



Tom Walker/Getty Images, Inc.

Um espetáculo muito bonito, que às vezes pode ser observado nas noites sem lua em médias e altas latitudes, é a aurora, uma fantasmagórica "cortina" de luz que surge no céu. A aurora não é um fenômeno localizado; pode ter 200 km de altura e 4000 km de comprimento, estendendo-se como um arco em volta da Terra. Entretanto, tem apenas cerca de 100 m de espessura.

O que produz a aurora e por que ela é tão fina?

A resposta está neste capítulo.



FIG. 28-1 O eletroímã da foto é usado para transportar sucata em uma fundição. (Digital Vision/Getty Images)

28-1 O QUE É FÍSICA?

Como vimos em capítulos anteriores, um objetivo importante da física é estudar o modo como um *campo elétrico* produz uma *força elétrica* em um corpo eletricamente carregado. Um objetivo análogo é estudar o modo como um *campo magnético* produz uma *força magnética* em um corpo eletricamente carregado (em movimento) ou em um corpo com propriedades magnéticas especiais, como um ímã permanente, por exemplo. O leitor provavelmente já prendeu um bilhete na porta da geladeira usando um pequeno ímã; o ímã interage com a porta da geladeira através de um campo magnético.

As aplicações dos campos magnéticos e das forças magnéticas são incontáveis, e mudam a cada ano. Vamos citar apenas alguns exemplos. Durante várias décadas a indústria do entretenimento usou fitas magnéticas para gravar sons e imagens. Embora hoje em dia as fitas de áudio e vídeo tenham caído em desuso, a indústria ainda precisa dos ímãs que controlam os CD players e os DVD players; os alto-falantes dos aparelhos de rádio e televisão, dos computadores e dos telefones celulares também utilizam ímãs. Um carro moderno vem equipado com dezenas de ímãs, que são usados no sistema de ignição, no motor de arranque e também para acionar componentes como vidros elétricos, limpadores de pára-brisas e tetos solares. Muitas campainhas de porta e trancas automáticas também trabalham com ímãs. Na verdade, vivemos cercados por ímãs.

O estudo dos campos magnéticos é tarefa da física; as aplicações dos campos magnéticos ficam por conta da engenharia. Tanto a física como a engenharia começam com a mesma pergunta: “O que produz um campo magnético?”

28-2 | O que Produz um Campo Magnético?

Já que o campo elétrico $\vec{E}$ é produzido por cargas elétricas, seria natural que o campo magnético $\vec{B}$ fosse produzido por cargas magnéticas. Entretanto, embora a existência de cargas magnéticas (conhecidas como *monopolos magnéticos*) seja prevista em algumas teorias, essas cargas até hoje não foram observadas experimentalmente. Como são produzidos, então, os campos magnéticos? Os campos magnéticos podem ser produzidos de duas formas.

A primeira forma é usar partículas eletricamente carregadas em movimento, como uma corrente elétrica em um fio, para fabricar um **eletroímã**. A corrente produz um campo magnético que pode ser usado, por exemplo, para controlar o disco rígido de um computador ou para transportar sucata de um lugar para outro (Fig. 28-1). O campo magnético produzido por correntes elétricas será discutido no Capítulo 29.

A outra forma de produzir campos magnéticos é usar partículas elementares, como os elétrons, que possuem um campo magnético *intrínseco*. O campo magnético é uma propriedade básica de muitas partículas elementares, do mesmo modo como a massa e a carga elétrica (quando existe) são propriedades básicas. Como será discutido no Capítulo 32, em certos materiais os campos magnéticos dos elétrons se combinam para produzir um campo magnético nas vizinhanças do material. Esta combinação é o motivo pelo qual um **ímã permanente**, o tipo usado para pendurar bilhetes na porta das geladeiras, possui um campo magnético permanente. Em outros materiais os campos magnéticos dos elétrons se cancelam e o campo magnético em torno do material é nulo. Esse cancelamento é a razão pela qual não possuímos um campo magnético permanente em torno do nosso corpo, o que é bom, pois não seria nada agradável ser atraído por portas de geladeira.

Nosso primeiro trabalho neste capítulo será definir o campo magnético $\vec{B}$. Para isso, vamos usar o fato experimental de que quando uma partícula com carga elétrica se move na presença de um campo magnético uma força magnética $\vec{F}_B$ age sobre a partícula.

28-3 | A Definição de $\vec{B}$

Determinamos o campo elétrico $\vec{E}$ em um ponto colocando uma partícula de prova com uma carga q nesse ponto e medindo a força elétrica $\vec{F}_E$ que age sobre a partícula. Em seguida, definimos o campo $\vec{E}$ através da relação

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_E}{q}. \quad (28-1)$$

Se dispuséssemos de um monopolo magnético, poderíamos definir $\vec{B}$ de forma análoga. Entretanto, como os monopolos magnéticos até hoje não foram encontrados devemos definir $\vec{B}$ de outro modo, ou seja, em termos da força magnética $\vec{F}_B$ exercida sobre uma partícula de prova carregada eletricamente e em movimento.

Em princípio, fazemos isso medindo a força $\vec{F}_B$ que age sobre a partícula quando ela passa pelo ponto no qual $\vec{B}$ está sendo medido com várias velocidades e direções. Depois de executar vários experimentos desse tipo constatamos que quando a velocidade $\vec{v}$ da partícula tem uma certa direção, a força $\vec{F}_B$ é zero. Para todas as outras direções de $\vec{v}$ o módulo de $\vec{F}_B$ é proporcional a $v \sin \phi$, onde ϕ é o ângulo entre a direção em que a força é zero e a direção de $\vec{v}$. Além disso, a direção de $\vec{F}_B$ é sempre perpendicular à direção de $\vec{v}$. (Esses resultados sugerem que um produto vetorial está envolvido.)

Podemos em seguida definir um **campo magnético** $\vec{B}$ como uma grandeza vetorial cuja direção coincide com aquela para a qual a força é zero. Depois de medir $\vec{F}_B$ para $\vec{v}$ perpendicular a $\vec{B}$, definimos o módulo de $\vec{B}$ em termos do módulo da força:

$$B = \frac{F_B}{|q|v},$$

onde q é a carga da partícula.

Podemos expressar esses resultados através da seguinte equação vetorial:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}; \quad (28-2)$$

ou seja, a força $\vec{F}_B$ que age sobre a partícula é igual à carga q multiplicada pelo produto vetorial da velocidade $\vec{v}$ pelo campo $\vec{B}$ (medidos no mesmo referencial). Usando a Eq. 3-27 para o produto vetorial, podemos escrever o módulo de $\vec{F}_B$ na forma

$$F_B = |q|vB \sin \phi, \quad (28-3)$$

onde ϕ é o ângulo entre as direções da velocidade $\vec{v}$ e do campo magnético $\vec{B}$.

Determinação da Força Magnética

De acordo com a Eq. 28-3, o módulo da força $\vec{F}_B$ que age sobre uma partícula na presença de um campo magnético é proporcional à carga q e à velocidade v da partícula. Assim, a força é zero se a carga é zero ou se a partícula está parada. A Eq. 28-3 também mostra que a força é zero se $\vec{v}$ e $\vec{B}$ são paralelos ($\phi = 0^\circ$) ou antiparalelos ($\phi = 180^\circ$), e é máxima quando $\vec{v}$ e $\vec{B}$ são perpendiculares.

A Eq. 28-2 também fornece a orientação de $\vec{F}_B$. Como foi visto na Seção 3-8, o produto vetorial $\vec{v} \times \vec{B}$ da Eq. 28-2 é um vetor perpendicular aos vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$. De acordo com a regra da mão direita (Fig. 28-2a), o polegar da mão direita aponta na direção de $\vec{v} \times \vec{B}$ quando os outros dedos apontam de $\vec{v}$ para $\vec{B}$. De acordo com a Eq. 28-2, se a carga q é positiva a força $\vec{F}_B$ tem o mesmo sinal que $\vec{v} \times \vec{B}$; assim, para q positiva $\vec{F}_B$ aponta no mesmo sentido que o polegar (Fig. 28-2b). Se q é negativa, a força $\vec{F}_B$ e o produto vetorial $\vec{v} \times \vec{B}$ têm sinais contrários e, portanto, apontam em sentidos opostos. Assim, para q negativa $\vec{F}_B$ aponta no sentido oposto ao do polegar (Fig. 28-2c).

Seja qual for o sinal da carga,

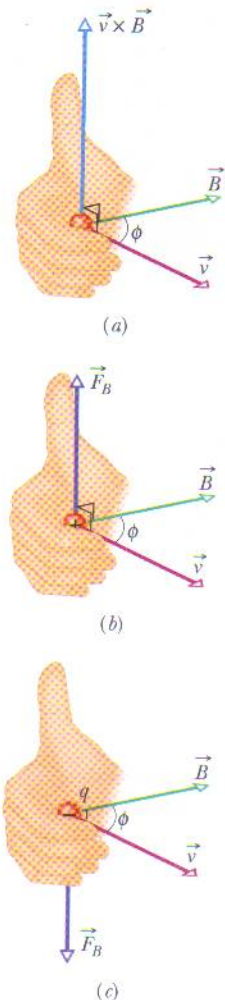


FIG. 28-2 (a) Na regra da mão direita, o polegar da mão direita aponta na direção de $\vec{v} \times \vec{B}$ quando os outros dedos apontam de $\vec{v}$ para $\vec{B}$. (b) Se a carga q é positiva, a força $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ tem o mesmo sentido que $\vec{v} \times \vec{B}$. (c) Se q é negativa, a força $\vec{F}_B$ tem o sentido oposto ao de $\vec{v} \times \vec{B}$.

A força $\vec{F}_B$ que age sobre uma partícula carregada que se move com velocidade $\vec{v}$ na presença de um campo magnético $\vec{B}$ é sempre perpendicular a $\vec{v}$ e a $\vec{B}$.

Assim, a componente de $\vec{F}_B$ na direção de $\vec{v}$ é sempre nula. Isso significa que $\vec{F}_B$ não pode mudar a velocidade escalar v da partícula (e, portanto, também não pode mudar a energia cinética da partícula). A força $\vec{F}_B$ pode mudar apenas a direção de $\vec{v}$ (ou seja, a trajetória da partícula); este é o único tipo de aceleração que $\vec{F}_B$ pode imprimir à partícula.

Para compreender melhor o significado da Eq. 28-2, considere a Fig. 28-3, que mostra alguns rastros deixados por partículas carregadas em uma câmara de bolhas. A câmara, que contém hidrogênio líquido, está submetida a um forte campo magnético dirigido para fora do plano do papel. Um raio gama, que não deixa rastro porque é eletricamente neutro, interage com um átomo de hidrogênio e se transforma em um elétron (trajetória espiral e^-) e um pósitron (trajetória espiral e^+), ao mesmo tempo em que arranca um elétron do átomo de hidrogênio (trajetória quase retilínea e^-). As curvaturas das trajetórias das três partículas estão de acordo com a Eq. 28-2 e a Fig. 28-2.

De acordo com as Eqs. 28-2 e 28-3, a unidade de $\vec{B}$ no SI é o newton por coulomb-metro por segundo. Por conveniência, essa unidade é chamada de **tesla** (T):

$$1 \text{ tesla} = 1 \text{ T} = 1 \frac{\text{newton}}{(\text{coulomb})(\text{metro/segundo})}.$$

Lembrando que um coulomb por segundo equivale a um ampère, temos:

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{newton}}{(\text{coulomb/segundo})(\text{metro})} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}. \quad (28-4)$$

Uma unidade antiga de $\vec{B}$, que não pertence ao SI mas ainda é usada na prática, é o *gauss* (G). A relação entre o gauss e o tesla é a seguinte:

$$1 \text{ tesla} = 10^4 \text{ gauss}. \quad (28-5)$$

A Tabela 28-1 mostra os campos magnéticos observados em algumas situações. Observe que o campo magnético na superfície da Terra é da ordem de 10^{-4} T ($100 \mu\text{T}$ ou 1 G).

FIG. 28-3 Rastros de dois elétrons (e^-) e um pósitron (e^+) em uma câmara de bolhas submetida a um campo magnético dirigido para fora do plano do papel. (Lawrence Berkeley Laboratory/Photo Researchers)

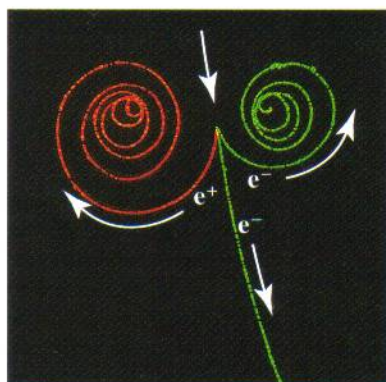


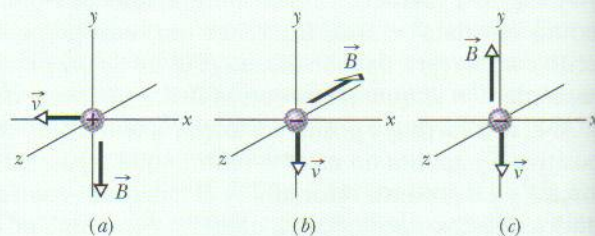
TABELA 28-1

Alguns Campos Magnéticos

Na superfície de uma estrela de nêutrons	10^8 T
Perto de um grande eletroímã	$1,5 \text{ T}$
Perto de um ímã pequeno	10^{-2} T
Na superfície da Terra	10^{-4} T
No espaço sideral	10^{-10} T
Em uma sala magneticamente blindada	10^{-14} T



TESTE 1 A figura mostra três situações nas quais uma partícula carregada de velocidade $\vec{v}$ é submetida a um campo magnético uniforme $\vec{B}$. Qual é a direção da força magnética $\vec{F}_B$ a que a partícula é submetida em cada situação?



Linhas de Campo Magnético

Como no caso do campo elétrico, podemos representar o campo magnético através de linhas de campo. As regras são as mesmas: (1) a direção da tangente a uma linha de campo magnético em qualquer ponto fornece a direção de $\vec{B}$ nesse ponto; (2) o espaçamento das linhas representa o módulo de $\vec{B}$; quanto mais intenso o campo, mais próximas estão as linhas, e vice-versa.

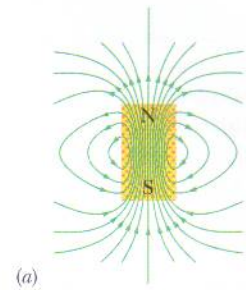
A Fig. 28-4a mostra as linhas de campo magnético nas proximidades de um *ímã em forma de barra*. Todas as linhas passam pelo interior do ímã e formam curvas fechadas (mesmo as que não parecem formar curvas fechadas na figura). O campo magnético externo é mais intenso perto das extremidades do ímã, o que se reflete em um menor espaçamento das linhas. Assim, o campo magnético do ímã em forma de barra da Fig. 28-4b recolhe muito mais limalha de ferro nas extremidades.

As linhas de campo entram no ímã por uma das extremidades e saem pela outra. A extremidade pela qual as linhas saem é chamada de *pólo norte* do ímã; a outra extremidade, pela qual as linhas entram, recebe o nome de *pólo sul*. Como um ímã tem dois pólos, dizemos que possui um **dipolo magnético**. Os ímãs que usamos para prender bilhetes nas geladeiras são ímãs em forma de barra. A Fig. 28-5 mostra outros dois tipos comuns de ímãs: o *ímã em forma de ferradura* e o *ímã em forma de C* (no segundo tipo, o campo magnético entre os pólos é aproximadamente uniforme). Seja qual for a forma dos ímãs, quando colocamos dois ímãs próximos um do outro sempre observamos o seguinte:

Pólos magnéticos de nomes diferentes se atraem e pólos do mesmo nome se repelem.

A Terra possui um campo magnético que é produzido no interior do planeta por um mecanismo até hoje pouco conhecido. Na superfície terrestre podemos observar esse campo com o auxílio de uma bússola, constituída por um ímã fino em forma de barra montado em um eixo de baixo atrito. Este ímã em forma de barra, ou agulha, aponta aproximadamente na direção norte-sul porque o pólo norte do ímã é atraído para um ponto situado nas proximidades do pólo geográfico norte. Isso significa que o pólo *sul* do campo magnético da Terra deve estar situado nas proximidades do pólo geográfico norte. Assim, o correto seria chamarmos o pólo magnético mais próximo do pólo geográfico norte de pólo magnético sul. Entretanto, por causa da proximidade com o pólo geográfico norte esse pólo costuma ser chamado de *pólo geomagnético norte*.

