

TÓPICO	EQUAÇÕES RELEVANTES E OBSERVAÇÕES
Tensão Hall	$V_H = E_H w = v_d B w = \frac{ I }{nte} B$ 26-17, 26-20
*Efeitos Hall Quânticos	Medidas a temperaturas muito baixas em campos magnéticos muito intensos indicam que a resistência Hall $R_H = V_H/I$ é quantizada e pode assumir apenas valores dados por $R_H = \frac{V_H}{I} = \frac{R_K}{n} \quad n = 1, 2, 3, \dots$ 26-21
*Constante de von Klitzing convencional (definição de ohm)	$R_{K-90} = 25812,8076 \Omega$ (exato) 26-23

### Respostas das Checagens Conceituais

- 26-1 A regra da mão esquerda é uma maneira de responder à questão. A definição da direção de  $\vec{B}$  é uma convenção. Se a definição para a direção de  $\vec{B}$  fosse mudada como descrito no enunciado da questão, uma lei de força correta poderia ser escrita como  $\vec{F} = q\vec{v} \otimes \vec{B}$ , onde o símbolo  $\otimes$  significa a mesma operação que o símbolo  $\times$ , exceto que o produto representado por  $\otimes$  exige o uso da regra da mão esquerda no lugar da regra da mão direita. Alternativamente, a lei de força poderia ser escrita como  $\vec{F} = \vec{B} \times q\vec{v}$  e, então, você poderia continuar com a regra da mão direita.
- 26-2 (b) Negativamente carregada. A força  $\vec{F}$  e o vetor  $\vec{v} \times \vec{B}$  estão em sentidos opostos apenas se a partícula é negativamente carregada. Isto é consistente com a relação  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ .

### Respostas dos Problemas Práticos

- 26-1  $-1,3 \times 10^{-12} \text{ N } \hat{j}$
- 26-2 (a) 667 km/s, (b) na direção  $-z$
- 26-3 (a)  $-2,88 \text{ J}$ . Observe que esta energia potencial é menor que a energia potencial calculada no exemplo. (A energia potencial é mínima quando  $\vec{\mu}$  e  $\vec{B}$  estão na mesma direção e sentido.) (b)  $+2,88 \text{ J}$ .
- 26-4  $4,0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$

## Problemas

Em alguns problemas, você recebe mais dados do que necessita; em alguns outros, você deve acrescentar dados de seus conhecimentos gerais, fontes externas ou estimativas bem fundamentadas.

Interprete como significativos todos os algarismos de valores numéricos que possuem zeros em seqüência sem vírgulas decimais.

- Um só conceito, um só passo, relativamente simples
  - Nível intermediário, pode requerer síntese de conceitos
  - Desafiante, para estudantes avançados
- Problemas consecutivos sombreados são problemas pareados.

### PROBLEMAS CONCEITUAIS

- 1 • Quando o eixo de um tubo de raios catódicos é horizontal em uma região na qual há um campo magnético dirigido verticalmente para cima, os elétrons emitidos do catodo seguem uma das trajetórias tracejadas até a face do tubo na Figura 26-30. A trajetória correta é (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5.

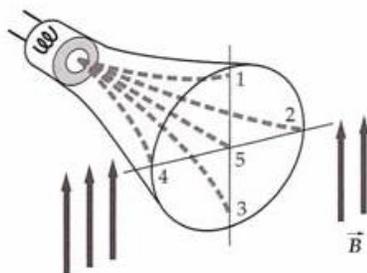


FIGURA 26-30  
Problema 1

- 2 •• Definimos a direção e o sentido do campo elétrico como os mesmos da força em uma carga teste positiva. Por que, então, não definimos a direção e o sentido do campo magnético como os mesmos da força magnética em uma carga teste positiva em movimento?
- 3 • Uma lâmpada oscilante é uma lâmpada que tem um filamento longo, fino e flexível. Ela é projetada para ser ligada em uma tomada que fornece corrente a uma frequência de 60 Hz. Há um pequeno ímã permanente dentro da lâmpada. Quando a lâmpada é acesa, o filamento oscila para frente e para trás. Em que frequência ele oscila? Explique sua resposta.
- 4 • Em um ciclotron, a diferença de potencial entre os ds oscila com um período dado por  $T = 2\pi m/(qB)$ . Mostre que a expressão à direita do sinal de igualdade tem unidades de segundos se  $q$ ,  $B$  e  $m$  tiverem unidades de coulombs, teslas e quilogramas, respectivamente.
- 5 • Um núcleo de  ${}^7\text{Li}$  tem carga igual a  $+3e$  e massa igual à massa de sete prótons. Um núcleo de  ${}^7\text{Li}$  e um próton estão, ambos, em movimento perpendicular a um campo magnético uniforme  $\vec{B}$ . A magnitude da quantidade de movimento do próton é igual à magnitude da quantidade de movimento do núcleo. A trajetória do próton

tem um raio de curvatura igual a  $R_p$  e a trajetória do núcleo de  ${}^7\text{Li}$  tem um raio de curvatura igual a  $R_L$ . A razão  $R_p/R_L$  é mais próxima de (a) 3/1, (b) 1/3, (c) 1/7, (d) 7/1, (e) 3/7, (f) 7/3.

6 • Um elétron se movendo na direção  $+x$  entra em uma região que tem um campo magnético uniforme na direção  $+y$ . Quando o elétron entra nesta região, ele (a) será defletido na direção de  $+y$ , (b) será defletido na direção de  $-y$ , (c) será defletido na direção de  $+z$ , (d) será defletido na direção de  $-z$ , (e) continuará sem ser defletido, na direção  $+x$ .

