da energia orientacional da barra se o ângulo mudar para 34,0°.

··51 A magnetização de saturação do níquel, um metal ferromagnético, é $4,70 \times 10^5$ A/m. Calcule o momento dipolar magnético de um átomo de níquel. (A massa específica do níquel é 8,90 g/cm^3 e a massa molar é 58,71 g/mol.)

··52 Medidas realizadas em minas e poços revelam que a temperatura no interior da Terra aumenta com a profundidade à taxa média de 30°C/km. Supondo que a temperatura na superfície seja 10°C, a que profundidade o ferro deixa de ser ferromagnético? (A temperatura de Curie do ferro varia muito pouco com a pressão.)

··53 Um anel de Rowland é feito de um material ferromagnético. O anel tem seção reta circular, com um raio interno de 5,0 cm e um raio externo de 6,0 cm, e uma bobina primária enrolada no anel possui 400 espiras. (a) Qual deve ser a corrente na bobina para que o módulo do campo do toroide tenha o valor B_0 = 0,20 mT? (b) Uma bobina secundária enrolada no anel possui 50 espiras e uma resistência de 8,0 Ω. Se para esse valor de B_0 temos $B_M = 800B_0$, qual é o valor da carga que atravessa a bobina secundária quando a corrente na bobina primária começa a circular?

Problemas Adicionais

54 Use as aproximações do Problema 61 para calcular (a) a altitude em relação à superfície na qual o módulo do campo magnético da Terra é 50,0% do valor na superfície na mesma latitude; (b) o módulo máximo do campo magnético na interface do núcleo com o manto, 2900 km abaixo da superfície da Terra; (c) o módulo e (d) a inclinação do campo magnético na Terra no polo norte geográfico. (e) Explique por que os valores calculados nos itens (c) e (d) não são necessariamente iguais aos valores medidos.

55 A Terra possui um momento dipolar magnético de $8,0 \times 10^{22}$ J/T. (a) Que corrente teria que existir em uma única espira de fio estendida na superfície da Terra ao longo do equador geomagnético para criar um dipolo de mesma intensidade? (b) Esse arranjo poderia ser usado para cancelar o magnetismo da Terra em pontos do espaço muito acima da superfície? (c) Esse arranjo poderia ser usado para cancelar o magnetismo da Terra em pontos da superfície?

56 Uma carga q está distribuída uniformemente ao longo de um anel delgado, de raio r. O anel está girando com velocidade angular ω em torno de um eixo que passa pelo centro e é perpendicular ao plano do anel. (a) Mostre que o módulo do momento magnético associado à carga em movimento é dado por $\mu = q\omega r^2/2$. (b) Qual será a orientação do momento magnético se a carga for positiva?

57 A agulha de uma bússola, com 0,050 kg de massa e 4,0 cm de comprimento, está alinhada com a componente horizontal do campo magnético da Terra em um local em que a componente tem o valor $B_h = 16\ \mu$T. Depois que a agulha recebe um leve empurrão, ela começa a oscilar com uma frequência angular $\omega = 45$ rad/s. Supondo que a agulha seja uma barra fina e uniforme, livre para girar em torno do centro, determine o módulo do momento dipolar magnético da agulha.

58 O capacitor da Fig. 32-7 está sendo carregado com uma corrente de 2,50 A. O raio do fio é 1,50 mm e o raio das placas é 2,00 cm. Suponha que sejam uniformes as distribuições da corrente i no fio e da corrente de deslocamento i_d no espaço entre as placas do capacitor. Determine o módulo do campo magnético produzido pela corrente i nas seguintes distâncias em relação ao eixo do fio: (a) 1,00 mm (dentro do fio), (b) 3,00 mm (fora do fio) e (c) 2,20 cm (fora do fio). Determine o módulo do campo magnético produzido pela corrente i_d nas seguintes distâncias em relação à reta que liga os centros das placas: (d) 1,00 mm (dentro do espaço entre as placas), (e) 3,00 mm (dentro do espaço entre as placas) e (f) 2,20 cm (fora do espaço entre as placas). (g) Explique por que os campos são muito diferentes para o fio e para o espaço entre as placas no caso das duas distâncias menores, mas têm valores semelhantes para a distância maior.