Medidas mais precisas revelam que no hemisfério norte as linhas do campo magnético da Terra apontam para baixo e na direção do pólo geomagnético norte, enquanto no hemisfério sul apontam para cima e para longe do *pólo geomagnético sul*, situado nas proximidades do pólo geográfico sul.

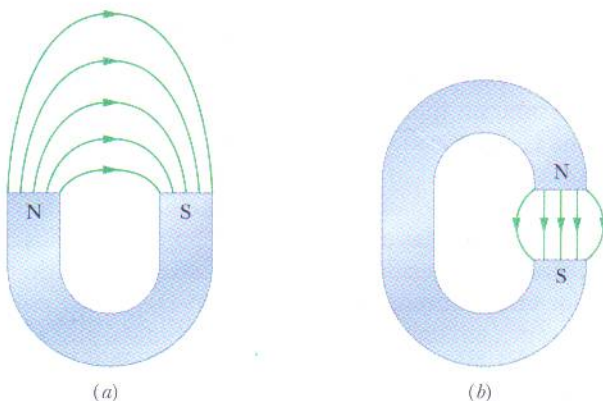


(a)



(b)

FIG. 28-4 (a) Linhas de campo magnético nas proximidades de um ímã em forma de barra. (b) Um “ímã de vaca”, ímã em forma de barra introduzido no rúmen das vacas para evitar que pedaços de ferro ingeridos acidentalmente cheguem ao intestino do animal. A limalha de ferro revela as linhas de campo magnético. (Cortesia do Dr. Richard Cannon, Southeast Missouri State University, Cape Girardeau)



(a)

(b)

FIG. 28-5 (a) Ímã em forma de ferradura e (b) ímã em forma de C. (Apenas algumas linhas de campo externas foram desenhadas.)

Exemplo 28-1

Um campo magnético uniforme $\vec{B}$, de módulo 1,2 mT, está orientado verticalmente para cima no interior de uma câmara de laboratório. Um próton com uma energia cinética de 5,3 MeV entra na câmara movendo-se horizontalmente de sul para norte. Qual é a força experimentada pelo próton ao entrar na câmara? A massa do próton é $1,67 \times 10^{-27}$ kg. (Despreze o campo magnético da Terra.)

IDÉIAS-CHAVE

Como o próton possui carga elétrica e se move na presença de um campo magnético, está sujeito a uma força magnética $\vec{F}_B$. Como a direção inicial da velocidade do próton não coincide com a direção das linhas de campo magnético, $\vec{F}_B$ é diferente de zero.

Módulo: Para determinar o módulo de $\vec{F}_B$, podemos usar a Eq. 28-3 ($F_B = |q|vB \sin \phi$), contanto que a velocidade v do próton seja conhecida. Podemos calcular v a partir da energia cinética dada, já que $K = \frac{1}{2}mv^2$. Explicitando v , obtemos:

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m}} = \sqrt{\frac{(2)(5,3 \text{ MeV})(1,60 \times 10^{-13} \text{ J/MeV})}{1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}}} = 3,2 \times 10^7 \text{ m/s}.$$

De acordo com a Eq. 28-3, temos:

$$\begin{aligned} F_B &= |q|vB \sin \phi \\ &= (1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(3,2 \times 10^7 \text{ m/s}) \\ &\quad \times (1,2 \times 10^{-3} \text{ T})(\sin 90^\circ) \\ &= 6,1 \times 10^{-15} \text{ N}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

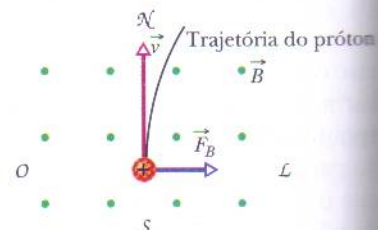
Esta pode parecer uma força pequena, mas como age sobre uma partícula de massa muito pequena produz uma grande aceleração:

$$a = \frac{F_B}{m} = \frac{6,1 \times 10^{-15} \text{ N}}{1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}} = 3,7 \times 10^{12} \text{ m/s}^2.$$

Orientação: Para determinar a orientação de $\vec{F}_B$, usamos o fato de que é dada pelo produto vetorial $q\vec{v} \times \vec{B}$. Como a carga q é positiva, $\vec{F}_B$ tem o sentido de $\vec{v} \times \vec{B}$, que pode ser determinado usando a regra da mão direita para produtos vetoriais (como na Fig. 28-2b). Sabemos que o sentido de $\vec{v}$ é do sul para o norte e que o sentido de $\vec{B}$ é de baixo para cima. De acordo com a regra da mão direita, a força $\vec{F}_B$ é de oeste para leste, como mostra a Fig. 28-6. (Os pontos da figura indicam que as linhas de campo magnético saem do plano do papel. Se o campo magnético entrasse no plano do papel, os pontos seriam substituídos por cruzes.)

Se a carga da partícula fosse negativa a força magnética teria o sentido oposto, ou seja, de leste para oeste. Este resultado pode ser obtido substituindo q por $-q$ na Eq. 28-2.

FIG. 28-6 Vista de topo de um próton que se move em uma câmara do sul para o norte com velocidade $\vec{v}$. O campo magnético aponta verticalmente para cima, como mostram os pontos (que representam pontas de setas). O próton é desviado para leste.

**28-4 | Campos Cruzados: A Descoberta do Elétron**

Tanto um campo elétrico $\vec{E}$ com um campo magnético $\vec{B}$ podem exercer uma força sobre uma partícula com carga elétrica. Quando os dois campos são mutuamente perpendiculares dizemos que se trata de *campos cruzados*. Vamos agora discutir o que acontece quando uma partícula com carga elétrica, como o elétron, por exemplo, se move em uma região na qual existem campos cruzados. Vamos basear nossa discussão no experimento que levou à descoberta do elétron, realizado por J.J. Thomson em 1897 na Universidade de Cambridge.

A Fig. 28-7 mostra uma versão moderna, simplificada, do equipamento experimental de Thomson, o *tubo de raios catódicos* (semelhante ao tubo de imagem dos aparelhos de televisão). Partículas carregadas (que hoje chamamos de elétrons) são emitidas por um filamento aquecido em uma das extremidades de um tubo evacuado e aceleradas por uma diferença de potencial V . Depois de passarem por uma fenda no anteparo A, formam um feixe estreito. Em seguida, passam por uma região onde existem campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ cruzados e atingem uma tela fluorescente T, onde produzem um ponto luminoso (nos aparelhos de televisão, o ponto é parte da imagem). As forças a que o elétron é submetido na região dos campos cruzados podem desviá-lo do centro da tela. Controlando o módulo e a orientação dos campos Thomson

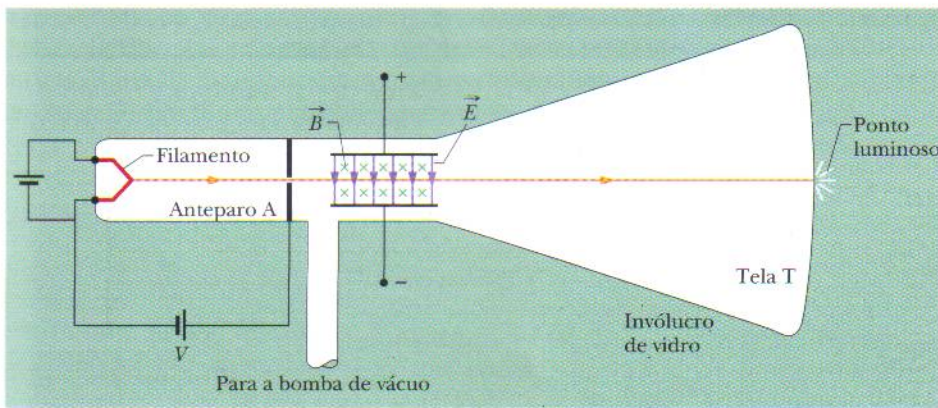


FIG. 28-7 Uma versão moderna do equipamento usado por J. J. Thomson para medir a razão entre a massa e a carga do elétron. Um campo elétrico $\vec{E}$ é estabelecido ligando uma bateria aos terminais das placas defletoras. O campo magnético $\vec{B}$ é criado fazendo passar uma corrente por um conjunto de bobinas (que não aparece na figura). O sentido do campo magnético é para dentro do papel, como mostram as cruzeiras (que representam as extremidades traseiras de setas).

era capaz de controlar a posição do ponto luminoso na tela. Como vimos, a força a que é submetida uma partícula de carga negativa na presença de um campo elétrico tem o sentido contrário ao do campo. Assim, para o arranjo da Fig. 28-7 os elétrons são desviados para cima pelo campo elétrico $\vec{E}$ e para baixo pelo campo magnético $\vec{B}$; em outras palavras, as duas forças estão *em oposição*. O procedimento adotado por Thomson equivale aos passos que se seguem.

1. Faça $E = 0$ e $B = 0$ e registre a posição na tela T do ponto luminoso causado pelo feixe sem nenhum desvio.
2. Aplique o campo $\vec{E}$ e registre a nova posição do ponto na tela.
3. Mantendo o campo $\vec{E}$, aplique o campo $\vec{B}$ e ajuste seu valor para que o ponto volte à posição inicial. (Como as forças estão em oposição, podem se cancelar.)

A deflexão de uma partícula carregada que se move na presença de um campo elétrico uniforme $\vec{E}$ criado por duas placas (2.º passo) foi discutida no Exemplo 22-4. A deflexão da partícula no momento em que deixa a região entre as placas é dada por

$$y = \frac{|q|EL^2}{2mv^2}, \quad (28-6)$$

onde v é a velocidade da partícula, m é a massa, q é a carga e L é o comprimento das placas. Podemos aplicar a mesma equação ao feixe de elétrons da Fig. 28-7, medindo a posição do ponto luminoso na tela T e refazendo a trajetória das partículas para calcular a deflexão y no final da região entre as placas. (Como o sentido da deflexão depende do sinal da carga das partículas, Thomson foi capaz de provar que as partículas responsáveis pelo ponto luminoso na tela tinham carga negativa.)

De acordo com as Eqs. 28-1 e 28-3, quando os dois campos da Fig. 28-7 são ajustados para que a força elétrica e a força magnética se cancelem mutuamente (3.º passo),

$$|q|E = |q|vB \sin(90^\circ) = |q|vB$$

$$\text{ou} \quad v = \frac{E}{B}. \quad (28-7)$$

Assim, os campos cruzados permitem medir a velocidade das partículas. Substituindo a Eq. 28-7 na Eq. 28-6 e reagrupando os termos, temos:

$$\frac{m}{|q|} = \frac{B^2 L^2}{2yE}, \quad (28-8)$$

onde todas as grandezas do lado direito são conhecidas. Assim, os campos cruzados permitem medir a razão $m/|q|$ das partículas que estão sendo investigadas.*

*O resultado obtido por Thomson foi $m/|q| \approx 1,3 \cdot 10^{-11} \text{ kg/C}$; o valor aceito atualmente é $0,57 \cdot 10^{-11} \text{ kg/C}$. (N.T.)

Thomson afirmou que essas partículas estavam presentes em todas as formas de matéria e eram mais de 1000 vezes mais leves que o átomo mais leve conhecido (o átomo de hidrogênio). (Mais tarde verificou-se que a razão exata é 1836,15.) A medição de $m/|q|$, combinada com as duas afirmações de Thomson, é considerada como “a descoberta do elétron”.

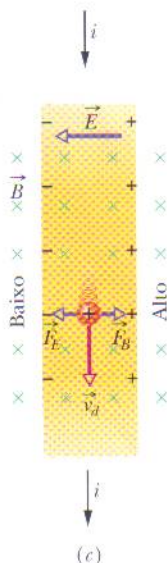
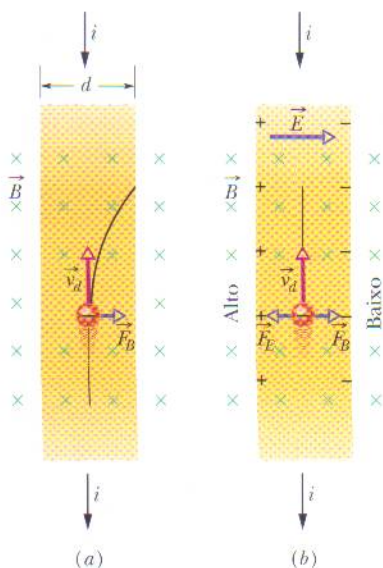
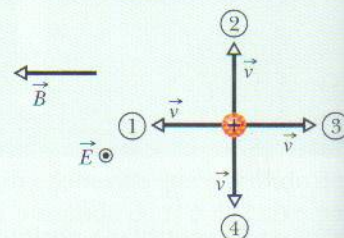


FIG. 28-8 Uma fita de cobre percorrida por uma corrente i é submetida a um campo magnético $\vec{B}$. (a) Situação logo depois que o campo magnético é aplicado, mostrando a trajetória curva de um elétron. (b) Situação após o equilíbrio ser atingido, o que acontece rapidamente. Observe que cargas negativas se acumulam do lado direito da fita, deixando cargas positivas não compensadas do lado esquerdo. Assim, o potencial é maior do lado esquerdo. (c) Para o mesmo sentido da corrente, se os portadores de carga fossem positivos tenderiam a se acumular no lado direito, que ficaria com um potencial maior.



TESTE 2 A figura mostra quatro direções do vetor velocidade $\vec{v}$ de uma partícula positivamente carregada que se move na presença de um campo elétrico uniforme $\vec{E}$ (dirigido para fora do plano do papel e representado por um ponto no interior de um círculo) e de um campo magnético uniforme $\vec{B}$. (a) Coloque as direções 1, 2 e 3 em ordem de acordo com o módulo da força total que age sobre a partícula, começando pelo maior valor. (b) Das quatro direções, qual é a única em que a força total pode ser zero?



28-5 Campos Cruzados: O Efeito Hall

Como vimos, um feixe de elétrons no vácuo pode ser desviado por um campo magnético. Será que os elétrons que se movem no interior de um fio de cobre também podem ser desviados por um campo magnético? Em 1879, Edwin H. Hall, na época um aluno de doutorado de 24 anos da Johns Hopkins University, mostrou que sim. Esse efeito, que mais tarde veio a ser conhecido como **efeito Hall**, permite verificar se os portadores de carga em um condutor têm carga positiva ou negativa. Além disso, permite medir o número de portadores por unidade de volume do condutor.

A Fig. 28-8a mostra uma fita de cobre de largura d percorrida por uma corrente i cujo sentido convencional é de cima para baixo na figura. Os portadores de corrente são elétrons que, como sabemos, se movem (com velocidade de deriva v_d) no sentido oposto, de baixo para cima. No instante mostrado na Fig. 28-8a um campo magnético externo $\vec{B}$, que aponta para dentro do papel, acaba de ser ligado. De acordo com a Fig. 28-2, uma força magnética $\vec{F}_B$ age sobre os elétrons, desviando-os para o lado direito da fita.

Com o passar do tempo os elétrons se movem para a direita, acumulando-se na borda direita da fita e deixando cargas positivas não compensadas em posições fixas da borda esquerda. A separação de cargas positivas e negativas produz um campo elétrico $\vec{E}$ no interior da fita que aponta para a direita na Fig. 28-8b. O campo exerce uma força $\vec{F}_E$ sobre os elétrons, desviando-os para a esquerda.

Os elétrons continuam a se acumular na borda direita da fita, até que a força exercida pelo campo elétrico sobre os elétrons equilibre exatamente a força exercida pelo campo magnético. Quando isso acontece, como mostra a Fig. 28-8b, as forças $\vec{F}_E$ e $\vec{F}_B$ têm módulos iguais e sentidos opostos. Os elétrons passam a se mover em linha reta em direção ao alto da página com velocidade $\vec{v}_d$, e o campo elétrico $\vec{E}$ pára de aumentar.

De acordo com a Eq. 24-42, ao campo elétrico entre as bordas da fita está associada uma *diferença de potencial de Hall* dada por

$$V = Ed. \quad (28-9)$$

Ligando um voltímetro às bordas da fita podemos medir essa diferença de potencial e descobrir em qual das bordas o potencial é maior. Para a situação da Fig. 28-8b, observaríamos que o potencial é maior na borda da esquerda, como é de se esperar no caso de portadores de carga negativos.