7 • Em um seletor de velocidades, a rapidez da partícula carregada não defletida é dada pela razão entre a magnitude do campo elétrico e a magnitude do campo magnético. Mostre que  $E/B$ , de fato, tem unidade de  $\text{m/s}$  se  $E$  e  $B$  tiverem unidades de volts por metro e teslas, respectivamente.

8 • Quais são as semelhanças entre as linhas de campo magnético e as linhas de campo elétrico? Quais são as diferenças?

9 • Verdadeiro ou falso:

- (a) O momento magnético de um ímã em barra aponta de seu pólo norte para o seu pólo sul.
- (b) Dentro do material de um ímã em barra, o campo magnético devido ao ímã aponta do pólo sul do ímã para seu pólo norte.
- (c) Se um anel de corrente tem sua corrente duplicada ao mesmo tempo em que sua área é cortada à metade, então a magnitude de seu momento magnético permanece constante.
- (d) O torque máximo em um anel de corrente colocado em um campo magnético ocorre quando o plano do anel é perpendicular à direção do campo magnético.

10 •• Mostre que a constante de von Klitzing,  $h/e^2$ , fornece a unidade de resistência no SI (o ohm) se  $h$  e  $e$  estão em unidades de joule-segundo e coulombs, respectivamente.

11 ••• A teoria da relatividade diz que nenhuma lei da física pode ser descrita usando a velocidade absoluta de um objeto, a qual é, de fato, impossível de ser definida devido à inexistência de um sistema de referência absoluto. Em vez disso, o comportamento de objetos que interagem entre si pode apenas ser descrito pelas velocidades relativas entre os objetos. Novos discernimentos físicos resultam desta idéia. Por exemplo, na Figura 26-31 um ímã se movendo com alta rapidez relativamente a um observador, passa por um elétron que está em repouso relativo ao mesmo observador. Explique por que você tem certeza de que uma força deverá ser exercida sobre o elétron. Em que direção e sentido esta força estará apontando no instante em que o pólo norte do ímã passa diretamente embaixo do elétron? Explique sua resposta.

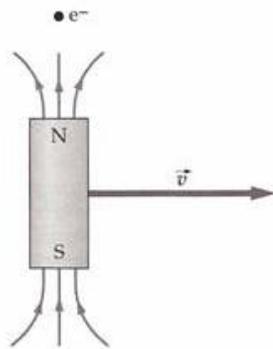


FIGURA 26-31 Problema 11

### ESTIMATIVA E APROXIMAÇÃO

12 • Estime o valor da força magnética máxima por metro que o campo magnético da Terra poderia exercer em um fio conduzindo corrente em um circuito de 20 A em sua casa.

13 •• **RICO EM CONTEXTO** Seu amigo deseja ser um mágico e pretende usar o campo magnético da Terra para suspender um fio conduzindo corrente acima do palco. Ele lhe pede para estimar o valor mínimo da corrente necessária para suspender o fio acima da superfície da Terra no equador (onde o campo magnético da Terra é horizontal). Considere que o fio tenha uma densidade linear de massa de 10 g/m. Você o aconselharia a continuar com seus planos para este ato?

### A FORÇA EXERCIDA POR UM CAMPO MAGNÉTICO

14 • Determine a força magnética em um próton se movendo na direção  $+x$  a uma rapidez de 0,446 Mm/s em um campo magnético uniforme de 1,75 T na direção  $+z$ .

15 • Uma partícula puntiforme tem carga igual a  $-3,64 \text{ nC}$  e uma velocidade igual a  $2,75 \times 10^3 \text{ m/s } \hat{i}$ . Determine a força na carga se o campo magnético é (a)  $0,38 \text{ T } \hat{j}$ , (b)  $0,75 \text{ T } \hat{i} + 0,75 \text{ T } \hat{j}$ , (c)  $0,65 \text{ T } \hat{i}$  e (d)  $0,75 \text{ T } \hat{i} + 0,75 \text{ T } \hat{k}$ .

16 • Um campo magnético uniforme igual a  $1,48 \text{ T } \hat{k}$  está na direção  $+z$ . Determine a força exercida pelo campo em um próton se a velocidade do próton é (a)  $2,7 \text{ km/s } \hat{i}$ , (b)  $3,7 \text{ km/s } \hat{j}$ , (c)  $6,8 \text{ km/s } \hat{k}$  e (d)  $4,0 \text{ km/s } \hat{i} + 3,0 \text{ km/s } \hat{j}$ .

17 • Um segmento linear de fio tem 2,0 m de comprimento e faz um ângulo de  $30^\circ$  com um campo magnético uniforme de 0,37 T. Determine a magnitude da força no fio se ele tiver uma corrente de 2,6 A.

18 • Um segmento de fio conduzindo corrente tem um elemento de corrente  $I \vec{L}$ , onde  $I = 2,7 \text{ A}$  e  $\vec{L} = 3,0 \text{ cm } \hat{i} + 4,0 \text{ cm } \hat{j}$ . O segmento está em uma região com um campo magnético uniforme dado por  $1,3 \text{ T } \hat{i}$ . Determine a força no segmento de fio.

19 • Qual é a força em um elétron que tem velocidade igual a  $2,0 \times 10^6 \text{ m/s } \hat{i} - 3,0 \times 10^6 \text{ m/s } \hat{j}$  quando está em uma região com um campo magnético dado por  $0,80 \text{ T } \hat{i} + 0,60 \text{ T } \hat{j} - 0,40 \text{ T } \hat{k}$ ?