59 Um capacitor de placas paralelas circulares de raio $R = 16$ mm e afastadas de uma distância $d = 5{,}0$ mm produz um campo uniforme entre as placas. A partir do instante $t = 0$, a diferença de potencial entre as placas é dada por $V = (100\ \text{V})$, em que $\tau = 12$ ms. Determine o módulo do campo magnético a uma distância $r = 0{,}80R$ do eixo central (a) em função do tempo, para $t \geq 0$ e (b) no instante $t = 3\tau$.

60 Um fluxo magnético de 7,0 mWb, dirigido para fora, atravessa a face plana inferior da superfície fechada da Fig. 32-40. Na face plana superior (que tem um raio de 4,2 cm) existe um campo magnético $\vec{B}$ de 0,40 T perpendicular à superfície, que aponta para cima. Determine (a) o valor absoluto e (b) o sentido (para dentro ou para fora) do fluxo magnético através da parte curva da superfície.

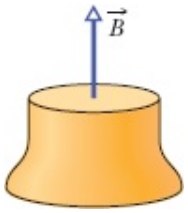


Figura 32-40 Problema 60.

61 O campo magnético da Terra pode ser aproximado pelo campo magnético de um dipolo. As componentes horizontal e vertical do campo a uma distância r do centro da Terra são dadas por

$$B_h = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi r^3} \cos \lambda_m, \qquad B_v = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi r^3} \operatorname{sen} \lambda_m,$$

em que λ_m é a *latitude magnética* (latitude medida a partir do equador geomagnético em direção a um dos polos geomagnéticos). Suponha que o momento dipolar da Terra tem um módulo $\mu = 8{,}00 \times 10^{22}$ A·m^2. (a) Mostre que o módulo do campo magnético da Terra na latitude λ_m é dado por

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi r^3} \sqrt{1 + 3 \operatorname{sen}^2 \lambda_m}.$$

(b) Mostre que a inclinação φ_i do campo magnético está relacionada à latitude magnética λ_m pela equação $\tan \varphi_i = 2 \tan \lambda_m$.

62 Use os resultados do Problema 61 para calcular (a) o módulo e (b) a inclinação do campo magnético da Terra no equador geomagnético, (c) o módulo e (d) a inclinação do campo na latitude geomagnética de 60° e (e) o módulo e (f) a inclinação do campo no polo norte geomagnético.

63 Um capacitor de placas paralelas com placas circulares de 55,0 mm de raio está sendo carregado. A que distância do eixo do capacitor (a) dentro do espaço entre as placas e (b) fora do espaço entre as placas o módulo do campo magnético induzido é igual a 50,0% do valor máximo?

64 Uma amostra de um sal paramagnético ao qual se aplica a curva da Fig. 32-14 é submetida a um campo magnético uniforme de 2,0 T. Determine a que temperatura o grau de saturação magnética da amostra é (a) 50% e (b) 90%.

65 Um capacitor de placas paralelas circulares de raio R está sendo descarregado. A corrente de deslocamento que atravessa uma área circular central, paralela às placas, de raio $R/2$, é 2,0 A. Qual é a corrente de descarga?

66 A Fig. 32-41 mostra a variação de um campo elétrico que é perpendicular a uma região circular de 2,0 m^2. Qual é a maior corrente de deslocamento que atravessa a região durante o período de tempo representado no gráfico?

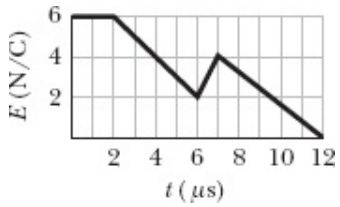


Figura 32-41 Problema 66.

67 Na Fig. 32-42, um capacitor de placas paralelas está sendo descarregado por uma corrente $i = 5{,}0$ A. As placas são quadrados de lado $L = 8{,}0$ mm. (a) Qual é a taxa de variação do campo elétrico entre as placas? (b) Qual é o valor de $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ ao longo da linha tracejada, na qual $H = 2{,}0$ mm e $W = 3{,}0$ mm?