Vamos supor que os portadores de carga responsáveis pela corrente i tivessem carga positiva (Fig. 28-8c). Nesse caso, os portadores estariam se movendo de cima para baixo, seriam desviados para a borda da direita pela força $\vec{F}_B$ e o potencial seria

maior na borda da direita, o que não estaria de acordo com a leitura do voltímetro. A leitura obtida indica, portanto, que os portadores de carga têm carga negativa.

Vamos passar para a parte quantitativa. De acordo com as Eqs. 28-1 e 28-3, quando as forças elétrica e magnética estão em equilíbrio (Fig. 28-8b) temos:

$$eE = ev_d B. \quad (28-10)$$

De acordo com a Eq. 26-7, a velocidade de deriva v_d é dada por

$$v_d = \frac{J}{ne} = \frac{i}{neA}, \quad (28-11)$$

onde $J (= i/A)$ é a densidade de corrente na fita, A é a área da seção reta da fita e n é a concentração de portadores de carga (número de portadores por unidade de volume).

Combinando as Eqs. 28-9, 28-10 e 28-11, obtemos

$$n = \frac{Bi}{Vle}, \quad (28-12)$$

onde $l (= A/d)$ é a espessura da fita. Esta equação permite calcular o valor de n a partir de grandezas conhecidas.

Também é possível usar o efeito Hall para medir diretamente a velocidade de deriva v_d dos portadores de carga, que, como vimos, é da ordem de centímetros por hora. Nesse experimento engenhoso a fita é deslocada, na presença de um campo magnético, no sentido oposto ao da velocidade de deriva dos portadores, e a velocidade de deslocamento da fita é ajustada para que a diferença de potencial de Hall seja zero. Para que o efeito Hall não seja observado é preciso que a velocidade dos portadores em relação ao laboratório seja zero; isso significa, portanto, que nessas condições a velocidade dos portadores de carga tem o mesmo módulo que a velocidade da fita e o sentido oposto.

Exemplo 28-2 Aumente sua capacidade

A Fig. 28-9 mostra um cubo de metal de lado $d = 1,5$ cm que se move no sentido positivo do eixo y com uma velocidade constante $\vec{v}$ de módulo 4,0 m/s. Na região existe um campo magnético uniforme $\vec{B}$ de módulo 0,050 T no sentido positivo do eixo z .

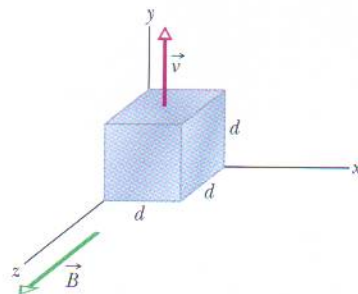
(a) Em que face do cubo o potencial é menor e em que face é maior por causa da influência do campo magnético?

IDÉIAS-CHAVE

Como o cubo está se movendo na presença de um campo magnético $\vec{B}$, uma força magnética $\vec{F}_B$ age sobre todas as partículas carregadas que compõem o cubo, entre elas os elétrons de condução.

Raciocínio: Como o cubo está se movendo, os elétrons participam desse movimento. Como os elétrons têm carga q e estão se movendo com velocidade $\vec{v}$ na presença de um campo magnético, a força magnética $\vec{F}_B$ que age sobre os elétrons é dada pela Eq. 28-2. Como q é negativa, o sentido de $\vec{F}_B$ é o oposto ao do produto vetorial $\vec{v} \times \vec{B}$, que aponta no sentido positivo do eixo x na Fig. 28-9. Assim, $\vec{F}_B$ aponta no sentido negativo do eixo x , em direção à face esquerda do cubo (que não pode ser vista na Fig. 28-9).

FIG. 28-9 Um cubo de metal de lado d que se move com velocidade constante $\vec{v}$ na presença de um campo magnético uniforme $\vec{B}$.



A maioria dos elétrons está presa aos átomos do cubo. Entretanto, como o cubo é feito de metal contém elétrons de condução que estão livres para se mover. Alguns desses elétrons de condução são desviados pela força $\vec{F}_B$ na direção da face esquerda do cubo, o que torna esta face negativamente carregada e deixa a face da direita positivamente carregada. A separação de cargas produz um campo elétrico $\vec{E}$ dirigido da face direita, positivamente carregada, para a face esquerda, negativamente carregada. Assim, o potencial da face esquerda é menor e o potencial da face direita é maior.

(b) Qual é a diferença de potencial entre as faces de maior e menor potencial elétrico?

IDÉIAS-CHAVE

1. O campo elétrico $\vec{E}$ criado pela separação de cargas faz com que cada elétron seja submetido a uma força elétrica $\vec{F}_E = q\vec{E}$. Como q é negativa, essa força tem o sentido oposto ao de $\vec{E}$. Assim, $\vec{F}_E$ aponta para a direita e $\vec{F}_B$ aponta para a esquerda.
2. Quando o cubo penetra na região em que existe campo magnético e as cargas começam a se separar o módulo de $\vec{E}$ começa a aumentar a partir de zero. Assim, o módulo de $\vec{F}_E$ também começa a aumentar a partir de zero, e é inicialmente menor que $\vec{F}_B$. Neste estágio inicial o movimento dos elétrons é dominado por $\vec{F}_B$, que acumula elétrons na face esquerda do cubo, aumentando a separação de cargas.
3. Com o aumento da separação de cargas, porém, chega um instante em que a força $\vec{F}_E$ se torna igual em módulo à força $\vec{F}_B$. Nesse instante a força total exercida sobre os elétrons é zero e os elétrons deixam de se acumular na face esquerda do cubo. Assim, o módulo de $\vec{F}_E$ pára de aumentar e o sistema entra em equilíbrio.

Cálculos: Estamos interessados em calcular a diferença de potencial V entre a face esquerda e a face direita do cubo depois de atingido o equilíbrio (que acontece quase instantaneamente). Podemos obter o valor de V usando a Eq. 28-9 ($V = Ed$), mas para isso precisamos conhecer o módulo E do campo elétrico na condição de equilíbrio. Para obter o valor de E usamos a equação de equilíbrio de forças ($F_E = F_B$).

Para calcular F_E usamos a relação $F_E = |q|E$, obtida a partir da Eq. 28-1; para calcular F_B , usamos relação $F_B = |q|vB \sin \phi$ (Eq. 28-3). De acordo com a Fig. 28-9, o ângulo ϕ entre os vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$ é 90° ; assim, fazendo $\sin \phi = 1$ e $F_E = F_B$, obtemos:

$$|q|E = |q|vB \sin 90^\circ = |q|vB.$$

Isso nos dá $E = vB$ e, portanto, $V = Ed$ se torna

$$V = vBd. \quad (28-13)$$

Substituindo os valores conhecidos, obtemos:

$$\begin{aligned} V &= (4,0 \text{ m/s})(0,050 \text{ T})(0,015 \text{ m}) \\ &= 0,0030 \text{ V} = 3,0 \text{ mV}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

28-6 | Uma Partícula Carregada em Movimento Circular

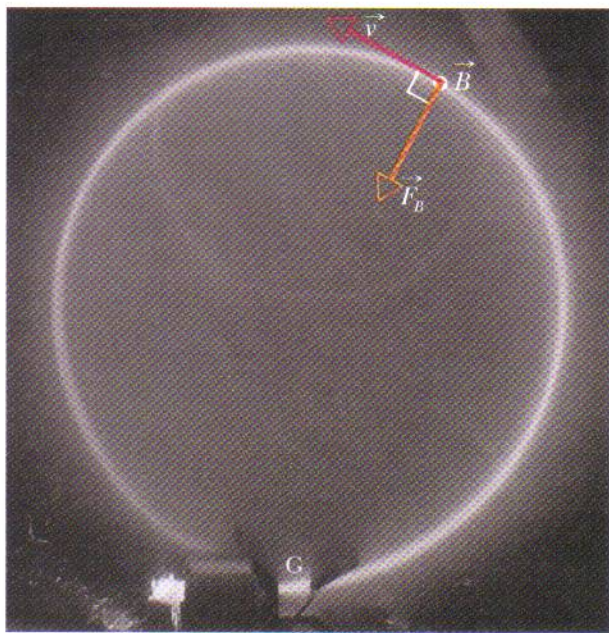


FIG. 28-10 Elétrons circulando em uma câmara que contém uma pequena quantidade de gás (a trajetória dos elétrons é o anel claro). Na câmara existe um campo magnético uniforme $\vec{B}$ dirigido para fora do plano do papel. Note que a força magnética $\vec{F}_B$ é radial; para que o movimento seja circular é preciso que $\vec{F}_B$ aponte para o centro da trajetória. Use a regra da mão direita para produtos vetoriais para confirmar que $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ tem a direção apropriada. (Não se esqueça do sinal de q .) (Cortesia de John Le P. Webb, Sussex University, Inglaterra)

Se uma partícula se move ao longo de uma circunferência com velocidade constante podemos ter certeza de que a força que age sobre a partícula tem módulo constante e aponta para o centro da circunferência, mantendo-se perpendicular à velocidade da partícula. Pense em uma pedra amarrada a uma corda que gira em círculos em uma superfície horizontal sem atrito, ou em um satélite que gira em torno da Terra em uma órbita circular. No primeiro caso, a tensão da corda é responsável pela força e pela aceleração centrípeta; no segundo, a força e a aceleração são causadas pela atração gravitacional.

A Fig. 28-10 mostra outro exemplo: um feixe de elétrons é lançado em uma câmara por um *canhão de elétrons* G. Os elétrons se movem no plano do papel com velocidade v , em uma região na qual existe um campo magnético $\vec{B}$ dirigido para fora do plano do papel. Em consequência, uma força magnética $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$ age continuamente sobre os elétrons. Como $\vec{v}$ e $\vec{B}$ são perpendiculares, a força faz com que os elétrons descrevam uma trajetória circular. A trajetória é visível na fotografia porque alguns dos elétrons colidem com átomos do gás presente na câmara, fazendo-os emitir luz.

Estamos interessados em determinar os parâmetros que caracterizam o movimento circular desses elétrons ou de qualquer outra partícula de carga $|q|$ e massa m que se mova com velocidade v perpendicularmente a um campo magnético uniforme $\vec{B}$. De acordo com a Eq. 28-3, o módulo da força que age sobre a partícula é $|q|vB$. De acordo com a segunda lei de Newton ($\vec{F} = m\vec{a}$) aplicada ao movimento circular (Eq. 6-18),

$$F = m \frac{v^2}{r}, \quad (28-14)$$

temos

$$|q|vB = \frac{mv^2}{r}. \quad (28-15)$$

Explicitando r , vemos que o raio da trajetória circular é dado por

$$r = \frac{mv}{|q|B} \quad (\text{raio}). \quad (28-16)$$

O período T (tempo necessário para completar uma revolução) é igual à circunferência dividida pela velocidade:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{v} \frac{mv}{|q|B} = \frac{2\pi m}{|q|B} \quad (\text{período}). \quad (28-17)$$

A frequência f (número de revoluções por minuto) é dada por

$$f = \frac{1}{T} = \frac{|q|B}{2\pi m} \quad (\text{frequência}). \quad (28-18)$$

A frequência angular do movimento é, portanto,

$$\omega = 2\pi f = \frac{|q|B}{m} \quad (\text{frequência angular}). \quad (28-19)$$

As grandezas T , f e ω não dependem da velocidade da partícula (contanto que a velocidade seja muito menor que a velocidade da luz). Partículas velozes se movem em círculos grandes e partículas lentas se movem em círculos pequenos, mas todas as partículas com a mesma razão entre carga e massa $|q|/m$ levam o mesmo tempo T (o período) para completar uma revolução. Usando a Eq. 28-2 é fácil mostrar que, olhando na direção de $\vec{B}$, o sentido de rotação para uma partícula positiva é o sentido anti-horário e o sentido de rotação para uma partícula negativa é o sentido horário.

Trajcetórias Helicoidais

Se a velocidade de uma partícula carregada tem uma componente paralela ao campo magnético (uniforme), a partícula descreve uma trajetória helicoidal cujo eixo é a direção do campo. A Fig. 28-11a, por exemplo, mostra o vetor velocidade $\vec{v}$ de uma dessas partículas separado em duas componentes, uma paralela a $\vec{B}$ e outra perpendicular a $\vec{B}$:

$$v_{\parallel} = v \cos \phi \quad \text{e} \quad v_{\perp} = v \sin \phi. \quad (28-20)$$

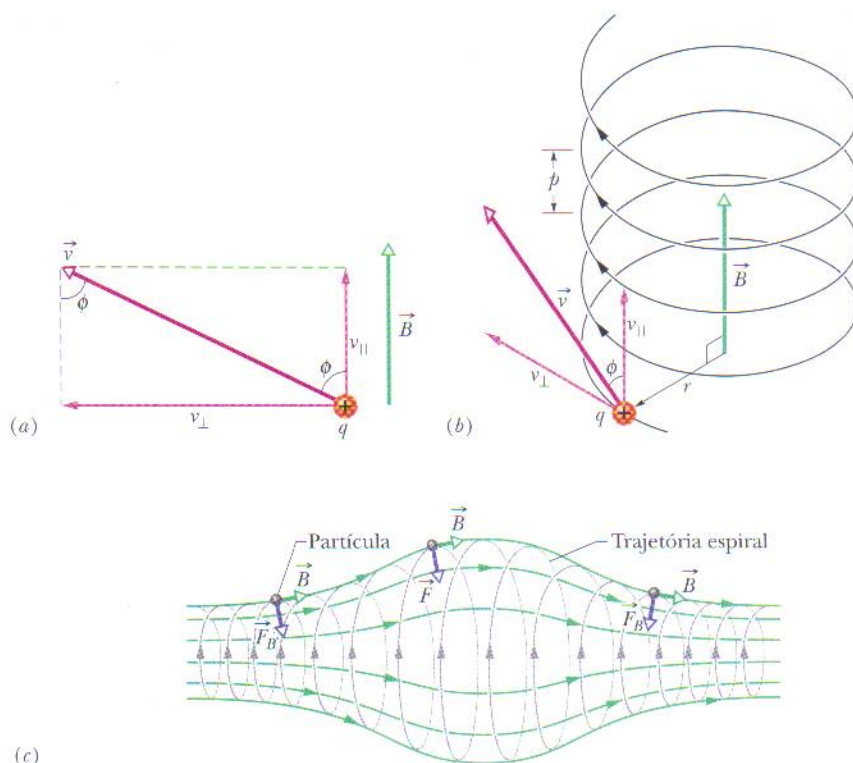
É a componente paralela que determina o *passo* p da hélice, ou seja, a distância entre espiras sucessivas (Fig. 28-11b). O raio da hélice e a grandeza que toma o lugar de v na Eq. 28-16 são determinados pela componente perpendicular.

A Fig. 28-11c mostra uma partícula carregada que se move em espiral na presença de um campo magnético não-uniforme. O espaçamento menor das linhas de campo nas extremidades mostra que o campo magnético é mais intenso nessas regiões. Se o campo em uma das extremidades for suficientemente intenso, a partícula será “refletida” de volta para o centro da região. Quando a partícula é refletida nas duas extremidades dizemos que está aprisionada em uma *garrafa magnética*.

Elétrons e prótons são aprisionados dessa forma pelo campo magnético terrestre, formando os *cinturões de radiação de Van Allen*, situados muito acima da atmosfera da Terra, entre os pólos geomagnéticos norte e sul. As partículas percorrem em apenas alguns segundos a distância entre os pólos antes de serem refletidas na direção oposta.

Quando uma erupção solar injeta elétrons e prótons adicionais nos cinturões de radiação um campo elétrico é produzido na região onde os elétrons normalmente são refletidos. Esse campo elimina a reflexão e permite que os elétrons penetrem na atmosfera, colidindo com átomos e moléculas do ar e fazendo-os emitir luz. É esta luz que constitui a aurora, uma cortina luminosa observada a uma altitude da ordem

FIG. 28-11 (a) Uma partícula carregada se move na presença de um campo magnético uniforme $\vec{B}$, com a velocidade $\vec{v}$ da partícula fazendo um ângulo ϕ com a direção do campo. (b) A partícula descreve uma trajetória helicoidal de raio r e passo p . (c) Uma partícula carregada se move em espiral na presença de um campo magnético não-uniforme. (A partícula pode ser aprisionada, passando a descrever um movimento de vaivém entre as regiões em que o campo é mais intenso.) Observe que nas duas extremidades a componente horizontal da força magnética aponta para o centro da região.



de 100 km. Os átomos de oxigênio emitem luz verde e as moléculas de nitrogênio emitem luz cor-de-rosa, mas muitas vezes a luz é tão fraca que parece branca.