20 •• A seção do fio mostrada na Figura 26-32 conduz uma corrente igual a 1,8 A de  $a$  até  $b$ . O segmento está em uma região que tem um campo magnético cujo valor é  $1,2 \text{ T } \hat{k}$ . Determine a força total no fio e mostre que a força total é a mesma caso o fio tivesse a forma de um segmento linear diretamente de  $a$  até  $b$  e conduzindo a mesma corrente.

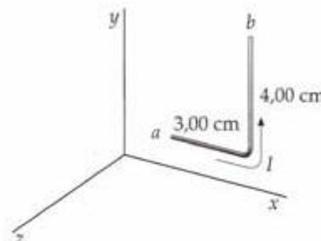


FIGURA 26-32 Problema 20

21 •• Um fio linear, firme e horizontal de 25 cm de comprimento, tem massa igual a 50 g e está conectado a uma fonte de fem através de fios leves e flexíveis. Um campo magnético de 1,33 T é horizontal e perpendicular ao fio. Determine a corrente necessária para fazer o fio "flutuar", isto é, quando o fio é liberado a partir do repouso, ele permanece em repouso.

22 •• **APLICAÇÃO EM ENGENHARIA** Em sua aula de laboratório de física, você construiu um *gaussímetro* simples para medir a componente horizontal de campos magnéticos. A montagem consiste em um fio firme de 50 cm que está suspenso verticalmente em um pivô condutor e sua extremidade livre faz contato com um recipiente contendo mercúrio (Fi-



FIGURA 26-33 Problema 22

gura 26-33). O mercúrio fornece um contato elétrico sem restringir o movimento do fio. O fio tem massa de 5,0 g e conduz corrente para baixo. (a) Qual é o deslocamento angular de equilíbrio do fio a partir da vertical se a componente horizontal do campo magnético é 0,040 T e se a corrente é 0,20 A? (b) Qual é a sensibilidade deste gaussímetro? Isto é, qual é a razão da saída para a entrada (em radianos por tesla)?

23 •• Um fio linear de 10 cm de comprimento é paralelo ao eixo  $x$  e conduz uma corrente de 2,0 A na direção  $+x$ . A força neste fio devida à presença de um campo magnético  $\vec{B}$  é  $3,0 \text{ N } \hat{j} + 2,0 \text{ N } \hat{k}$ . Se este fio é girado até ficar paralelo ao eixo  $y$  com a corrente na direção  $+y$ , a força no fio torna-se  $-3,0 \text{ N } \hat{j} - 2,0 \text{ N } \hat{k}$ . Determine o campo magnético  $\vec{B}$ .

24 •• Um fio linear de 10 cm de comprimento é paralelo ao eixo  $z$  e conduz uma corrente de 4,0 A na direção  $+z$ . A força neste fio devida à presença de um campo magnético  $\vec{B}$  é  $-0,20 \text{ N } \hat{i} + 0,20 \text{ N } \hat{j}$ . Se este fio é girado até ficar paralelo ao eixo  $x$  com a corrente na direção  $+x$ , a força no fio torna-se  $0,20 \text{ N } \hat{k}$ . Determine  $\vec{B}$ .

25 •• Um fio conduzindo corrente é curvado em um semicírculo fechado de raio  $R$  que está no plano  $xy$  (Figura 26-34). O fio está em um campo magnético uniforme que está na direção  $+z$ , como mostrado. Verifique que a força exercida no anel é zero.

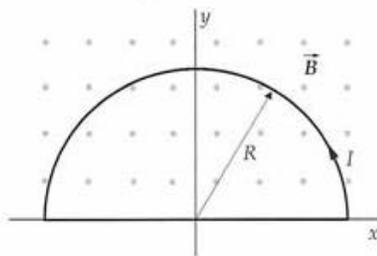


FIGURA 26-34  
Problema 25

26 ••• Um fio curvado em um formato arbitrário conduz uma corrente  $I$ . O fio está em uma região com um campo magnético uniforme  $\vec{B}$ . Mostre que a força total na parte do fio a partir de um ponto arbitrário (designado por  $a$ ) a outro ponto arbitrário (designado por  $b$ ) é  $\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}$ , onde  $\vec{L}$  é o vetor do ponto  $a$  ao ponto  $b$ . Em outras palavras, mostre que a força em uma seção arbitrária do fio curvo é a mesma que a força na seção retilínea do fio conduzindo a mesma corrente e conectando os dois pontos extremos da seção arbitrária.

## MOVIMENTO DE UMA PARTÍCULA PUNTIFORME EM UM CAMPO MAGNÉTICO

27 • Um próton move-se em uma órbita circular com 65 cm de raio, perpendicularmente a um campo magnético uniforme de intensidade 0,75 T. (a) Qual é o período da órbita deste movimento? (b) Qual é a rapidez do próton? (c) Qual é a energia cinética do próton?

28 • Um elétron de 4,5 keV (um elétron que tem energia cinética igual a 4,5 keV) move-se em uma órbita circular que é perpendicular a um campo magnético de 0,325 T. (a) Determine o raio da órbita. (b) Determine a frequência e o período do movimento orbital.

29 •• Um próton, um dêuteron e uma partícula alfa seguem trajetórias circulares de mesmo raio em uma região com um campo magnético uniforme. O dêuteron tem carga igual à do próton, e a carga da partícula alfa é igual ao dobro da carga do próton. Considere  $m_\alpha = 2m_d = 4m_p$ . Compare (a) a rapidez de cada um, (b) as energias

cinéticas e (c) as magnitudes dos momentos angulares em relação aos centros das órbitas.

30 •• Uma partícula tem carga  $q$ , massa  $m$ , momento linear de módulo igual a  $p$ , e energia cinética  $K$ . A partícula move-se em uma órbita circular de raio  $R$  perpendicular a um campo magnético uniforme  $\vec{B}$ . Mostre que (a)  $p = BqR$  e (b)  $K = \frac{1}{2}B^2q^2R^2/m$ .

