Snow666

gido para cima, para baixo ou é nulo? (b) A força magnética que age sobre o elétron está dirigida para cima, para baixo ou é nula?

9 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?

10 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 aumentamos o módulo de $\vec{B}_{ext}$; (b) quando aumentamos a divergência de $\vec{B}_{ext}$?

11 A Fig. 32-26 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 dispostas 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 magneticamente mais dura?

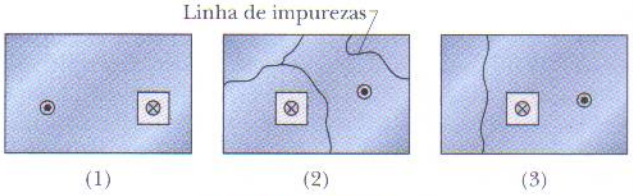

FIG. 32-26 Pergunta 11.

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 32-2 Lei de Gauss para Campos Magnéticos

•1 O fluxo magnético através de cinco faces de um dado é $\Phi_B = \pm N$ Wb, onde $1 \leq N \leq 5$ é o número de pontos da face. O fluxo é positivo (para fora) se N é par e negativo (para dentro) se N é 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. Na face plana inferior um fluxo magnético de 0,70 mWb é dirigido para fora. Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para dentro ou para fora) do fluxo magnético através da parte lateral da superfície.

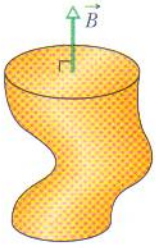

FIG. 32-27 Problema 2.

••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.

•••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 sobre o eixo z a meio caminho entre os fios. Com base na lei de Gauss, escreva uma expressão para o fluxo magnético através da metade 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.)

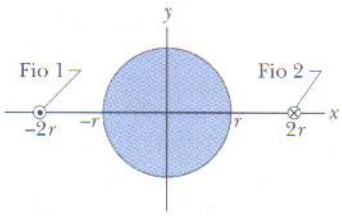

FIG. 32-28 Problema 4.

seção 32-3 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?

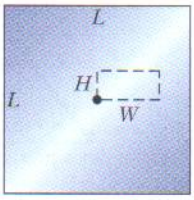

FIG. 32-29 Problema 6.

••7 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 freqüência 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.

••8 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?

••9 *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 $\Phi_E = (3{,}00\ \text{mV} \cdot \text{m/s})t$, onde t está em segundos. Determine o módulo do campo magnético induzido a uma distância radial (a) de 2,00 cm; (b) de 5,00 cm.

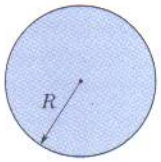

FIG. 32-30 Problemas 9 a 12 e 25 a 28.

••10 *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 $\Phi_{E,\text{env}} = (0{,}600\ \text{V} \cdot \text{m/s})(r/R)t$, onde $r \leq R$ e t está em segundos. Determine o módulo do campo magnético induzido a uma distância radial (a) de 2,00 cm; (b) de 5,00 cm.

••11 *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 $E = (4{,}50 \times 10^{-3}\ \text{V/m} \cdot \text{s})t$, onde t está em segundos. Determine o módulo do campo magnético induzido a uma distância radial (a) de 2,00 cm; (b) de 5,00 cm.

••12 *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 $E = (0{,}500\ \text{V/m} \cdot \text{s})(1 - R/r)t$, onde 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; (b) de 5,00 cm.

seção 32-4 Corrente de Deslocamento

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

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

•15 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?

•16 Para a situação do Exemplo 32-1, mostre que o módulo da densidade de corrente da corrente de deslocamento é $J_d = \varepsilon_0(dE/dt)$ para $r \leq R$.

••17 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 um 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.

••18 O módulo do campo elétrico entre as duas placas paralelas circulares da Fig. 32-31 é $E = (4{,}0 \times 10^5) - (6{,}0 \times 10^4 t)$, com E em volts por metro e t em segundos. Em $t = 0$, $\vec{E}$ aponta para cima. A área das placas é $4{,}0 \times 10^{-2}$ 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) o sentido do campo magnético induzido (horário ou anti-horário) do ponto de vista da figura.

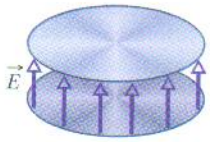

FIG. 32-31 Problema 18.