As auroras formam arcos acima da Terra e podem ocorrer em uma região conhecida como *oval de auroras* (Figs. 28-12 e 28-13). As auroras são extensas mas apresentam uma espessura muito pequena, da ordem de 100 m (no sentido norte-sul),

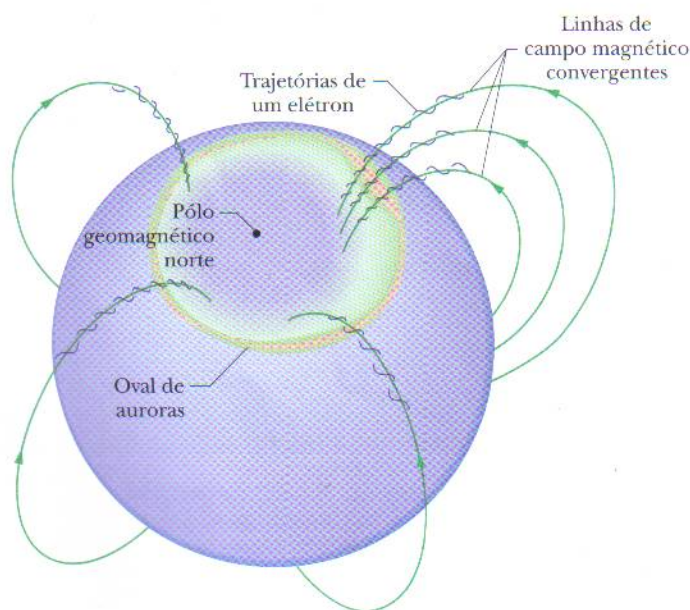


FIG. 28-12 Oval de auroras nas vizinhanças do pólo geomagnético norte da Terra (situado no nordeste da Groenlândia). As linhas de campo magnético convergem para o pólo. Os elétrons que se aproximam da Terra são “capturados” e descrevem trajetórias em espiral ao longo das linhas de campo, penetrando na atmosfera terrestre em altas latitudes e produzindo auroras dentro do oval.

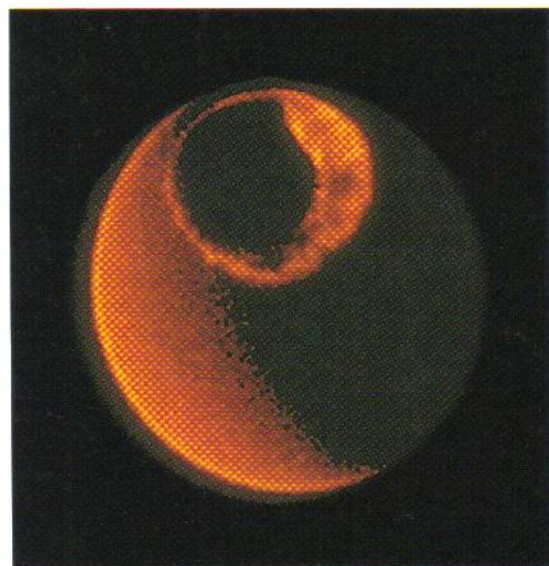


FIG. 28-13 Imagem em cores falsas de uma aurora no interior do oval de auroras norte, registrado pelo satélite *Dynamic Explorer* usando a luz ultravioleta emitida por átomos de oxigênio excitados. A parte da Terra iluminada pelo Sol é o crescente do lado esquerdo. (Cortesia do Dr. L. A. Frank, University of Iowa)

porque as trajetórias dos elétrons responsáveis pela luz acompanham as linhas de campo magnético, que convergem ao se aproximarem dos pólos (Fig. 28-12).

TESTE 3 A figura mostra as trajetórias circulares de duas partículas que se movem com a mesma velocidade na presença de um campo magnético uniforme $\vec{B}$ dirigido para dentro do papel. Uma partícula é um próton e a outra é um elétron (que possui uma massa muito menor). (a) Qual das partículas descreve a circunferência menor? (b) Essa partícula se move no sentido horário ou no sentido anti-horário?



Exemplo 28-3

A Fig. 28-14 ilustra o princípio de funcionamento de um *espectrômetro de massa*, que pode ser usado para medir a massa de íons. Um íon de massa m (a ser medida) e carga q é produzido na fonte S e acelerado pelo campo elétrico associado a uma diferença de potencial V . O íon entra em uma câmara de separação na qual existe um campo magnético uniforme $\vec{B}$ perpendicular à sua trajetória. O campo faz com que o íon descreva uma trajetória semicircular antes de atingir um detector situado na superfície inferior da câmara. Suponha que $B = 80.000 \text{ mT}$, $V = 1000,0 \text{ V}$ e os íons de carga $q = +1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ atinjam o detector em um ponto situado a uma distância $x = 1,6254 \text{ m}$ do ponto de entrada na câmara. Qual é a massa m dos íons em unidades de massa atômica? (Eq. 1-7: $1 \text{ u} = 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$).

IDÉIAS-CHAVE

(1) Como o campo magnético uniforme faz com que o íon descreva uma trajetória circular, podemos relacionar a massa m do íon ao raio r da trajetória através

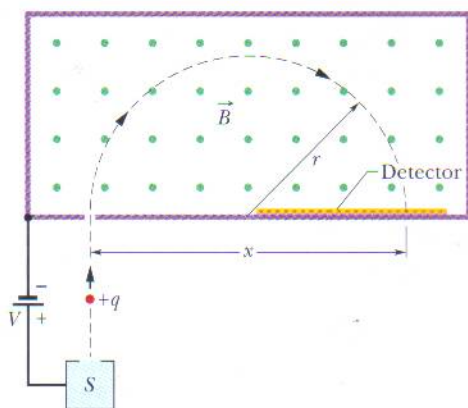


FIG. 28-14 Princípio de funcionamento de um espectrômetro de massa. Um íon positivo, depois de ser gerado por uma fonte S e acelerado por uma diferença de potencial V , penetra em uma câmara onde existe um campo magnético uniforme $\vec{B}$ e descreve uma semicircunferência de raio r antes de atingir um detector a uma distância x do ponto em que entrou na câmara.

da Eq. 28-16 ($r = mv/qB$). De acordo com a Fig. 28-14, $r = x/2$ e conhecemos o módulo B do campo magnético. Entretanto, não conhecemos a velocidade v dos íons depois que são acelerados pela diferença de potencial V . (2) Para determinar a relação entre v e V usamos o fato de que a energia mecânica ($E_{\text{mec}} = K + U$) é conservada durante a aceleração.

Cálculo da velocidade: Quando o íon deixa a fonte a energia cinética é aproximadamente zero; quando entra na câmara, a energia cinética aumentou para $\frac{1}{2}mv^2$. Além disso, durante a aceleração o íon positivo sofre uma variação de potencial elétrico de $-V$. Como o íon possui uma carga positiva q , a variação de energia potencial é $-qV$. De acordo com a lei de conservação da energia mecânica,

$$\Delta K + \Delta U = 0,$$

e, portanto,

$$\frac{1}{2}mv^2 - qV = 0$$

ou

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}. \quad (28-21)$$

Cálculo da massa: Substituindo v pelo seu valor na Eq. 28-16, obtemos:

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{m}{qB} \sqrt{\frac{2qV}{m}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{q}}.$$

Assim,

$$x = 2r = \frac{2}{B} \sqrt{\frac{2mV}{q}}.$$

Explicitando m e substituindo os valores conhecidos, temos:

$$\begin{aligned} m &= \frac{B^2 q x^2}{8V} \\ &= \frac{(0,080000 \text{ T})^2 (1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}) (1,6254 \text{ m})^2}{8(1000,0 \text{ V})} \\ &= 3,3863 \times 10^{-25} \text{ kg} = 203,93 \text{ u}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

Exemplo 28-4

Um elétron com uma energia cinética de 22,5 eV penetra em uma região onde existe um campo magnético $\vec{B}$ de módulo $4,55 \times 10^{-4}$ T. O ângulo entre a direção de $\vec{B}$ e a direção da velocidade $\vec{v}$ do elétron é $65,5^\circ$. Qual é o passo da trajetória helicoidal do elétron?

IDÉIAS-CHAVE

(1) O passo p é a distância que o elétron percorre paralelamente ao campo magnético $\vec{B}$ durante um período T de revolução. (2) O período T é dado pela Eq. 28-17, independentemente do ângulo entre $\vec{v}$ e $\vec{B}$ (contanto que o ângulo não seja zero, porque nesse caso a trajetória do elétron não será circular).

Cálculos: De acordo com as Eqs. 28-20 e 28-17, temos:

$$p = v_{\parallel} T = (v \cos \phi) \frac{2\pi m}{|q|B}. \quad (28-22)$$

Podemos calcular a velocidade v do elétron a partir da energia cinética como fizemos para o próton do Exemplo 28-1; o resultado é $v = 2,81 \times 10^6$ m/s. Substituindo este valor e outros valores conhecidos na Eq. 28-22, obtemos:

$$\begin{aligned} p &= (2,81 \times 10^6 \text{ m/s})(\cos 65,5^\circ) \\ &\times \frac{2\pi(9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})}{(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(4,55 \times 10^{-4} \text{ T})} \\ &= 9,16 \text{ cm}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

28-7 | Cíclotrons e Síncrotrons

Feixes de partículas de alta energia, como elétrons e prótons, têm sido imensamente úteis para os estudos de átomos e núcleos que cujo objetivo é conhecer a estrutura fundamental da matéria. Esses feixes foram fundamentais para a descoberta de que os núcleos atômicos são formados por prótons e nêutrons e que os prótons e nêutrons são formados por quarks e glúons. Para trabalhar com os feixes, porém, é preciso produzi-los e controlá-los, o que não é fácil. Como os elétrons e prótons possuem carga elétrica, em princípio podemos acelerá-los até que atinjam altas energias submetendo-os a grandes diferenças de potencial. No caso dos elétrons, cuja massa é muito pequena, é possível acelerá-los dessa forma em uma distância razoável. No caso dos prótons (e de outras partículas carregadas), porém, como a massa é muito maior, a distância necessária para a aceleração pode se tornar proibitiva.

Uma solução engenhosa para o problema consiste em acelerar os prótons e outras partículas pesadas com uma diferença de potencial moderada (fazendo com que adquiram uma energia cinética moderada) e usar um campo magnético para fazer com que passem várias vezes por essa mesma diferença de potencial. Quando o processo é repetido milhares de vezes as partículas adquirem uma energia extremamente elevada.

Vamos agora discutir dois tipos de *aceleradores de partículas* que utilizam um campo magnético para conduzir as partículas repetidas vezes para uma região de aceleração, onde ganham mais e mais energia até finalmente emergirem como um feixe de alta energia.

O Cíclotron

A Fig. 28-15 mostra uma vista de topo da região de um cíclotron na qual circulam partículas (prótons, por exemplo). As paredes das duas câmaras em forma de D (abertas na face plana) são feitas de cobre. Os *dês*, como são chamados, estão ligados a um oscilador que alterna o potencial elétrico de tal forma que o campo elétrico na região entre os *dês* aponta ora em um sentido, ora no sentido oposto. Ao mesmo tempo, é aplicado um campo magnético de alta intensidade para fora do plano da página. O módulo B desse campo depende da corrente no eletroímã responsável pela produção do campo.

Suponha que um próton, injetado pela fonte S situada no centro do cíclotron na Fig. 28-15, esteja inicialmente se movendo em direção ao *dê* da esquerda, negativamente carregado. O próton é atraído pelo *dê* e entra nele. Depois de entrar, fica isolado do campo elétrico pelas paredes de cobre do *dê*; em outras palavras, o campo elétrico não penetra nas câmaras. O campo magnético, porém, não está sujeito aos

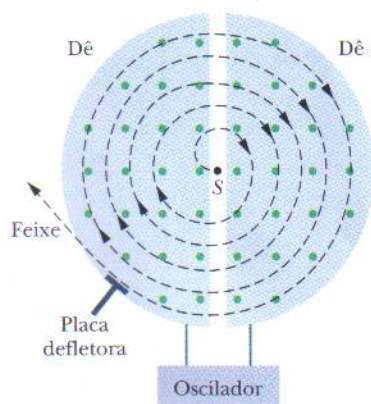


FIG. 28-15 Diagrama esquemático de um cíclotron, mostrando a fonte de partículas S e os *dês*. Um campo magnético uniforme é aplicado para fora do plano do papel. As partículas descrevem uma trajetória espiral, ganhando energia cada vez que atravessam o espaço entre os *dês*.

efeitos das paredes de cobre (um metal não-magnético) e, portanto, age sobre o próton, fazendo com que descreva uma trajetória semicircular cujo raio, que depende da velocidade, é dado pela Eq. 28-16 ($r = mv/q|B|$).

Suponha que no instante em que o próton chega ao espaço central, proveniente do dê da esquerda, a diferença de potencial entre os dois dêes seja invertida. Nesse caso, o próton é *novamente* atraído por um dê negativamente carregado e é *novamente* acelerado. O processo continua, com o movimento do próton sempre em fase com as oscilações do potencial, até que uma trajetória em espiral leve a partícula até a borda do sistema, onde uma placa defletora a faz passar por um orifício e deixar um dos dêes.

O funcionamento do ciclotron se baseia no fato de que a frequência f com a qual a partícula circula sob o efeito do campo magnético (e que *não depende* da velocidade) pode ser igual à frequência f_{osc} do oscilador elétrico, ou seja,

$$f = f_{\text{osc}} \quad (\text{condição de ressonância}). \quad (28-23)$$

De acordo com esta *condição de ressonância*, para que a energia da partícula aumente é preciso que a frequência f_{osc} do oscilador elétrico seja igual à frequência com a qual a partícula circula sob o efeito com campo magnético.

Combinando as Eqs. 28-18 ($f = |q|B/2\pi m$) com a Eq. 28-23, podemos escrever a condição de ressonância na forma

$$|q|B = 2\pi m f_{\text{osc}}. \quad (28-24)$$

No caso do próton, q e m são valores fixos. Na prática, o oscilador é projetado para trabalhar em uma certa frequência fixa f_{osc} . Para “sintonizar” o ciclotron o valor de B é ajustado até que a Eq. 28-24 seja satisfeita, o que faz com que muitos prótons circulem no aparelho e saiam pelo orifício como um feixe de partículas de alta energia.

Outras partículas carregadas podem ser aceleradas por um ciclotron para formar feixes de alta energia. Os *dêuterons* (partículas formadas por um próton e um nêutron), por exemplo, podem ser acelerados, pois possuem a mesma carga que os prótons. Partículas neutras, como o nêutron, não podem ser aceleradas por um ciclotron, mas é possível produzir um feixe de nêutrons de alta energia fazendo um feixe de dêuterons colidir com um alvo de berílio. Este é o sistema usado nos hospitais para tratar o câncer com nêutrons rápidos. O feixe de dêuterons que emerge de um ciclotron instalado no hospital incide em um alvo de berílio colocado nas proximidades do tumor canceroso. Quando os dêuterons colidem com núcleos de berílio nêutrons são arrancados dos núcleos de berílio e penetram no tumor, onde danificam o DNA das células cancerosas, provocando sua morte (Fig. 28-16). Tudo isso pode ser feito no próprio hospital porque os dêuterons são acelerados até altas energias enquanto circulam em um ciclotron, em vez de percorrerem uma trajetória retilínea extremamente longa.

O Síncrotron

O ciclotron convencional não funciona bem no caso de prótons com uma energia maior que 50 MeV porque a hipótese fundamental do projeto, a de que a frequência de revolução de uma partícula carregada que circula na presença de um campo magnético não depende da velocidade, é válida apenas para velocidades muito menores que a velocidade da luz. Para velocidades acima de 10% da velocidade da luz devem ser usadas as equações da teoria da relatividade. De acordo com essa teoria, quanto maior a velocidade da partícula, maior a massa e menor a frequência de revolução. Assim, as partículas se atrasam em relação à frequência do oscilador, que tem um valor fixo f_{osc} , e a energia da partícula passa a aumentar cada vez menos a cada revolução, tendendo para um valor constante.