31 •• Um feixe de partículas com velocidade  $\vec{v}$  entra em uma região de campo magnético uniforme  $\vec{B}$  na direção  $+x$ . Mostre que, quando a componente  $x$  do deslocamento de uma das partículas é  $2\pi(m/qB)v \cos \theta$ , onde  $\theta$  é o ângulo entre  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ , a velocidade da partícula está na mesma direção e sentido que quando ela entrou na região de campo.

32 •• Um próton com rapidez igual a  $1,00 \times 10^6$  m/s entra em uma região com um campo magnético uniforme com magnitude igual a 0,800 T, que aponta para dentro da página, como mostrado na Figura 26-35. O próton entra na região a um ângulo  $\theta = 60^\circ$ . Determine o ângulo de saída  $\phi$  e a distância  $d$ .

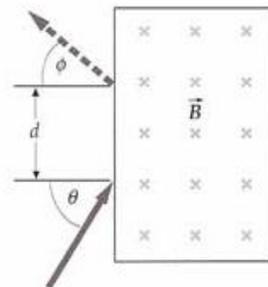


FIGURA 26-35  
Problemas 32 e 33

33 •• Considere que, na Figura 26-35, o campo magnético tenha magnitude de 60 mT, a distância  $d$  seja de 40 cm e  $\theta$  seja  $24^\circ$ . Determine a rapidez  $v$  com a qual a partícula entra na região e o ângulo  $\phi$  de saída se a partícula é (a) um próton e (b) um dêuteron. Considere que  $m_d = 2m_p$ .

34 •• O campo magnético galáctico em alguma região do espaço interestelar tem magnitude de  $1,00 \times 10^{-9}$  T. Uma partícula de poeira interestelar tem massa de  $10,0 \mu\text{g}$  e carga total de  $0,300$  nC. Quantos anos são necessários para que a partícula complete uma revolução de órbita circular provocada pela sua interação com o campo magnético?

## APLICAÇÕES DA FORÇA MAGNÉTICA EXERCIDA SOBRE PARTÍCULAS CARREGADAS

35 • Um seletor de velocidades tem um campo magnético de magnitude igual a 0,28 T, perpendicular a um campo elétrico de magnitude igual a 0,46 MV/m. (a) Qual deve ser a rapidez de uma partícula para que ela passe pelo seletor de velocidades sem sofrer deflexão? Que energia cinética devem ter (b) prótons e (c) elétrons para que passem pelo seletor sem sofrerem deflexão?

36 •• Um feixe de prótons está se movendo na direção  $+x$  com rapidez de 12,4 km/s através de uma região na qual o campo elétrico é perpendicular ao campo magnético. O feixe não sofre deflexão nesta região. (a) Se o campo magnético tem magnitude de 0,85 T e aponta na direção  $+y$ , determine a magnitude, a direção e o sentido do campo elétrico. (b) Elétrons com a mesma velocidade dos prótons seriam defletidos por estes campos? Caso a resposta seja afirmativa, em que direção e sentido eles seriam defletidos? Caso contrário, por que não?

37 •• As placas de um dispositivo de Thomson  $q/m$  têm 6,00 cm de comprimento e estão separadas por 1,20 cm. As extremidades das placas estão a 30,0 cm da tela do tubo. A energia cinética dos elétrons

é 2,80 keV. Se uma diferença de potencial de 25,0 V for aplicada entre as placas de deflexão, qual será o deslocamento do ponto onde o feixe de elétrons colide com a tela?

38 •• O cloro tem dois isótopos estáveis,  $^{35}\text{Cl}$  e  $^{37}\text{Cl}$ . O gás de cloro, constituído de íons monovalentes, deve ser separado em suas componentes isotópicas usando um espectrômetro de massa. A intensidade do campo magnético no espectrômetro é 1,2 T. Qual é o valor mínimo da diferença de potencial através da qual estes íons devem ser acelerados para que a separação entre eles, depois de completarem uma trajetória semicircular, seja de 1,4 cm?

39 •• Em um espectrômetro de massa, um íon de  $^{24}\text{Mg}$  monovalente tem massa igual a  $3,983 \times 10^{-26}$  kg e é acelerado através de uma diferença de potencial de 2,50 kV. Ele entra, então, em uma região onde é defletido por um campo magnético de 557 G. (a) Determine o raio de curvatura da órbita do íon. (b) Qual é a diferença entre os raios das órbitas dos íons  $^{24}\text{Mg}$  e  $^{26}\text{Mg}$ ? Considere que a razão entre as massas seja de 26:24.

40 •• Um feixe de íons de  $^6\text{Li}$  e  $^7\text{Li}$  monovalentes passa por um seletor de velocidades e entra em uma região de campo magnético uniforme, com velocidade perpendicular à direção do campo. Se o diâmetro da órbita dos íons  $^6\text{Li}$  é 15 cm, qual é o diâmetro da órbita dos íons  $^7\text{Li}$ ? Considere que a razão entre as massas seja de 7:6.

41 •• Usando o Exemplo 26-6, determine o tempo necessário para que um íon  $^{58}\text{Ni}$  e um íon  $^{60}\text{Ni}$  completem a trajetória semicircular.

42 •• Antes de entrarem em um espectrômetro de massa, íons passam por um seletor de velocidades que consiste em placas paralelas separadas por 2,0 mm, com uma diferença de potencial de 160 V. A intensidade do campo magnético é 0,42 T na região entre as placas. A intensidade do campo magnético no espectrômetro de massa é 1,2 T. Determine (a) a rapidez dos íons ao entrarem no espectrômetro de massa e (b) a diferença entre os diâmetros das órbitas de íons de  $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$ . A massa de um íon  $^{238}\text{U}$  é  $3,903 \times 10^{-25}$  kg.