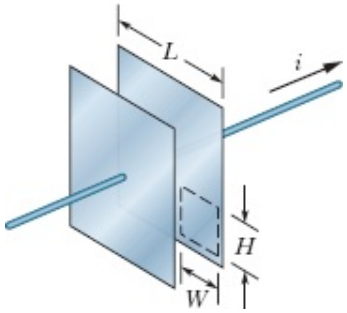


Figura 32-42 Problema 67.

68 Qual é o valor da componente medida do momento dipolar magnético orbital de um elétron (a) com $m_\ell = 3$ e (b) com $m_\ell = -4$?

69 Na Fig. 32-43, um ímã em forma de barra está nas vizinhanças de um tubo cilíndrico de papel. (a) Faça um esboço das linhas de campo magnético que atravessam a superfície do tubo. (b) Qual é o sinal de $\vec{B} \cdot d\vec{A}$ para todas as áreas $d\vec{A}$ do tubo? (c) Esse fato está em contradição com a lei de Gauss para o magnetismo? Justifique sua resposta.



Figura 32-43 Problema 69.

70 No estado de menor energia do átomo de hidrogênio, a distância mais provável entre o único elétron e o próton (o núcleo) é $5{,}2 \times 10^{-11}$ m. (a) Calcule o módulo do campo elétrico produzido pelo próton a essa distância. A componente $\mu_{s,z}$ do momento dipolar magnético do spin do próton é $1{,}4 \times 10^{-26}$ J/T. (b) Calcule o módulo do campo magnético do próton à distância de $5{,}2 \times 10^{-11}$ m ao longo do eixo z. (*Sugestão*: Use a Eq. 29-27.) (c) Qual é a razão entre o momento dipolar magnético de spin do elétron e o momento dipolar magnético de spin do próton?

71 A Fig. 32-38 mostra um anel (L) que serve como modelo de um material paramagnético. (a) Faça um esboço das linhas de campo magnético no interior e nas proximidades do anel devido ao ímã em forma de barra. Determine (b) a orientação do momento dipolar magnético $\vec{\mu}$ do anel, (c) o sentido da corrente convencional i no anel (horário ou anti-horário) e (d) a orientação da força magnética exercida pelo campo magnético do ímã sobre o anel.

72 Duas placas (como as da Fig. 32-7) estão sendo descarregadas por uma corrente constante. As placas têm 4,00 cm de raio. Durante a descarga, em um ponto entre as placas situado a uma distância de 2,00 cm do eixo central, o campo magnético tem um módulo de 12,5 nT. (a) Qual é o módulo do campo magnético a 6,00 cm do eixo central? (b) Qual é a corrente nos fios ligados às placas?

73 Se um elétron em um átomo tem um momento angular orbital com valores de m_ℓ limitados por ± 3, quantos valores de (a) $L_{\text{orb},z}$ e (b) $\mu_{\text{orb},z}$ pode ter o elétron? Em termos de h, m e e, qual é o maior valor permitido (c) de $L_{\text{orb},z}$ e (d) de $\mu_{\text{orb},z}$? (e) Qual é o maior valor permitido da componente z do momento

angular *total* do elétron (soma do momento orbital com o momento de spin)? (f) Quantos valores (incluindo o sinal) são permitidos para a componente z do momento angular total do elétron?

74 Um capacitor de placas paralelas circulares está sendo carregado. Considere um anel circular com o centro no eixo central e situado entre as placas. Se o raio do anel, 3,00 cm, é maior que o raio das placas, qual é a corrente de deslocamento entre as placas quando o campo magnético ao longo do anel tem um módulo de 2,00 μT?

75 Suponha que ±4 sejam os limites dos valores de m_ℓ de um elétron em um átomo. (a) Quantos valores são possíveis para a componente $\mu_{\text{orb},z}$ do momento dipolar magnético orbital do elétron? (b) Desses valores, qual possui o maior valor absoluto? Suponha que o átomo seja submetido a um campo magnético de 0,250 T, que aponte no sentido positivo do eixo z. Determine (c) a maior energia e (d) a menor energia associada a esses valores possíveis de $\mu_{\text{orb},z}$.

76 Quais são as componentes medidas do momento dipolar magnético orbital de um elétron com (a) $m_\ell = 3$ e (b) $m_\ell = -4$?