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

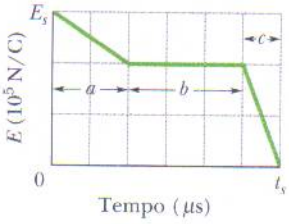

FIG. 32-32 Problema 19.

••20 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 um 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?

••21 Na Fig. 32-33 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) Determine a corrente de deslocamento i_d na região entre as placas. (b) Determine o valor de dE/dt nessa região. (c) Determine a corrente de deslocamento envolvida pela trajetória tracejada, um quadrado com $d = 0{,}50$ m de lado. (d) Determine o valor de $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ ao longo da trajetória tracejada.

Snow666

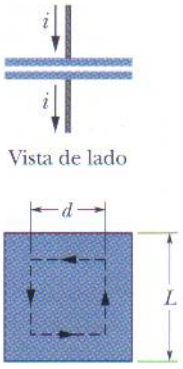

FIG. 32-33 Problema 21.

••22 O circuito da Fig. 32-34 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 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?

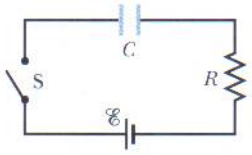

FIG. 32-34 Problema 22.

••23 Um fio de prata tem uma resistividade $\rho = 1{,}62 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot m$ e uma seção reta de 5,00 mm². 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.

••24 A Fig. 32-35*a* mostra a corrente i que atravessa um fio de resistividade $1{,}62 \times 10^{-8}\ \Omega \cdot m$. O módulo da corrente em função do tempo t está plotado 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 real no fio (a) em $t = 20$ ms, (b) em $t = 40$ ms, (c) em $t = 60$ ms. Suponha agora que o campo elétrico responsável pela corrente existe apenas no interior do fio e 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 $\vec{B}_i$; (h) de $\vec{B}_{id}$.

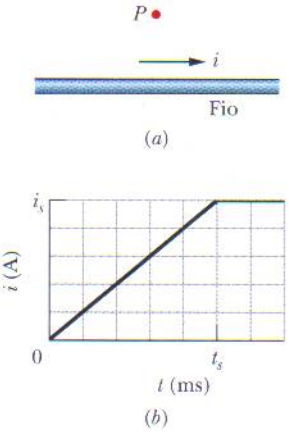

FIG. 32-35 Problema 24.

••25 *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/m². Determine o módulo do campo magnético produzido pela corrente de deslocamento (a) a 2,00 cm do centro da região; (b) a 5,00 cm do centro da região.

••26 *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; (b) a 5,00 cm do centro da região.

••27 *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 $J_d = (4{,}00\ \text{A/m}^2)(1 - r/R)$, onde $r \leq R$ é a distância do centro da região. Determine o módulo do campo magnético produzido pela corrente de deslocamento (a) em $r = 2{,}00$ cm; (b) em $r = 5{,}00$ cm.

••28 *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 $i_d = (3{,}00\ \text{A})(r/R)$, onde $r \leq R$ é a distância do centro da região. Determine o módulo do campo magnético produzido por i_d (a) em $r = 2{,}00$ cm; (b) em $r = 5{,}00$ cm.

•••29 Na Fig. 32-36 um capacitor de placas circulares de raio $R = 18{,}0$ cm está ligado a uma fonte de força eletromotriz $\mathscr{E} = \mathscr{E}_m \operatorname{sen} \omega t$, onde $\mathscr{E}_m = 220$ V e $\omega = 130$ rad/s. O valor máximo da corrente de deslocamento é $i_d = 7{,}60\ \mu$A. Despreze o efeito de borda. (a) Qual é o valor máximo da corrente i no circuito? (b) Qual é o valor máximo de $d\Phi_E/dt$, onde 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.

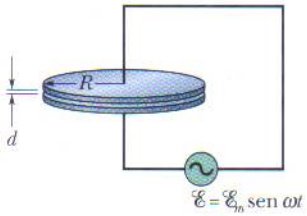

FIG. 32-36 Problema 29.

seção 32-6 Ímãs Permanentes

•30 Suponha que o valor médio da componente vertical do campo magnético da Terra é 43 μT (para baixo) em todo o estado americano do Arizona, que tem uma área de $2{,}95 \times 10^5$ km². 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).

Snow666

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

seção 32-7 Magnetismo e Elétrons

•32 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 e orientado no sentido positivo do eixo z.