43 •• Em um ciclotron para aceleração de prótons, a intensidade do campo magnético é 1,4 T e o raio é 0,70 m. (a) Qual é a frequência de ciclotron? (b) Determine a energia cinética dos prótons quando eles saem. (c) Como suas respostas mudariam se, no lugar de prótons, fossem usados deutérios?

44 •• Certo ciclotron, cujo campo magnético tem intensidade igual a 1,8 T, é projetado para acelerar prótons até a energia cinética de 25 MeV. (a) Qual é a frequência de ciclotron para este dispositivo? (b) Qual deve ser o raio mínimo do ímã para atingir esta energia? (c) Se a diferença de potencial alternada aplicada aos ds tem um valor máximo de 50 kV, quantas revoluções devem completar os prótons antes de saírem com energias de 25 MeV?

45 •• Mostre que, para um dado ciclotron, a frequência de ciclotron para aceleração de deutérios é a mesma que a frequência para aceleração de partículas alfa e é metade da frequência para aceleração de prótons no mesmo campo magnético. O deuteron tem carga igual a do próton e a carga da partícula alfa é igual ao dobro da carga do próton. Considere que  $m_\alpha = 2m_d = 4m_p$ .

46 ••• Mostre que o raio da órbita de uma partícula carregada em um ciclotron é proporcional à raiz quadrada do número de órbitas completadas.

### TORQUES EM ANÉIS DE CORRENTE, ÍMÃS E MOMENTOS MAGNÉTICOS

47 • Uma pequena bobina circular constituída por 20 voltas de fio está em uma região com um campo magnético uniforme cuja magnitude é 0,50 T. O arranjo é tal que a normal ao plano da bobina faz um ângulo de  $60^\circ$  com a direção do campo magnético. O raio da bobina é 4,0 cm e o fio conduz uma corrente de 3,0

A. (a) Qual é a magnitude do momento magnético da bobina? (b) Qual é a magnitude do torque exercido na bobina?

48 • Qual o valor do torque máximo em uma bobina circular de raio 0,75 cm, com 400 voltas, que conduz uma corrente de 1,6 mA e está em uma região com um campo magnético uniforme de 0,25 T?

49 • Um fio conduzindo corrente tem o formato de um quadrado de 6,0 cm de lado. O quadrado está no plano  $z = 0$ . O fio conduz uma corrente de 2,5 A. Qual é a magnitude do torque no fio se ele está em uma região com um campo magnético uniforme de intensidade igual a 0,30 T e aponta (a) na direção  $+z$  e (b) na direção  $+x$ ?

50 • Um fio conduzindo corrente tem o formato de um triângulo equilátero com 8,0 cm de lado. O triângulo está no plano  $z = 0$ . O fio conduz uma corrente de 2,5 A. Qual é a magnitude do torque no fio se ele está em uma região com um campo magnético uniforme de intensidade igual a 0,30 T e aponta (a) na direção  $+z$  e (b) na direção  $+x$ ?

51 •• Um fio rígido tem o formato de um quadrado de lado  $L$ . O quadrado tem massa  $m$  e o fio conduz uma corrente  $I$ . O quadrado está em uma superfície horizontal plana em uma região onde há um campo magnético de intensidade  $B$  que é paralelo a dois lados do quadrado. Qual é o valor mínimo de  $B$  para que um dos lados do quadrado decole da superfície?

52 •• Uma bobina retangular de 50 voltas, conduzindo corrente como mostra a Figura 26-36, pode girar em torno do eixo  $z$ . (a) Se os fios no plano  $z = 0$  fazem um ângulo  $\theta = 37^\circ$  com o eixo  $y$ , que ângulo faz o momento magnético da bobina com o vetor unitário  $\hat{i}$ ? (b) Escreva uma expressão para  $\hat{n}$  em termos dos vetores unitários  $\hat{i}$  e  $\hat{j}$ , onde  $\hat{n}$  é o vetor unitário na direção e sentido do momento magnético. (c) Qual é o momento magnético da bobina? (d) Determine o torque na bobina quando há um campo magnético uniforme  $\vec{B} = 1,5 \text{ T } \hat{j}$  na região ocupada pela bobina. (e) Determine a energia potencial da bobina neste campo. (A energia potencial é zero quando  $\theta = 0$ .)

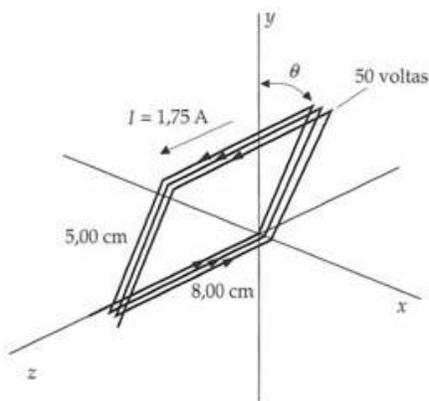


FIGURA 26-36 Problemas 52 e 53

53 •• Para a bobina no Problema 52 o campo magnético é, agora,  $\vec{B} = 2,0 \text{ T } \hat{j}$ . Determine o torque exercido na bobina quando  $\hat{n}$  é igual a (a)  $\hat{i}$ , (b)  $\hat{j}$ , (c)  $-\hat{j}$  e (d)  $(\hat{i} + \hat{j})\sqrt{2}$ .