Existe outro problema. Para um próton de 500 GeV em um campo magnético de 1,5 T o raio da trajetória é 1,1 km. No caso de um ciclotron convencional, o campo magnético teria que ser aplicado em toda a região limitada por esta trajetória, o

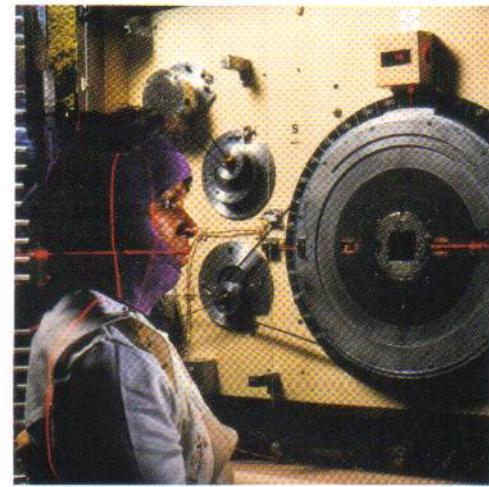


FIG. 28-16 Como é invisível, o feixe de nêutrons que emerge do acelerador à direita é alinhado com o auxílio de raios laser que iluminam a paciente. (Fermilab/Science Photo Library/Photo Researchers)

que exigiria um ímã de tamanho descomunal, com peças polares da ordem de $4 \times 10^6 \text{ m}^2$.

O *síncrotron* foi criado para resolver esses dois problemas. Em vez de possuírem valores fixos como no ciclotron convencional, o campo magnético B e a frequência do oscilador f_{osc} variam com o tempo enquanto as partículas estão sendo aceleradas. Quando isso é realizado de forma correta, (1) a frequência de revolução das partículas permanece em fase com a frequência do oscilador; (2) as partículas descrevem uma trajetória circular em vez de espiral. Assim, o campo magnético precisa cobrir uma área bem menor, correspondente a essa trajetória. Entretanto, no caso de partículas de alta energia o raio da trajetória não pode deixar de ser grande. O síncrotron do Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), em Illinois, tem uma circunferência de 6,3 km e pode produzir prótons com uma energia da ordem de 1 TeV ($= 10^{12} \text{ eV}$).

Exemplo 28-5

A frequência do oscilador de um ciclotron é 12 MHz e o raio dos dees é $R = 53 \text{ cm}$.

(a) Qual é o módulo do campo magnético necessário para acelerar dêutrons nesse ciclotron? A massa do dêuteron é $m = 3,34 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

IDÉIA-CHAVE

De acordo com a Eq. 28-24 ($|q|B = 2\pi m f_{\text{osc}}$), para uma dada frequência do oscilador f_{osc} o módulo do campo magnético B necessário para acelerar qualquer partícula em um ciclotron depende apenas da razão $m/|q|$ entre a massa e o valor absoluto da carga da partícula.

Cálculo: No caso de dêutrons e para uma frequência do oscilador $f_{\text{osc}} = 12 \text{ MHz}$, temos:

$$B = \frac{2\pi m f_{\text{osc}}}{|q|} = \frac{(2\pi)(3,34 \times 10^{-27} \text{ kg})(12 \times 10^6 \text{ s}^{-1})}{1,60 \times 10^{-19} \text{ C}} \\ = 1,57 \text{ T} \approx 1,6 \text{ T.} \quad (\text{Resposta})$$

Observe que para acelerar prótons B teria que ser dividido por 2, caso a frequência do oscilador permanecesse a mesma.

(b) Qual é a energia cinética dos dêutrons acelerados pelo ciclotron?

IDÉIAS-CHAVE

(1) A energia cinética ($\frac{1}{2}mv^2$) de um dêuteron ao sair do ciclotron é igual à energia cinética que o dêuteron possuía quando estava descrevendo uma trajetória com um raio igual ao raio R do ciclotron. (2) Podemos calcular a velocidade v do dêuteron nessa trajetória usando a Eq. 28-16 ($r = mv/|q|B$).

Cálculos: Explicitando v nessa equação, fazendo $r = R$ e substituindo os valores conhecidos, obtemos:

$$v = \frac{R|q|B}{m} = \frac{(0,53 \text{ m})(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(1,57 \text{ T})}{3,34 \times 10^{-27} \text{ kg}} \\ = 3,99 \times 10^7 \text{ m/s.}$$

Essa velocidade corresponde a uma energia cinética

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \\ = \frac{1}{2}(3,34 \times 10^{-27} \text{ kg})(3,99 \times 10^7 \text{ m/s})^2 \\ = 2,7 \times 10^{-12} \text{ J,} \quad (\text{Resposta})$$

ou cerca de 17 MeV.

28-8 Força Magnética em um Fio Percorrido por Corrente

Já vimos (quando discutimos o efeito Hall) que um campo magnético exerce uma força lateral sobre os elétrons que se movem em um fio. Essa força, naturalmente, é transmitida para o fio, já que os elétrons não podem deixá-lo.

Na Fig. 28-17a um fio vertical, que não conduz corrente e está preso nas duas extremidades, é colocado no espaço entre os pólos de um ímã. O campo magnético do ímã é dirigido para fora do papel. Na Fig. 28-17b uma corrente dirigida para cima passa a circular no fio, que se encurva para a direita. Na Fig. 28-17c o sentido da corrente é invertido, e o fio se encurva para a esquerda.

A Fig. 28-18 mostra o que acontece no interior do fio da Fig. 28-17b. Um dos elétrons se move para baixo com a velocidade de deriva v_d . De acordo com a Eq.

28-3, neste caso com $\phi = 90^\circ$, uma força $\vec{F}_B$ de módulo $ev_d B$ age sobre o elétron. De acordo com a Eq. 28-2, a força aponta para a direita. Esperamos, portanto, que o fio como um todo experimente uma força para a direita, como mostra a Fig. 28-17b.

Se na Fig. 28-18 invertermos o sentido do campo magnético *ou* o sentido da corrente, a força exercida sobre o fio mudará de sentido e passará a apontar para a esquerda. Observe também que não importa se consideramos cargas negativas se movendo para baixo (o que na realidade acontece) ou cargas positivas se movendo para cima; nos dois casos o sentido da força é o mesmo. Podemos imaginar, portanto, para efeito dos cálculos, que a corrente é constituída por cargas positivas.

Considere um trecho do fio de comprimento L na Fig. 28-18. Após um intervalo de tempo $t = L/v_d$ todos os elétrons de condução desse trecho passam pelo plano xx . Assim, nesse intervalo de tempo uma carga dada por

$$q = it = i \frac{L}{v_d}$$

passa pelo plano xx . Substituindo na Eq. 28-3, temos:

$$F_B = qv_d B \sin \phi = \frac{iL}{v_d} v_d B \sin 90^\circ$$

$$\text{ou} \quad F_B = iLB. \quad (28-25)$$

Esta equação permite calcular a força magnética que age sobre um trecho de fio retilíneo de comprimento L percorrido por uma corrente i e submetido a um campo magnético $\vec{B}$ perpendicular ao fio.

Se o campo magnético *não* é perpendicular ao fio, como na Fig. 28-19, a força magnética é dada por uma generalização da Fig. 28-25:

$$\vec{F}_B = i\vec{L} \times \vec{B} \quad (\text{força sobre uma corrente}). \quad (28-26)$$

onde $\vec{L}$ é um vetor comprimento de módulo L , com a direção do trecho de fio e o sentido (convencional) da corrente. O módulo da força F_B é dado por

$$F_B = iLB \sin \phi, \quad (28-27)$$

onde ϕ é o ângulo entre as direções de $\vec{L}$ e $\vec{B}$. A direção de $\vec{F}_B$ é a do produto vetorial $\vec{L} \times \vec{B}$ porque tomamos a corrente i como sendo uma grandeza positiva. De acordo com a Eq. 28-26, $\vec{F}_B$ é sempre perpendicular ao plano definido pelos vetores $\vec{L}$ e $\vec{B}$, como mostra a Fig. 28-19.

A Eq. 28-26 é equivalente à Eq. 28-2 no sentido de que qualquer das duas pode ser usada como equação de definição de $\vec{B}$. Na prática definimos $\vec{B}$ através da Eq. 28-26 porque é muito mais fácil medir a força magnética que age sobre um fio percorrido por uma corrente do que a força que age sobre uma partícula em movimento.

Se o fio não é retilíneo ou o campo não é uniforme podemos dividir mentalmente o fio em pequenos segmentos retilíneos e aplicar a Eq. 28-26 a cada segmento. Nesse caso, a força que age sobre o fio como um todo é a soma vetorial das forças que agem sobre os segmentos em que foi dividido. No caso de segmentos infinitesimais, podemos escrever

$$d\vec{F}_B = i d\vec{L} \times \vec{B}, \quad (28-28)$$

e calcular a força total que age sobre um dado fio integrando a Eq. 28-28 para todo o fio.

Ao aplicar a Eq. 28-28 pode ser útil ter em mente que não existem segmentos isolados de comprimento dL percorridos por corrente; deve sempre haver um meio de introduzir corrente em uma das extremidades do segmento e retirá-la na outra extremidade.

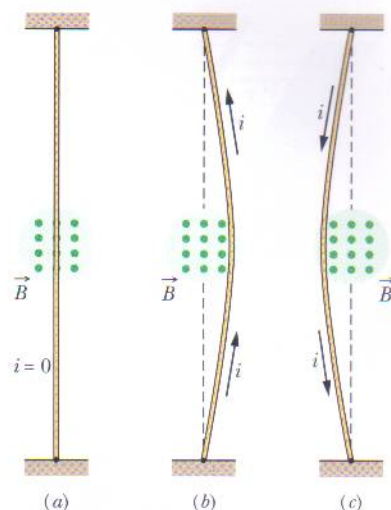


FIG. 28-17 Um fio flexível passa entre os pólos de um ímã (apenas o pólo mais distante aparece no desenho). (a) Quando não há corrente o fio não se encurva para nenhum lado. (b) Quando há uma corrente para cima o fio se encurva para a direita. (c) Quando há uma corrente para baixo o fio se encurva para a esquerda. As ligações necessárias para completar o circuito não aparecem no desenho.

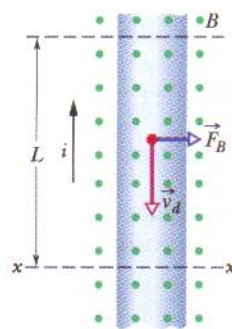


FIG. 28-18 Vista ampliada do fio da Fig. 28-17b. O sentido da corrente é para cima, o que significa que a velocidade de deriva dos elétrons aponta para baixo. Um campo magnético que aponta para fora do plano do papel faz com que os elétrons e o fio sejam submetidos a uma força para a direita.

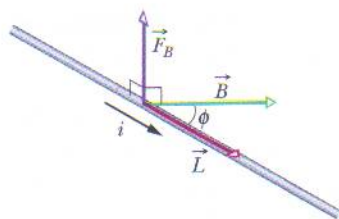
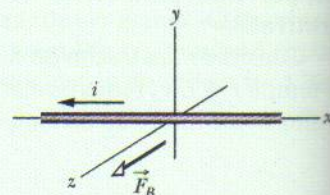


FIG. 28-19 Um fio percorrido por uma corrente i faz um ângulo ϕ com um campo magnético $\vec{B}$. O fio tem um comprimento L e um vetor comprimento $\vec{L}$ (na direção da corrente). Uma força magnética $\vec{F}_B = i\vec{L} \times \vec{B}$ age sobre o fio.



TESTE 4 A figura mostra um fio, percorrido por uma corrente i e submetido a um campo magnético $\vec{B}$, e também a força magnética $\vec{F}_B$ que age sobre o fio. Qual deve ser a orientação do campo para que a força seja máxima?



Exemplo 28-6

Um fio horizontal retilíneo, feito de cobre, é percorrido por uma corrente $i = 28$ A. Determine o módulo e a orientação do menor campo magnético $\vec{B}$ capaz de manter o fio suspenso, ou seja, equilibrar a força gravitacional. A massa específica linear (massa por unidade de comprimento) do fio é $46,6$ g/m.

para produtos vetoriais mostram que $\vec{B}$ deve ser horizontal e apontar para a direita (como na Fig. 28-20) para que a força $\vec{F}_B$ seja para cima.

O módulo de $\vec{F}_B$ é $F_B = iLB \sin \phi$ (Eq. 28-27). Como queremos que $\vec{F}_B$ equilibre $\vec{F}_g$, devemos ter

$$iLB \sin \phi = mg, \quad (28-29)$$

onde mg é o módulo de $\vec{F}_g$ e m é a massa do fio. Também queremos calcular o menor valor de B para o qual $\vec{F}_B$ equilibra $\vec{F}_g$. Assim, precisamos maximizar $\sin \phi$ na Eq. 28-29. Para isso, fazemos $\phi = 90^\circ$, o que significa que $\vec{B}$ deve ser perpendicular ao fio. Nesse caso, $\sin \phi = 1$ e a Eq. 28-29 nos dá

$$B = \frac{mg}{iL \sin \phi} = \frac{(m/L)g}{i}. \quad (28-30)$$

Escrevemos o resultado desta forma porque conhecemos m/L , a massa específica linear do fio. Substituindo os valores conhecidos, obtemos:

$$B = \frac{(46,6 \times 10^{-3} \text{ kg/m})(9,8 \text{ m/s}^2)}{28 \text{ A}} = 1,6 \times 10^{-2} \text{ T}. \quad (\text{Resposta})$$

Este campo é aproximadamente 160 vezes maior que o campo magnético da Terra.

IDEIAS-CHAVE

(1) Como o fio está sendo percorrido por uma corrente, sofre uma força magnética $\vec{F}_B$ quando é submetido a um campo magnético $\vec{B}$. Para equilibrar a força gravitacional $\vec{F}_g$, que aponta para baixo, precisamos de uma força magnética que aponte para cima (Fig. 28-20). (2) A orientação de $\vec{F}_B$ está relacionada às orientações de $\vec{B}$ e do vetor comprimento do fio $\vec{L}$ pela Eq. 28-26 ($\vec{F}_B = i\vec{L} \times \vec{B}$).

Cálculos: Como $\vec{L}$ é horizontal (e a corrente é tomada como sendo positiva), a Eq. 28-26 e a regra da mão direita

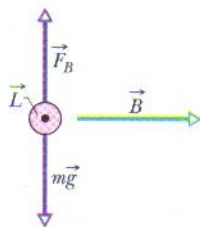


FIG. 28-20 Um fio (mostrado em seção reta) percorrido por uma corrente elétrica para fora do papel.

28-9 | Torque em uma Espira Percorrida por Corrente

Boa parte do trabalho do mundo é realizada por motores elétricos. As forças responsáveis por esse trabalho são as forças magnéticas que estudamos na seção anterior, ou seja, as forças que um campo magnético exerce sobre fios percorridos por correntes elétricas.

A Fig. 28-21 mostra um motor simples, constituído por uma espira percorrida por uma corrente e submetida a um campo magnético $\vec{B}$. As forças magnéticas $\vec{F}$ e $-\vec{F}$ produzem um torque na espira que tende a fazê-la girar em torno do eixo central.

Embora muitos detalhes essenciais tenham sido omitidos, a figura mostra como o efeito de um campo magnético sobre uma espira percorrida por corrente produz um movimento de rotação. Vamos analisar esse efeito.

A Fig. 28-22a mostra uma espira retangular de lados a e b percorrida por uma corrente i e submetida a um campo magnético uniforme $\vec{B}$. Colocamos a espira no campo de tal forma que os lados mais compridos, 1 e 3, estão sempre perpendiculares à direção do campo (que é para dentro do papel), mas o mesmo não acontece com os lados mais curtos, 2 e 4. Fios para introduzir e remover a corrente da espira são necessários, mas não aparecem na figura.

Para definir a orientação da espira em relação ao campo magnético usamos um vetor normal $\vec{n}$ que é perpendicular ao plano da espira. A Fig. 28-22b ilustra o uso da regra da mão direita para determinar a direção de $\vec{n}$. Quando os dedos da mão direita apontam na direção da corrente em um lado qualquer da espira, o polegar estendido aponta na direção do vetor normal $\vec{n}$.