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

•34 Um elétron é submetido a um campo magnético $\vec{B}$ orientado 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 $\vec{B}$.

•35 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 é submetido a um campo magnético externo $\vec{B}$ de módulo 35 mT e orientado no sentido positivo do eixo z, determine (c) a energia potencial U_{orb} associada a $\vec{\mu}_{orb}$; (d) a energia potencial U_{spin} associada a $\vec{\mu}_s$. Se, em vez disso, o átomo possui um momento angular orbital com $m_\ell = -3$, determine (e) $L_{orb,z}$; (f) $\mu_{orb,z}$; (g) U_{orb}; (h) U_{spin}.

•36 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; (b) ao nível de energia E_2. (c) Qual é o valor em joules do espaçamento entre os níveis desdobrados?

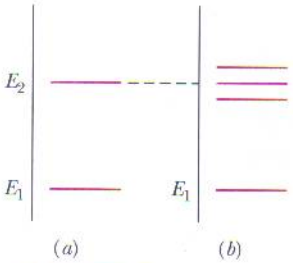

FIG. 32-37 Problema 36.

seção 32-9 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 material 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); (d) a orientação da força magnética exercida pelo campo magnético do ímã sobre o anel.

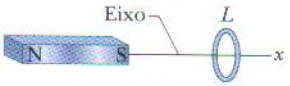

FIG. 32-38 Problemas 37 e 73.

•••38 Suponha que um elétron de massa m e carga $-e$ se move em uma órbita circular de raio r em torno de um núcleo. Um campo magnético uniforme $\vec{B}$ é aplicado perpendicularmente ao plano da órbita. Supondo também 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.

seção 32-10 Paramagnetismo

•39 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?

•40 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. Em 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?

•41 Em um teste para verificar se a magnetização do sal paramagnético usado para obter 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?

•42 Uma amostra do sal paramagnético usado para obter a curva da Fig. 32-14 é mantido à temperatura ambiente (300 K). Determine para que valor do campo magnético aplicado o grau de saturação magnética é (a) 50% e (b) 90%. (c) É possível produzir esses campos em laboratório?

••43 Um elétron com uma 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 seu módulo é dado por $\mu = K_e/B$. Determine (b) o módulo e (c) a direção 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 que a energia cinética média dos íons é $7{,}6 \times 10^{-21}$ J, calcule a magnetização do gás quando 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. Seja 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?

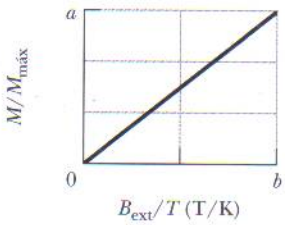

FIG. 32-39 Problema 44.

Snow666

•••45 Considere um sólido com N átomos por unidade de volume, cada átomo com um momento dipolar magnético $\vec{\mu}$. Suponha que existem 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 se encontre em um estado de energia U é proporcional a $e^{-U/kT}$, onde 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 desse sólido é $M = N\mu \tanh(\mu B/kT)$, onde 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.

seção 32-11 Ferromagnetismo

•46 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 todos os átomos da barra, que tem 5,0 cm de comprimento e uma seção reta de 1,0 cm^2, têm os momentos dipolares 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 7,9 g/cm^3.)

•47 O acoplamento de câmbio mencionado na Seção 32-11 como sendo responsável pelo ferromagnetismo *não* é a interação entre dipolos magnéticos elementares. Para mostrar por quê, 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); (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 os resultados do Exemplo 32-3, o que podemos concluir?

•48 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 de 10°C, em que profundidade o ferro deixa de ser ferromagnético? (A temperatura de Curie do ferro varia muito pouco com a pressão.)

•49 A magnetização de saturação $M_{máx}$ 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.)

••50 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 freqüência de oscilação é 0,312 Hz. O campo magnético da Terra no local possui uma componente horizontal de 18,0 μT. 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.

••51 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 toróide 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?

••52 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 potencial magnética da barra quando o ângulo muda para 34,0°.

••53 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. 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.)

Problemas Adicionais

54 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?

55 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

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

onde λ_m é a *latitude magnética* (latitude medida a partir do equador geomagnético em direção a um dos pólos 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 através da equação $\tan \phi_i = 2 \tan \lambda_m$.

56 Use os resultados do Problema 55 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) o módulo e (f) a inclinação do campo no pólo norte geomagnético.

57 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