54 •• Um pequeno ímã em barra tem comprimento de 6,8 cm e seu momento magnético está alinhado com um campo magnético uniforme de intensidade 0,040 T. O ímã em barra é, então, girado por um ângulo de  $60^\circ$  em torno de um eixo perpendicular ao seu comprimento. O torque observado no ímã tem magnitude de 0,10 N · m. (a) Determine o momento magnético do ímã. (b) Determine a energia potencial do ímã.

55 •• Um anel consiste em dois semicírculos conectados por segmentos retilíneos (Figura 26-37). Os raios interno e externo são 0,30 m e 0,50 m, respectivamente. Uma corrente de 1,5 A percorre

este fio e, no semicírculo externo, ela está no sentido horário. Qual é o momento magnético deste anel de corrente?

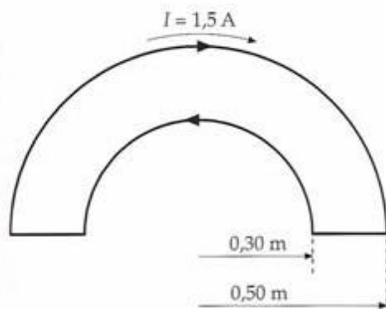


FIGURA 26-37  
Problema 55

56 •• Um fio de comprimento  $L$  está enrolado em uma bobina circular com  $N$  voltas. Mostre que, quando o fio conduz uma corrente  $I$ , o momento magnético da bobina tem magnitude dada por  $IL^2/(4\pi N)$ .

57 •• Uma partícula com carga  $q$  e massa  $m$  move-se com velocidade angular  $\omega$  em uma trajetória circular de raio  $r$ . (a) Mostre que a corrente média criada por esta partícula em movimento é  $\omega q/(2\pi)$  e que o momento magnético de sua órbita tem magnitude de  $\frac{1}{2}q\omega r^2$ . (b) Mostre que o momento angular desta partícula tem magnitude de  $mr^2\omega$  e que os vetores momento magnético e momento angular estão relacionados por  $\vec{\mu} = \frac{1}{2}(q/m)\vec{L}$ , onde  $\vec{L}$  é o momento angular em torno do centro do círculo.

58 ••• Uma casca cilíndrica não-condutora uniformemente carregada (Figura 26-38) tem comprimento  $L$ , raios interno e externo  $R_i$  e  $R_o$ , respectivamente, densidade de carga  $\rho$  e velocidade angular  $\omega$  em torno de seu eixo. Derive uma expressão para o momento magnético do cilindro.

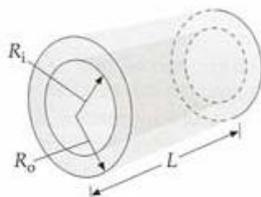


FIGURA 26-38 Problema 58

59 ••• Um bastão fino uniforme e não-condutor, com massa  $m$  e comprimento  $L$ , tem carga uniforme por unidade de comprimento  $\lambda$  e gira com rapidez angular  $\omega$  em torno de um eixo que passa por uma extremidade e que é perpendicular ao bastão. (a) Considere um pequeno segmento do bastão de comprimento  $dx$  e carga  $dq = \lambda dx$  a uma distância  $r$  do pivô (Figura 26-39). Mostre que a corrente média criada pelo movimento deste segmento é  $\omega dq/(2\pi)$  e mostre que o momento magnético deste segmento é  $\frac{1}{2}\lambda\omega r^2 dx$ . (b) Use isto para mostrar que a magnitude do momento magnético do bastão é  $\frac{1}{4}\lambda\omega L^3$ . (c) Mostre que o momento magnético  $\vec{\mu}$  e o momento angular  $\vec{L}$  estão relacionados por  $\vec{\mu} = \frac{1}{2}(Q/m)\vec{L}$ , onde  $Q$  é a carga total do bastão.

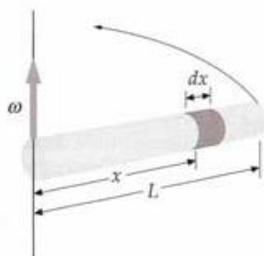


FIGURA 26-39 Problema 59

60 ••• Um disco fino não-condutor e não-uniforme tem massa  $m$ , raio  $R$  e carga total  $Q$ , com carga por unidade de área  $\sigma$  variando de acordo com  $\sigma \propto r/R$ , e massa por unidade de área  $\sigma_m$  que é dada por  $(m/Q)\sigma$ . O disco gira com rapidez angular  $\omega$  em torno de seu eixo central. (a) Mostre que o momento magnético do disco tem magnitude  $\frac{1}{2}\pi\omega\sigma_o R^3$ , que pode ser reescrito como  $\frac{1}{10}\omega QR^2$ . (b) Mostre que o momento magnético  $\vec{\mu}$  e o momento angular  $\vec{L}$  estão relacionados por  $\vec{\mu} = \frac{1}{2}(Q/m)\vec{L}$ .

61 ••• Uma casca esférica de raio  $R$  tem uma densidade superficial constante de carga  $\sigma$ . A casca gira em torno de seu diâmetro com rapidez angular  $\omega$ . Determine a magnitude do momento magnético da casca esférica girando.

62 ••• Uma esfera uniforme, sólida, uniformemente carregada, de raio  $R$ , tem uma densidade volumétrica de carga  $\rho$ . A esfera gira em torno de um eixo que passa pelo seu centro com rapidez angular  $\omega$ . Determine a magnitude do momento magnético da esfera girando.

63 ••• Um disco uniforme, fino, uniformemente carregado, de massa  $m$ , raio  $r$  e densidade superficial uniforme de carga  $\sigma$ , gira com rapidez angular  $\omega$  em torno de um eixo que passa pelo seu centro e é perpendicular ao disco (Figura 26-40). O disco está em uma região com um campo magnético uniforme  $\vec{B}$  que faz um ângulo  $\theta$  com o eixo de rotação. Calcule (a) a magnitude do torque exercido no disco pelo campo magnético e (b) a frequência de precessão do disco no campo magnético.