Na Fig. 28-22c, o vetor normal da espira é mostrado fazendo um ângulo qualquer θ com a orientação do campo magnético $\vec{B}$. Estamos interessados em calcular a força total e o torque total que age sobre a espira nessa orientação.

A força total que age sobre a espira é a soma vetorial das forças que agem sobre os quatro lados. No caso do lado 2 o vetor $\vec{L}$ na Eq. 28-26 aponta na direção da corrente e tem módulo b . O ângulo entre $\vec{L}$ e $\vec{B}$ para o lado 2 (veja a Fig. 28-22c) é $90^\circ - \theta$. Assim, o módulo da força que age sobre esse lado é

$$F_2 = ibB \sin(90^\circ - \theta) = ibB \cos \theta. \quad (28-31)$$

É fácil mostrar que a força $\vec{F}_4$ que age sobre o lado 4 tem o mesmo módulo que $\vec{F}_2$ e o sentido oposto. Assim, $\vec{F}_2$ e $\vec{F}_4$ se cancelam. A força total associada aos lados 2 e 4 é zero; além disso, como as duas forças estão aplicadas ao longo de uma reta que coincide com o eixo de rotação da espira, o torque total produzido por essas forças também é zero.

A situação é diferente para os lados 1 e 3. Como nesse caso $\vec{L}$ é sempre perpendicular a $\vec{B}$, o módulo das forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_3$ é iaB , independentemente do valor de θ . Como as duas forças têm sentidos opostos não tendem a mover a espira para cima ou para baixo. Entretanto, como mostra a Fig. 28-22c, as duas forças *não estão* aplicadas ao longo da mesma reta e, portanto, o torque associado a essas forças *não é zero*. O torque tende a fazer a espira girar em um sentido tal que o vetor normal $\vec{n}$ se alinhe com a direção do campo magnético $\vec{B}$. Esse torque tem um braço de alavanca $(b/2) \sin \theta$ em relação ao eixo da espira. O módulo τ' do torque produzido pelas forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_3$ é portanto (veja a Fig. 28-22c):

$$\tau' = \left(iaB \frac{b}{2} \sin \theta \right) + \left(iaB \frac{b}{2} \sin \theta \right) = iabB \sin \theta. \quad (28-32)$$

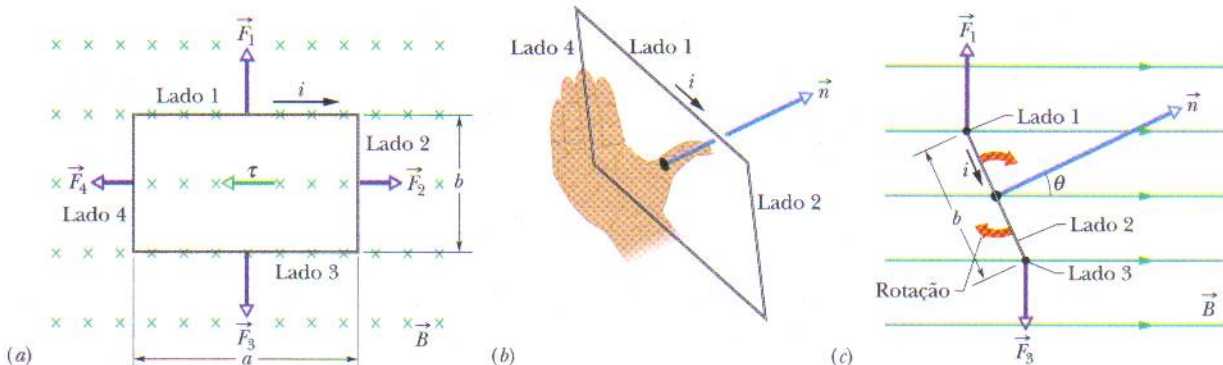


FIG. 28-22 Uma espira retangular de lados a e b percorrida por uma corrente i e submetida a um campo magnético uniforme. Um torque τ tende a alinhar o vetor normal $\vec{n}$ com a direção do campo. (a) Vista da espira olhando na direção do campo magnético. (b) Vista da espira em perspectiva, mostrando como a regra da mão direita fornece a direção de $\vec{n}$, que é perpendicular ao plano da espira. (c) Vista lateral da espira, mostrando o lado 2. A espira tende a girar da forma indicada.

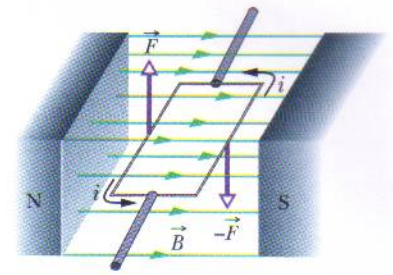


FIG. 28-21 Os elementos de um motor elétrico. Uma espira retangular de fio, percorrida por uma corrente e livre para girar em torno de um eixo, é submetida a um campo magnético. Forças magnéticas produzem um torque que faz girar a espira. Um comutador (que não aparece na figura) inverte o sentido da corrente a cada meia revolução para que o torque tenha sempre o mesmo sentido.

Suponha que a espira única seja substituída por uma *bobina* de N espiras. Suponha ainda que as espiras sejam enroladas tão juntas que se possa supor que todas têm aproximadamente as mesmas dimensões e estão no mesmo plano. Nesse caso, as espiras formam uma *bobina plana*, e um torque τ' com o módulo dado pela Eq. 28-32 age sobre cada uma delas. O módulo do torque total que age sobre a bobina é, portanto,

$$\tau = N\tau' = NiabB \sin \theta = (NiA)B \sin \theta, \quad (28-33)$$

onde $A (= ab)$ é a área limitada pela bobina. O produto entre parênteses (NiA) foi separado porque envolve as propriedades da bobina: o número de espiras, a corrente e a área. A Eq. 28-33 é válida qualquer que seja a forma geométrica da bobina plana, mas o campo magnético deve ser uniforme.

Em vez de acompanhar o movimento da bobina é mais simples tomar como referência o vetor $\vec{n}$, que é perpendicular ao plano da bobina. De acordo com a Eq. 28-33, uma bobina plana percorrida por corrente e submetida a um campo magnético uniforme tende a girar até que $\vec{n}$ fique alinhado com o campo. Nos motores, a corrente da bobina é invertida quando $\vec{n}$ está prestes a se alinhar com a direção do campo, de modo que um torque continua a fazer girar a bobina. Essa inversão automática da corrente é executada por um comutador situado entre a bobina e os contatos estacionários que a alimentam com corrente.

Exemplo 28-7

Os voltímetros e amperímetros analógicos funcionam medindo o torque exercido por um campo magnético sobre uma bobina percorrida por corrente. A leitura é feita através do movimento de um ponteiro ao longo de uma escala. A Fig. 28-23 mostra a estrutura de um *galvanômetro*, o dispositivo em que se baseiam tanto os amperímetros como os voltímetros analógicos. Suponha que a bobina tem 2,1 cm de altura e 1,2 cm de largura, possui 250 espiras e está montada de tal forma que pode girar em torno de um eixo (perpendicular ao papel) na presença de um campo *radial* uniforme de módulo $B = 0,23$ T. Para qualquer orientação da bobina o campo magnético que a atravessa é perpendicular ao vetor normal da bobina (e, portanto, paralelo ao plano da bobina). Uma mola M produz um contratorque que equilibra o torque magnético, de modo que uma corrente constante i na bobina resulta em uma deflexão angular constante ϕ . Quanto maior a corrente, maior a deflexão e, portanto, maior o torque que a mola precisa produzir. Se uma corrente de $100 \mu\text{A}$ produz uma deflexão angular de 28° , qual deve ser a constante de torção κ da mola, definida na Eq. 15-22 ($\tau = -\kappa\phi$)?

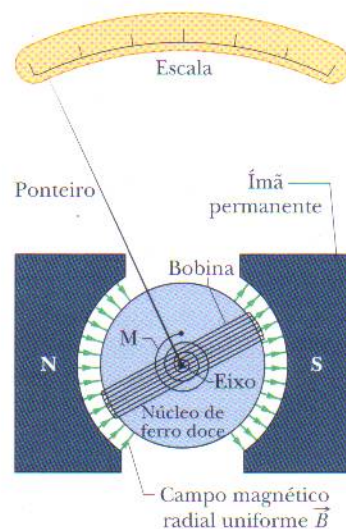


FIG. 28-23 Os elementos de um galvanômetro. Dependendo do circuito externo o instrumento pode funcionar como um voltímetro ou como um amperímetro.

IDÉIA-CHAVE

No caso de uma corrente constante, o torque magnético (Eq. 28-33) é equilibrado pelo torque da mola. Assim, os módulos dos dois torques devem ser iguais.

Cálculos: Este equilíbrio pode ser expresso através da equação

$$NiAB \sin \theta = \kappa\phi, \quad (28-34)$$

onde ϕ é a deflexão angular da bobina e do ponteiro e $A (= 2,52 \times 10^{-4} \text{ m}^2)$ é a área limitada pela bobina. Como o campo magnético que atravessa a bobina é sempre

perpendicular ao vetor normal à bobina, $\theta = 90^\circ$ para qualquer orientação do ponteiro. Explicitando κ na Eq. 28-34, obtemos:

$$\begin{aligned} \kappa &= \frac{NiAB \sin \theta}{\phi} \\ &= (250)(100 \times 10^{-6} \text{ A})(2,52 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \\ &\quad \times \frac{(0,23 \text{ T})(\sin 90^\circ)}{28^\circ} \\ &= 5,2 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{m/gra}^\circ. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

Muitos amperímetros e voltímetros modernos são do tipo digital e não utilizam uma bobina móvel.

28-10 | O Momento Magnético Dipolar

Como vimos, uma bobina percorrida por corrente sofre um torque ao ser submetida a um campo magnético. Sob esse aspecto a bobina se comporta exatamente como um ímã em forma de barra. Assim, como no caso de um ímã em forma de barra dizemos que uma bobina percorrida por corrente possui um *dipolo magnético*. Além disso, para descrever o torque exercido sobre a bobina por um campo magnético podemos associar um **momento magnético dipolar** $\vec{\mu}$ à bobina. A direção de $\vec{\mu}$ é a do vetor normal $\vec{n}$ e, portanto, é dada pela mesma regra da mão direita da Fig. 28-22: quando os dedos da mão direita apontam na direção da corrente na bobina o polegar estendido aponta na direção de $\vec{\mu}$. O módulo de $\vec{\mu}$ é dado por

$$\mu = NiA \quad (\text{momento magnético}), \quad (28-35)$$

onde N é o número de espiras da bobina, i é a corrente na bobina e A é a área limitada pelas espiras da bobina. A partir desta equação, com i em ampères e A em metros quadrados, vemos que a unidade de $\vec{\mu}$ no SI é o ampère-metro quadrado ($A \cdot m^2$).

Usando a definição de $\vec{\mu}$, a equação para o torque exercido por um campo magnético sobre uma bobina (Eq. 28-33) pode ser escrita na forma

$$\tau = \mu B \sin \theta, \quad (28-36)$$

onde θ é o ângulo entre os vetores $\vec{\mu}$ e $\vec{B}$.

Em forma vetorial, essa equação se torna

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}, \quad (28-37)$$

que se parece muito com a equação para o torque exercido por um campo *elétrico* sobre um dipolo *elétrico* (Eq. 22-34):

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}.$$

Nos dois casos o torque exercido pelo campo é igual ao produto vetorial do momento dipolar pelo campo.

Na presença de um campo magnético, um dipolo magnético possui uma **energia potencial magnética** que depende da orientação do momento dipolar em relação ao campo. No caso de dipolos elétricos, temos (Eq. 22-38):

$$U(\theta) = -\vec{p} \cdot \vec{E}.$$

Analogamente, podemos escrever, para o caso magnético,

$$U(\theta) = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}. \quad (28-38)$$

A energia de um dipolo magnético tem o menor valor possível ($= -\mu B \cos 0 = -\mu B$) quando o momento dipolar $\vec{\mu}$ está alinhado com o campo magnético (Fig. 28-24). A energia tem o maior valor possível ($= -\mu B \cos 180^\circ = +\mu B$) quando o momento dipolar e o campo magnético apontam em sentidos opostos. Analisando a Eq. 28-38, com U em joules e $\vec{B}$ em teslas, vemos que a unidade de $\vec{\mu}$ pode ser o joule por tesla (J/T) em vez do ampère-metro quadrado sugerido pela Eq. 28-35.

Quando um dipolo magnético submetido a um torque (produzido por um “agente externo”) gira de uma orientação inicial θ_i para uma orientação final θ_f o torque aplicado realiza um trabalho W_a sobre o dipolo. Se o dipolo permanece em repouso antes e depois da mudança de orientação, o trabalho W_a é dado por

$$W_a = U_f - U_i, \quad (28-39)$$

onde U_f e U_i são dadas pela Eq. 28-38.

Até agora, o único tipo de dipolo magnético que mencionamos foi o produzido por uma espira percorrida por corrente. Entretanto, um ímã em forma de barra e

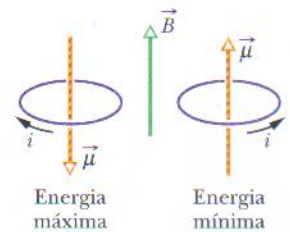


FIG. 28-24 Orientações de maior e menor energia de um dipolo magnético (no caso, uma bobina percorrida por corrente) na presença de um campo magnético externo $\vec{B}$. O sentido da corrente i determina o sentido do momento dipolar magnético $\vec{\mu}$ através da regra da mão direita mostrada para $\vec{n}$ na Fig. 28-22b.

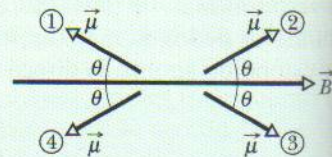
TABELA 28-2

Alguns Momentos Dipolares Magnéticos

Ímã pequeno	5 J/T
Terra	$8,0 \times 10^{22}$ J/T
Próton	$1,4 \times 10^{-26}$ J/T
Elétron	$9,3 \times 10^{-24}$ J/T

uma esfera carregada girando em torno do próprio eixo também produzem dipolos magnéticos. A própria Terra produz um dipolo magnético (aproximado). Finalmente, a maioria das partículas subatômicas, como o elétron, o próton e o nêutron, possui um momento dipolar magnético. Como vamos ver no Capítulo 32, todas essas entidades podem ser imaginadas como espiras percorridas por corrente. A Tabela 28-2 mostra os momentos magnéticos de alguns objetos.

TESTE 5 A figura mostra quatro orientações de um momento dipolar magnético $\vec{\mu}$ em relação a um campo magnético $\vec{B}$, definidas através de um ângulo θ . Coloque as orientações em ordem de acordo (a) com o módulo do torque exercido sobre o dipolo; (b) com a energia potencial do dipolo, começando pelo maior valor.



Exemplo 28-8

A Fig. 28-25 mostra uma bobina circular de 250 espiras, com uma área A de $2,52 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, percorrida por uma corrente de $100 \mu\text{A}$. A bobina está em repouso em um campo magnético uniforme de módulo $B = 0,85 \text{ T}$, com seu momento dipolar magnético $\vec{\mu}$ inicialmente alinhado com $\vec{B}$.

(a) Qual é o sentido da corrente na bobina da Fig. 28-25?

Regra da mão direita: Envolve a bobina com a mão direita, com o polegar estendido na direção de $\vec{\mu}$. Os dedos da mão vão apontar no da corrente. Assim, nos fios do lado mais próximo da bobina (aqueles que são visíveis na Fig. 28-25) o sentido da corrente é de cima para baixo.

(b) Que trabalho o torque aplicado por um agente externo teria que realizar sobre a bobina para fazê-la girar de 90° em relação à orientação inicial, isto é, para tornar $\vec{\mu}$ perpendicular a $\vec{B}$ com a bobina novamente em repouso?

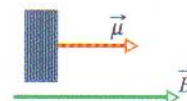


FIG. 28-25 Vista lateral de uma bobina circular percorrida por uma corrente e orientada de tal forma que o momento dipolar magnético $\vec{\mu}$ está alinhado com o campo magnético $\vec{B}$.