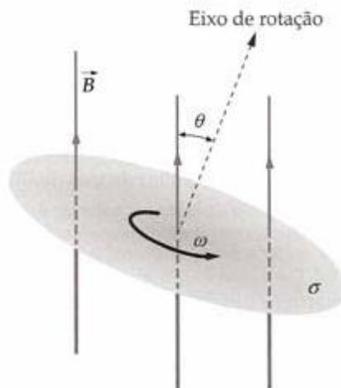


FIGURA 26-40  
Problema 63

### O EFEITO HALL

64 • Uma tira metálica de 2,00 cm de largura e 0,100 cm de espessura, conduz uma corrente de 20,0 A em uma região com um campo magnético uniforme de 2,00 T, como mostrado na Figura 26-41. A tensão Hall medida é de 4,27  $\mu$ V. (a) Calcule a rapidez de arrastamento dos elétrons livres na tira. (b) Determine a densidade de número de elétrons livres na tira. (c) Qual dos pontos, a ou b, está em um potencial mais elevado? Explique sua resposta.

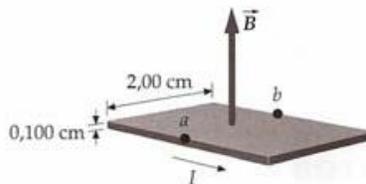


FIGURA 26-41  
Problemas 64 e 65

65 •• A densidade de número de elétrons livres no cobre é  $8,47 \times 10^{22}$  elétrons por centímetro cúbico. Se a tira metálica na Figura 26-41 for feita de cobre e a corrente for 10,0 A, determine (a) a rapidez de deriva  $v_d$  e (b) a diferença de potencial  $V_a - V_b$ . Considere que a intensidade do campo magnético seja 2,00 T.

66 •• **APLICAÇÃO EM ENGENHARIA** Uma tira de cobre com  $8,47 \times 10^{22}$  elétrons por centímetro cúbico, com largura de 2,00 cm e espessura de 0,100 cm, é usada para medir as magnitudes de campos magnéticos desconhecidos, perpendiculares a ela. Determine a magnitude  $B$  quando a corrente é 20,0 A e a tensão Hall é (a) 2,00  $\mu\text{V}$ , (b) 5,25  $\mu\text{V}$  e (c) 8,00  $\mu\text{V}$ .

67 •• **APLICAÇÃO BIOLÓGICA** Como o sangue contém íons, o sangue em movimento desenvolve uma tensão Hall ao longo do diâmetro de uma artéria. Uma artéria grande com diâmetro de 0,85 cm pode conter sangue fluindo através dela com uma rapidez máxima de 0,60 m/s. Se uma seção da artéria estiver em um campo magnético de 0,20 T, qual será a diferença de potencial máxima ao longo do diâmetro da artéria?

68 •• O coeficiente Hall  $R_H$  é uma propriedade de materiais condutores (assim como a resistividade). Ele é definido como  $R_H = E_z / (j_x B_y)$ , onde  $j_x$  é a componente  $x$  da densidade de corrente no material,  $B_y$  é a componente  $y$  do campo magnético e  $E_z$  é a componente  $z$  do campo elétrico Hall resultante. Mostre que o coeficiente Hall é igual a  $1 / (nq)$ , onde  $q$  é a carga dos portadores de carga ( $-e$  se eles forem elétrons). (Os coeficientes Hall de metais monovalentes, tais como o cobre, a prata e o sódio, são, portanto, negativos.)

69 •• O alumínio tem densidade de  $2,7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  e massa molar de 27 g/mol. O coeficiente Hall do alumínio é  $R = -0,30 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{C}$ . (Veja o Problema 68 para a definição de  $R$ .) Qual é o número de elétrons de condução por átomo de alumínio?

**PROBLEMAS GERAIS**

70 • Um fio longo paralelo ao eixo  $x$  conduz uma corrente de 6,50 A na direção  $+x$ . O fio ocupa uma região com campo magnético uniforme  $\vec{B} = 1,35 \text{ T } \hat{j}$ . Determine a força magnética por unidade de comprimento no fio.

71 • Uma partícula alfa (carga  $+2e$ ) percorre uma trajetória circular de raio 0,50 m em uma região com campo magnético cuja magnitude é 0,10 T. Determine (a) o período, (b) a rapidez e (c) a energia cinética (em elétron-volts) da partícula alfa. (A massa de uma partícula alfa é  $6,65 \times 10^{-27} \text{ kg}$ .)

72 •• A intensidade do pólo  $q_m$  de um ímã em barra é definida como  $\vec{\mu} = q_m \vec{\ell}$ , onde  $\vec{\mu}$  é o momento magnético do ímã e  $\vec{\ell}$  é a posição do pólo norte do ímã em relação ao pólo sul. Mostre que o torque exercido em um ímã em barra em um campo magnético uniforme  $\vec{B}$  é o mesmo que para o caso de uma força  $+q_m \vec{B}$  exercida sobre o pólo norte e uma força  $-q_m \vec{B}$  exercida sobre o pólo sul.

73 •• Uma partícula de massa  $m$  e carga  $q$  entra em uma região onde há um campo magnético uniforme  $\vec{B}$  paralelo ao eixo  $x$ . A velocidade inicial da partícula é  $\vec{v} = v_0 \hat{i} + v_0 \hat{j}$  e, portanto, a partícula desenvolve um movimento helicoidal. (a) Mostre que o raio da hélice é  $r = mv_0/qB$ . (b) Mostre que a partícula leva um tempo  $\Delta t = 2\pi m/qB$  para completar cada volta da hélice. (c) Qual é a componente  $x$  do deslocamento da partícula durante o tempo obtido na Parte (b)?