Cálculos: De acordo com a Eq. 28-39 ($W_a = U_f - U_i$), temos:

$$\begin{aligned} W_a &= U(90^\circ) - U(0^\circ) \\ &= -\mu B \cos 90^\circ - (-\mu B \cos 0^\circ) = 0 + \mu B \\ &= \mu B. \end{aligned}$$

Usando a Eq. 28-35 ($\mu = NiA$), obtemos:

$$\begin{aligned} W_a &= (NiA)B \\ &= (250)(100 \times 10^{-6} \text{ A})(2,52 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(0,85 \text{ T}) \\ &= 5,355 \times 10^{-6} \text{ J} \approx 5,4 \mu\text{J}. \end{aligned} \quad (\text{Resposta})$$

IDÉIA-CHAVE O trabalho W_a realizado pelo torque aplicado é igual à variação da energia potencial da bobina devido à mudança da orientação.

REVISÃO E RESUMO

Campo Magnético $\vec{B}$ O campo magnético $\vec{B}$ é definido em termos da força $\vec{F}_B$ que age sobre uma partícula de prova de carga q que está se movendo com velocidade $\vec{v}$ na presença do campo:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}. \quad (28-2)$$

A unidade de $\vec{B}$ no SI é o **tesla (T)**: $1 \text{ T} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m}) = 10^4 \text{ gauss}$.

O Efeito Hall Quando uma fita condutora de espessura l , percorrida por uma corrente i , é submetida a um campo magnético $\vec{B}$, alguns portadores de carga (de carga e) se acumulam em um dos lados da fita, criando uma diferença de potencial V entre os lados da fita. As polaridades dos lados indicam o sinal dos portadores

de carga; a concentração n dos portadores pode ser calculada através da equação

$$n = \frac{Bi}{Vle}. \quad (28-12)$$

Uma Partícula Carregada em Movimento Circular Uma partícula carregada de massa m e carga de valor absoluto $|q|$, que está se movendo com velocidade $\vec{v}$ perpendicularmente a um campo magnético uniforme $\vec{B}$, descreve uma trajetória circular. Aplicando a segunda lei de Newton ao movimento, temos:

$$|q|vB = \frac{mv^2}{r}, \quad (28-15)$$

e, portanto, o raio r da circunferência é dado por

$$r = \frac{mv}{|q|B}. \quad (28-16)$$

A frequência de revolução f , a frequência angular ω e o período do movimento T são dados por

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} = \frac{|q|B}{2\pi m}. \quad (28-19, 28-18, 28-17)$$

Força Magnética em um Fio Percorrido por Corrente

Um fio retilíneo percorrido por uma corrente i e submetido a um campo magnético uniforme experimenta uma força lateral

$$\vec{F}_B = i\vec{L} \times \vec{B}. \quad (28-26)$$

A força que age sobre um elemento de corrente $i dL$ na presença de um campo magnético B é dada por

$$d\vec{F}_B = i d\vec{L} \times \vec{B}. \quad (28-28)$$

O sentido do vetor comprimento $\vec{L}$ ou $d\vec{L}$ é o da corrente i .

Torque em uma Espira Percorrida por Corrente Uma bobina (de área A e N espiras, percorrida por uma corrente i) na presença de um campo magnético uniforme $\vec{B}$ experimenta um torque $\vec{\tau}$ dado por

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}, \quad (28-37)$$

onde $\vec{\mu}$ é o **momento magnético dipolar** da bobina, de módulo $\mu = NiA$, cuja direção é dada pela regra da mão direita.

Energia Potencial de um Dipolo Magnético A energia potencial magnética de um dipolo magnético na presença de um campo magnético é dada por

$$U(\theta) = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}. \quad (28-38)$$

Se um agente externo faz um dipolo magnético girar de uma orientação inicial θ_i para uma orientação final θ_f , e se o dipolo permanece estacionário antes e depois da mudança de orientação, o trabalho W_a realizado pelo campo magnético sobre o dipolo é dado por

$$W_a = \Delta U = U_f - U_i. \quad (28-39)$$

PERGUNTAS

1 Na Seção 28-4 discutimos o movimento de uma partícula carregada na presença de campos cruzados, com as forças $\vec{F}_E$ e $\vec{F}_B$ em oposição. Vimos que a partícula se move em linha reta (ou seja, as duas forças se equilibram) se a velocidade é dada pela Eq. 28-7 ($v = E/B$). Qual das duas forças é maior se a velocidade da partícula é (a) $v < E/B$ e (b) $v > E/B$?

2 A Fig. 28-26 mostra um fio percorrido por corrente na presença de um campo magnético uniforme. Também mostra quatro orientações possíveis para o campo. (a) Coloque as direções na ordem do módulo da diferença de potencial elétrico entre os lados do fio, começando pela maior. (b) Para que orientação do campo magnético o lado de cima do fio está a um potencial mais alto que o lado de baixo?

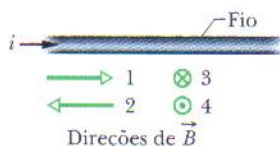


FIG. 28-26 Pergunta 2.

3 A Fig. 28-27 mostra três situações nas quais uma partícula positivamente carregada se move com velocidade $\vec{v}$ na presença de um campo magnético uniforme $\vec{B}$ e experimenta uma força magnética $\vec{F}_B$. Em cada situação, determine se as orientações dos vetores são fisicamente razoáveis.

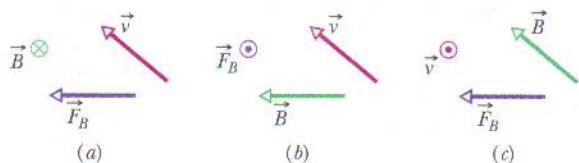


FIG. 28-27 Pergunta 3.

4 A Fig. 28-28 mostra campos elétricos e magnéticos uniformes cruzados $\vec{E}$ e $\vec{B}$ e, em um certo instante, os vetores velocidade das 10 partículas carregadas que aparecem na Tabela 28-3. (Os vetores não estão desenhados em escala.) As velocidades dadas na tabela são menores ou maiores que E/B (veja a Pergunta 1). Que partículas se movem para fora do papel, em direção ao leitor, após o instante mostrado na Fig. 28-28?

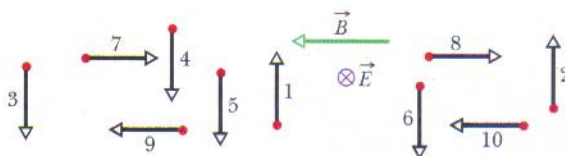


FIG. 28-28 Pergunta 4.

TABELA 28-3

Pergunta 4

Partícula	Carga	Velocidade	Partícula	Carga	Velocidade
1	+	Menor	6	-	Maior
2	+	Maior	7	+	Menor
3	+	Menor	8	+	Maior
4	+	Maior	9	-	Menor
5	-	Menor	10	-	Maior

5 A Fig. 28-29 mostra um paralelepípedo metálico que se move com uma certa velocidade v na presença de um campo magnético uniforme $\vec{B}$. As dimensões do sólido são múltiplos de d , como mostra a figura. Existem seis possibilidades para a orientação da velocidade: o sentido positivo ou o sentido negativo dos eixos x , y e z . (a) Coloque as seis possibilidades na ordem da diferença de potencial a que o sólido é submetido, começando pelo maior va-

lor. (b) Para que orientação a face dianteira é submetida ao menor potencial?

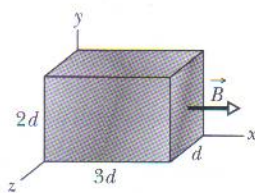


FIG. 28-29 Pergunta 5.

6 A Fig. 28-30 mostra a trajetória de uma partícula que passa por seis regiões de campo magnético uniforme, descrevendo trajetórias que são semicircunferências ou quartos de circunferência. Depois de sair da última região a partícula passa entre duas placas paralelas eletricamente carregadas e é desviada na direção da placa de maior potencial. Qual é a orientação do campo magnético em cada uma das seis regiões?

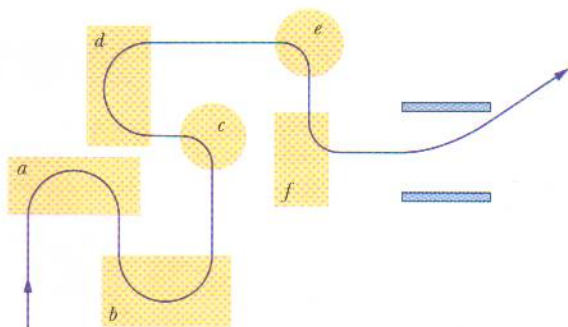


FIG. 28-30 Pergunta 6.

7 Na Fig. 28-31 uma partícula carregada entra com velocidade escalar v_0 em uma região onde existe um campo magnético uniforme $\vec{B}$, descreve uma semicircunferência em um intervalo de tempo T_0 e deixa a região. (a) A carga da partícula é positiva ou negativa? (b) A velocidade final da partícula é maior, menor ou igual a v_0 ? (c) Se a velocidade inicial fosse $0,5v_0$, a partícula passaria um tempo maior, menor ou igual a T_0 na região onde existe campo magnético? (d) Na situação do item (c) a trajetória seria uma semicircunferência, um arco maior que uma semicircunferência ou um arco menor que uma semicircunferência?

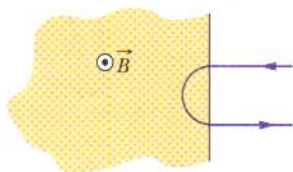


FIG. 28-31 Pergunta 7.

8 *Rotatória de partículas.* A Fig. 28-32 mostra 11 trajetórias em uma região onde existe um campo magnético uniforme. Uma trajetória é retilínea e as outras são semicircunferências. A Tabela 28-4 mostra as massas, cargas e velocidades das 11 partículas. Associe as trajetórias das figuras às partículas da tabela.

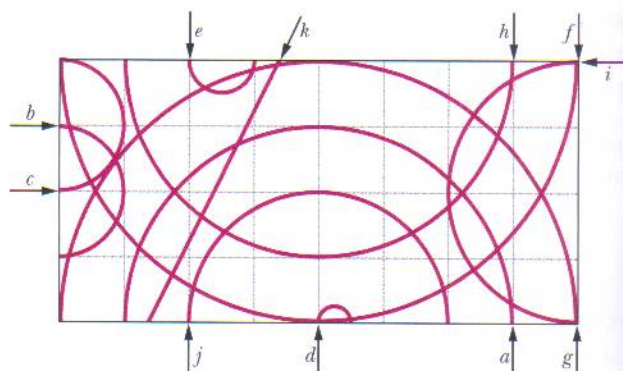


FIG. 28-32 Pergunta 8.

TABELA 28-4

Pergunta 8

Partícula	Massa	Carga	Velocidade
1	$2m$	q	v
2	m	$2q$	v
3	$m/2$	q	$2v$
4	$3m$	$3q$	$3v$
5	$2m$	q	$2v$
6	m	$-q$	$2v$
7	m	$-4q$	v
8	m	$-q$	v
9	$2m$	$-2q$	$3v$
10	m	$-2q$	$8v$
11	$3m$	0	$3v$

9 A Fig. 28-33 mostra a trajetória de um elétron que passa por duas regiões onde existem campos magnéticos uniformes de módulos B_1 e B_2 . A trajetória nas duas regiões é uma semicircunferência. (a) Qual dos dois campos é mais intenso? (b) Qual é a orientação de cada campo? (c) O tempo que o elétron passa na região de campo $\vec{B}_1$ é maior, menor ou igual ao tempo que passa na região de campo $\vec{B}_2$?

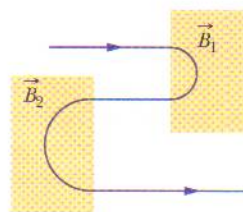


FIG. 28-33 Pergunta 9.

10 A Fig. 28-34 mostra a trajetória de um elétron em uma região na qual o campo magnético é uniforme. A trajetória é constituída por dois trechos retilíneos, entre duas placas uniformemente carregadas, e duas semicircunferências. Que placa possui um maior potencial elétrico (a) das duas de cima e (b) das duas de baixo? (c) Qual é a orientação do campo magnético?

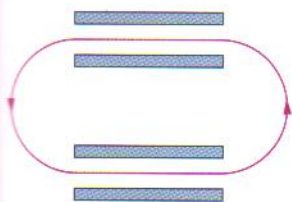


FIG. 28-34 Pergunta 10.

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 28-3 A Definição de $\vec{B}$

•1 Um elétron com uma velocidade

$$\vec{v} = (2,0 \times 10^6 \text{ m/s})\hat{i} + (3,0 \times 10^6 \text{ m/s})\hat{j}$$

está se movendo em uma região onde existe um campo magnético uniforme $\vec{B} = (0,030 \text{ T})\hat{i} - (0,15 \text{ T})\hat{j}$. (a) Determine a força que age sobre o elétron. (b) Repita o cálculo para um próton com a mesma velocidade.

•2 Uma partícula alfa se move com uma velocidade $\vec{v}$ de módulo 550 m/s em uma região onde existe um campo magnético $\vec{B}$ de módulo 0,045 T. (Uma partícula alfa possui uma carga de $+3,2 \times 10^{-19} \text{ C}$ e uma massa de $6,6 \times 10^{-27} \text{ kg}$.) O ângulo entre $\vec{v}$ e $\vec{B}$ é 52° . Determine (a) o módulo da força $\vec{F}_B$ que o campo magnético exerce sobre a partícula; (b) a aceleração da partícula causada por $\vec{F}_B$. (c) A velocidade da partícula aumenta, diminui ou permanece constante?

•3 Um próton cuja trajetória faz um ângulo de 23° com a direção de um campo magnético de 2,60 mT experimenta uma força magnética de $6,50 \times 10^{-17} \text{ N}$. Calcule (a) a velocidade do próton; (b) a energia cinética do próton em elétrons-volts.

•4 Uma partícula com uma massa de 10 g e uma carga de $80 \mu\text{C}$ se move em uma região onde existe um campo magnético uniforme e a aceleração da gravidade é $-9,8\hat{j} \text{ m/s}^2$. A velocidade da partícula é constante e igual a $20\hat{i} \text{ km/s}$, perpendicular ao campo magnético. Qual é o campo magnético?

••5 Um elétron se move em uma região onde existe um campo magnético uniforme dado por $\vec{B} = B_x\hat{i} + (3,0B_x)\hat{j}$. Em um certo instante o elétron tem uma velocidade $\vec{v} = (2,0\hat{i} + 4,0\hat{j}) \text{ m/s}$ e a força magnética que age sobre a partícula é $(6,4 \times 10^{-19} \text{ N})\hat{k}$. Determine B_x .

••6 Um próton está se movendo em uma região onde existe um campo magnético uniforme dado por $\vec{B} = (10\hat{i} - 20\hat{j} + 30\hat{k}) \text{ mT}$. No instante t_1 o próton possui uma velocidade dada por $\vec{v} = v_x\hat{i} + v_y\hat{j} + (2,0 \text{ km/s})\hat{k}$ e a força magnética que age sobre o próton é $\vec{F}_B = (4,0 \times 10^{-17} \text{ N})\hat{i} + (2,0 \times 10^{-17} \text{ N})\hat{j}$. Nesse instante, quais são os valores (a) de v_x ; (b) de v_y ?

seção 28-4 Campos Cruzados: A Descoberta do Elétron

•7 Na Fig. 28-35 um elétron acelerado a partir do repouso por uma diferença de potencial $V_1 = 1,00 \text{ kV}$ entra no espaço entre duas placas paralelas, separadas por uma distância $d = 20,0 \text{ mm}$, entre as quais existe uma diferença de potencial $V_2 = 100 \text{ V}$. A placa inferior está a um potencial menor. Despreze o efeito de borda e suponha que o vetor velocidade do elétron é perpendicular ao vetor campo elétrico na região entre as placas. Em termos dos vetores unitários, qual é o campo magnético uniforme para o qual a trajetória do elétron na região entre as placas é retilínea?

11 (a) No Teste 5, se um agente externo faz o momento dipolar $\vec{\mu}$ girar da orientação 2 para a orientação 1, o trabalho realizado pelo agente externo sobre o dipolo é positivo, negativo ou nulo? (b) Coloque na ordem o trabalho realizado pelo agente externo sobre o dipolo para essas três rotações, começando pelo maior: $2 \rightarrow 1$, $2 \rightarrow 4$, $2 \rightarrow 3$.