74 •• Uma barra metálica de massa  $m$  desliza em um par de longos trilhos horizontais condutores, paralelos, separados por uma distância  $L$  e conectados a um dispositivo que fornece uma corrente constante  $I$  ao circuito, como mostra a Figura 26-42. O circuito está em uma região com um campo magnético uniforme  $\vec{B}$  cuja direção é vertical e para baixo. Não há atrito e a barra parte do repouso em  $t = 0$ . (a) Em que sentido a barra começará a se mover? (b) Mostre que no instante  $t$  a barra terá uma rapidez de  $(BIL/m)t$ .

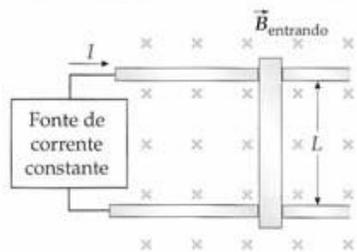


FIGURA 26-42 Problemas 74 e 75

75 •• Considere que os trilhos do Problema 74 não tenham atrito, mas estejam inclinados, fazendo um ângulo  $\theta$  com a horizontal, e que a fonte de corrente esteja conectada à extremidade mais baixa dos trilhos. O campo magnético ainda está dirigido verticalmente para baixo. (a) Qual o valor mínimo de  $B$  necessário para evitar que a barra deslize para baixo nos trilhos? (b) Qual é a aceleração da barra se  $B$  é o dobro do valor encontrado na Parte (a)?

76 •• Um longo e fino ímã em barra tem momento magnético  $\vec{\mu}$  paralelo ao seu eixo mais longo e está suspenso pelo centro como uma agulha de bússola, sem atrito. Quando colocado em uma região com um campo magnético horizontal  $\vec{B}$ , a agulha alinha-se com o campo. Se ele for deslocado por um pequeno ângulo  $\theta$ , mostre que a agulha oscilará em torno de sua posição de equilíbrio com uma frequência  $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu B}{I}}$ , onde  $I$  é o momento de inércia da agulha em torno do ponto de suspensão.

77 •• Um fio retilíneo condutor com 20 m de comprimento é paralelo ao eixo  $y$  e está se movendo na direção  $+x$  com rapidez de 20 m/s em uma região com campo magnético dado por 0,50 T  $\hat{k}$ . (a) Devido à força magnética, os elétrons se moverão para uma extremidade do fio, deixando a outra extremidade carregada positivamente, até que o campo elétrico devido a esta separação exerça uma força nos elétrons de condução que equilibra a força magnética. Determine a magnitude, a direção e o sentido deste campo elétrico na situação de equilíbrio. (b) Qual extremidade do fio estará carregada positivamente e qual estará carregada negativamente? (c) Considere que o fio em movimento tenha 2,0 m de comprimento. Qual é a diferença de potencial entre as extremidades devida a este campo elétrico?

78 ••• Um anel circular de fio com massa  $m$  e corrente constante  $I$  está em uma região com um campo magnético uniforme. Ele está inicialmente em equilíbrio e seu momento magnético está alinhado com o campo magnético. O anel sofre um pequeno deslocamento angular em torno do eixo que passa pelo seu centro e é perpendicular ao campo magnético, e é, então, liberado. Qual é o período do movimento subsequente? (Considere que o único torque exercido no anel é o devido ao campo magnético e que não há outras forças exercidas sobre ele.)

79 ••• Um pequeno ímã em barra tem momento magnético  $\vec{\mu}$  que faz um ângulo  $\theta$  com o eixo  $x$ . O ímã está em uma região com um campo magnético não-uniforme dado por  $\vec{B} = B_x(x)\hat{i} + B_y(y)\hat{j}$ . Usando  $F_x = -\partial U/\partial x$ ,  $F_y = -\partial U/\partial y$  e  $F_z = -\partial U/\partial z$ , mostre que há uma força magnética resultante no ímã dada por

$$\vec{F} = \mu_x \frac{\partial B_x}{\partial x} \hat{i} + \mu_y \frac{\partial B_y}{\partial y} \hat{j}$$

80 •• Um próton, um deuteron e uma partícula alfa têm a mesma energia cinética. Eles estão se movendo em uma região com um campo magnético uniforme que é perpendicular às suas velocidades. Sejam  $R_p$ ,  $R_d$  e  $R_\alpha$  os raios das órbitas circulares, respectivamente. O deuteron tem carga igual a do próton e a carga da partícula alfa é o dobro da carga do próton. Determine as razões  $R_d/R_p$  e  $R_\alpha/R_p$ . Considere que  $m_\alpha = 2m_d = 4m_p$ .

81 ••• **APLICAÇÃO EM ENGENHARIA, RICO EM CONTEXTO** Seu grupo de química forense, trabalhando juntamente com agências judiciárias locais, adquiriu um espectrômetro de massa semelhante ao discutido no texto. Ele emprega um campo magnético uniforme com magnitude de 0,75 T. Para calibrar o espectrômetro, você decide medir as massas de vários isótopos de carbono através da medida da posição de impacto dos vários íons de carbono monovalentes que entram no espectrômetro com uma energia cinética de 25 keV. Uma câmara sensível à posição de 0,50 mm faz parte do equipamento. Qual será o limite de resolução em massa (em kg) para íons neste intervalo de massas, isto é, aqueles cujas massas são da ordem da massa do átomo de carbono?