FIG. 28-35 Problema 7.

•8 Um campo elétrico de 1,50 kV/m e um campo magnético perpendicular de 0,400 T agem sobre um elétron em movimento sem acelerá-lo. Qual é a velocidade do elétron?

•9 Um elétron possui uma velocidade inicial de $(12,0\hat{j} + 15,0\hat{k}) \text{ km/s}$ e uma aceleração constante de $(2,00 \times 10^{12} \text{ m/s}^2)\hat{i}$ em uma região na qual existem um campo elétrico e um campo magnético, ambos uniformes. Se $\vec{B} = (400 \mu\text{T})\hat{i}$, determine o campo elétrico $\vec{E}$.

••10 Um próton está se movendo em uma região onde existem um campo magnético e um campo elétrico, ambos uniformes. O campo magnético é $\vec{B} = -2,50\hat{i} \text{ mT}$. Em um certo instante, a velocidade do próton é $\vec{v} = 2000\hat{j} \text{ m/s}$. Nesse instante, em termos dos vetores unitários, qual é a força que age sobre o próton se o campo magnético é (a) $4,00\hat{k} \text{ V/m}$; (b) $-4,00\hat{k} \text{ V/m}$; (c) $4,00\hat{i} \text{ V/m}$?

••11 Uma fonte de íons está produzindo íons de ${}^6\text{Li}$, que possuem carga $+e$ e massa $9,99 \times 10^{-27} \text{ kg}$. Os íons são acelerados por uma diferença de potencial de 10 kV e passam horizontalmente em uma região onde existe um campo magnético uniforme vertical de módulo $B = 1,2 \text{ T}$. Calcule a intensidade do menor campo elétrico que, aplicado na mesma região, permite que os íons de ${}^6\text{Li}$ atravessem a região sem sofrer nenhum desvio.

•••12 No instante t_1 , um elétron que está se movendo no sentido positivo do eixo x penetra em uma região onde existem um campo elétrico $\vec{E}$ e um campo magnético $\vec{B}$, com $\vec{E}$ paralelo ao eixo y . A Fig. 28-36 mostra a componente y da força total $F_{\text{tot},y}$ exercida pelos dois campos sobre o elétron em função da velocidade v do elétron no instante t_1 . A escala do eixo horizontal é definida por $v_s = 100,0 \text{ m/s}$. As componentes x e z da força total são zero no instante t_1 . Supondo que $B_x = 0$, determine (a) o módulo E do campo elétrico; (b) o campo magnético $\vec{B}$ em termos dos vetores unitários.

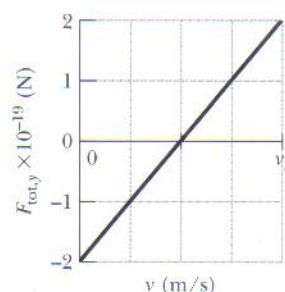


FIG. 28-36 Problema 12.

seção 28-5 Campos Cruzados: O Efeito Hall

•13 Uma fita de cobre com $150\ \mu\text{m}$ de espessura e $4,5\ \text{mm}$ de largura é submetida a um campo magnético uniforme $\vec{B}$ de módulo $0,65\ \text{T}$, com $\vec{B}$ perpendicular à fita. Quando uma corrente $i = 23\ \text{A}$ atravessa a fita, uma diferença de potencial V aparece entre suas bordas. Calcule V . (A concentração de portadores de carga no cobre é $8,47 \times 10^{28}$ elétrons/ m^3 .)

•14 Uma fita metálica com $6,50\ \text{cm}$ de comprimento, $0,850\ \text{cm}$ de largura e $0,760\ \text{mm}$ de espessura está se movendo com velocidade constante $\vec{v}$ em uma região onde existe um campo magnético uniforme $B = 1,20\ \text{mT}$ perpendicular à fita, como na Fig. 28-37. A diferença de potencial entre os pontos x e y da fita é $3,90\ \mu\text{V}$. Determine a velocidade escalar v .

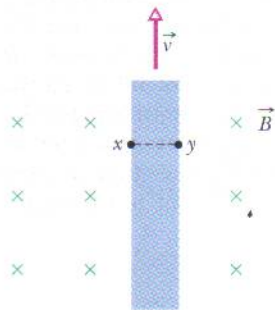


FIG. 28-37 Problema 14.

••15 Na Fig. 28-38 um paralelepípedo metálico de dimensões $d_x = 5,00\ \text{m}$, $d_y = 3,00\ \text{m}$ e $d_z = 2,00\ \text{m}$ está se movendo com velocidade constante $\vec{v} = (20,0\ \text{m/s})\hat{i}$ em uma região onde existe um campo magnético uniforme $\vec{B} = (30,0\ \text{mT})\hat{j}$. Determine (a) o campo elétrico no interior do objeto, em termos dos vetores unitários; (b) a diferença de potencial entre as extremidades do objeto.

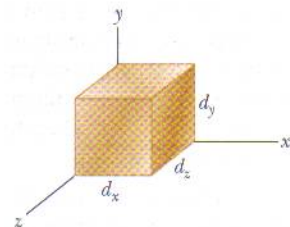


FIG. 28-38 Problemas 15 e 16.

•••16 A Fig. 28-38 mostra um paralelepípedo metálico com as faces paralelas aos eixos coordenados. O objeto está imerso em um campo magnético uniforme de módulo $0,020\ \text{T}$. Uma das arestas do objeto, que não está desenhado em escala, mede $25\ \text{cm}$. O objeto é deslocado a uma velocidade de $3,0\ \text{m/s}$, paralelamente aos eixos x , y e z , e a diferença de potencial V que aparece entre as faces do objeto é medida. Quando o objeto se desloca paralelamente ao eixo y , $V = 12\ \text{mV}$; quando o objeto se desloca paralelamente ao eixo z , $V = 18\ \text{mV}$; quando o objeto se desloca paralelamente ao eixo x , $V = 0$. Determine as dimensões (a) d_x ; (b) d_y e (c) d_z do objeto.

seção 28-6 Uma Partícula Carregada em Movimento Circular

•17 Um elétron de energia cinética $1,20\ \text{keV}$ descreve uma trajetória circular em um plano perpendicular a um campo magnético uniforme. O raio da órbita é $25,0\ \text{cm}$. Determine (a) a velocidade escalar do elétron; (b) o módulo do campo magnético; (c) a frequência de revolução; (d) o período do movimento.

•18 Um elétron é acelerado a partir do repouso por uma diferença de potencial de $350\ \text{V}$. Em seguida o elétron entra em uma região onde existe um campo magnético uniforme de módulo $200\ \text{mT}$ com uma velocidade perpendicular ao campo. Calcule (a) a velocidade escalar do elétron; (b) o raio da trajetória do elétron na região onde existe campo magnético.

•19 Qual é o valor do campo magnético uniforme, aplicado perpendicularmente a um feixe de elétrons que se movem com uma velocidade de $1,30 \times 10^6\ \text{m/s}$, que faz com que a trajetória dos elétrons seja um arco de circunferência com $0,350\ \text{m}$ de raio?

•20 Em um experimento de física nuclear, um próton com uma energia cinética de $1,0\ \text{MeV}$ descreve uma trajetória circular em um campo magnético uniforme. Qual deve ser a energia (a) de uma partícula alfa ($q = +2e$, $m = 4,0\ \text{u}$) e (b) de um deuteron ($q = +e$, $m = 2,0\ \text{u}$) para que a trajetória da partícula seja igual à do próton?

•21 (a) Determine a frequência de revolução de um elétron com uma energia de $100\ \text{eV}$ em um campo magnético uniforme de módulo $35,0\ \mu\text{T}$. (b) Calcule o raio da trajetória do elétron se sua velocidade é perpendicular ao campo magnético.

•22 Um elétron é acelerado a partir do repouso por uma diferença de potencial V e em seguida entra em uma região onde existe um campo magnético uniforme, que o faz descrever um movimento circular uniforme. A Fig. 28-39 mostra o raio r da trajetória circular do elétron em função de $V^{1/2}$. A escala do eixo vertical é definida por $r_s = 3,00\ \text{mm}$, e a escala do eixo horizontal é definida por $V_s^{1/2} = 40,0\ \text{V}^{1/2}$. Qual é o módulo do campo magnético?

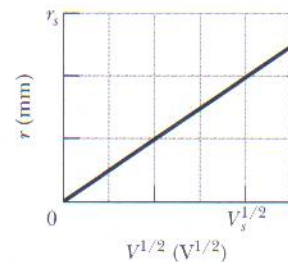


FIG. 28-39 Problema 22.

•23 Uma certa partícula penetra em uma região onde existe um campo magnético uniforme, com o vetor velocidade da partícula perpendicular à direção do campo. A Fig. 28-40 mostra o período T do movimento da partícula em função do recíproco do módulo B do campo. A escala do eixo vertical é definida por $T_s = 40,0\ \text{ns}$, e a escala do eixo horizontal é definida por $B_s^{-1} = 5,0\ \text{T}^{-1}$. Qual é a razão m/q entre a massa da partícula e o valor absoluto da carga?

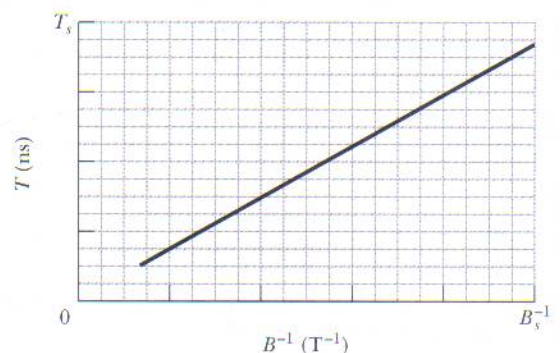


FIG. 28-40 Problema 23.

- 24 Na Fig. 28-41 uma partícula descreve uma trajetória circular em uma região onde existe um campo magnético uniforme de módulo $B = 4,00$ mT. A partícula é um próton ou um elétron (a identidade da partícula faz parte do problema) e está sujeita uma força magnética de módulo $3,20 \times 10^{-15}$ N. Determine (a) a velocidade escalar da partícula; (b) o raio da trajetória; (c) o período do movimento.

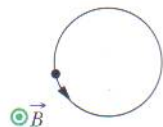


FIG. 28-41 Problema 24.

- 25 Uma partícula alfa ($q = +2e$, $m = 4,00$ u) descreve uma trajetória circular de $4,50$ cm de raio em uma região onde existe um campo magnético uniforme de módulo $B = 1,20$ T. Determine (a) a velocidade escalar da partícula; (b) o período de revolução; (c) a energia cinética; (d) a diferença de potencial necessária para que a partícula atinja a energia do item (c).

- 26 Uma partícula descreve um movimento circular uniforme com $26,1$ μ m de raio em um campo magnético uniforme. O módulo da força magnética experimentada pela partícula é $1,60 \times 10^{-17}$ N. Qual é a energia cinética da partícula?

- 27 Um elétron descreve uma trajetória helicoidal em um campo magnético uniforme de módulo $0,300$ T. O passo da hélice é $6,00$ μ m, e o módulo da força magnética experimentada pelo elétron é $2,00 \times 10^{-15}$ N. Qual é a velocidade do elétron?

- 28 Na Fig. 28-42 uma partícula carregada penetra em uma região onde existe um campo magnético uniforme $\vec{B}$, descreve uma semicircunferência e deixa a região. A partícula, que pode ser um próton ou um elétron (a identidade da partícula faz parte do problema), passa 130 ns na região. (a) Qual é o módulo de $\vec{B}$? (b) Se a partícula é enviada de volta para a região onde existe campo magnético com uma energia duas vezes maior, quanto tempo passa nessa região?

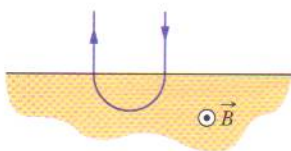


FIG. 28-42 Problema 28.

- 29 Um pósitron com uma energia cinética de $2,00$ keV penetra em uma região onde existe um campo magnético uniforme $\vec{B}$ de módulo $0,100$ T. O vetor velocidade da partícula faz um ângulo de $89,0^\circ$ com $\vec{B}$. Determine (a) o período do movimento; (b) o passo p ; (c) o raio r da trajetória helicoidal.

- 30 Um elétron descreve uma trajetória helicoidal na presença de um campo magnético uniforme dado por $\vec{B} = (20\hat{i} - 50\hat{j} - 30\hat{k})$ mT. No instante $t = 0$ a velocidade do elétron é dada por $\vec{v} = (20\hat{i} - 30\hat{j} + 50\hat{k})$ m/s. (a) Qual é o ângulo ϕ entre $\vec{v}$ e $\vec{B}$? A velocidade do elétron varia com o tempo. (b) A velocidade escalar varia com o tempo? (c) O ângulo ϕ varia com o tempo? (d) Qual é o raio da trajetória?

- 31 Um certo espectrômetro de massa comercial (veja o Exemplo 28-3) é usado para separar íons de urânio de massa

$3,92 \times 10^{-25}$ kg e carga $3,20 \times 10^{-19}$ C de íons semelhantes. Os íons são submetidos a uma diferença de potencial de 100 kV e depois a um campo magnético uniforme que os faz descrever um arco de circunferência com $1,00$ m de raio. Depois de sofrer um desvio de 180° e passar por uma fenda com $1,00$ mm de largura e $1,00$ cm de altura, são recolhidos em um reservatório. (a) Qual é o módulo do campo magnético (perpendicular) do separador? Se o aparelho é usado para separar 100 mg de material por hora, calcule (b) a corrente dos íons selecionados pelo aparelho e (c) a energia térmica produzida no reservatório em $1,00$ h.

- 32 Na Fig. 28-43 um elétron com uma energia cinética inicial de $4,0$ keV penetra na região 1 no instante $t = 0$. Nessa região existe um campo magnético uniforme dirigido para dentro do papel, de módulo $0,010$ T. O elétron descreve uma semicircunferência e deixa a região 1, dirigindo-se para a região 2, situada a $25,0$ cm de distância da região 1. Existe uma diferença de potencial $\Delta V = 2000$ V entre as duas regiões, com uma polaridade tal que a velocidade do elétron aumenta no percurso entre a região 1 e a região 2. Na região 2 existe um campo magnético uniforme dirigido para fora do papel, de módulo $0,020$ T. O elétron descreve uma semicircunferência e deixa a região 2. Determine o instante t em que isso acontece.

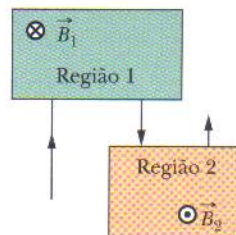


FIG. 28-43 Problema 32.

- 33 Uma certa partícula subatômica decai em um elétron e um pósitron. Suponha que no instante do decaimento a partícula está em repouso em um campo magnético uniforme $\vec{B}$, de módulo $3,53$ mT, e que as trajetórias do elétron e do pósitron resultantes do decaimento estão em um plano perpendicular a $\vec{B}$. Quanto tempo após o decaimento o elétron e o pósitron se chocam?

- 34 Uma fonte injeta um elétron de velocidade $v = 1,5 \times 10^7$ m/s em uma região onde existe um campo magnético uniforme de módulo $B = 1,0 \times 10^{-3}$ T. A velocidade do elétron faz um ângulo $\theta = 10^\circ$ com a direção do campo magnético. Determine a distância d entre o ponto de injeção e o ponto em que o elétron cruza novamente a linha de campo que passa pelo ponto de injeção.

seção 28-7 Ciclotrons e Síncrotrons

- 35 Estime a distância total percorrida por um dêuteron no ciclotron do Exemplo 28-5 durante o processo de aceleração. Suponha que a diferença de potencial entre os dês é 80 kV.

- 36 Em um certo ciclotron, um próton descreve uma circunferência de $0,500$ m de raio. O módulo do campo magnético é $1,20$ T. (a) Qual é a frequência do oscilador? (b) Qual é energia cinética do próton em elétrons-volts?

- 37 Um próton circula em um ciclotron depois de partir aproximadamente do repouso no centro do aparelho. No momento em que passa pelo espaço entre os dês a diferença de potencial entre os dês é 200 V. (a) Qual é o aumento da energia cinética cada vez que o próton passa no espaço entre os dês? (b) Qual é a energia cinética do próton depois de passar 100 vezes pelo espaço entre os dês? Seja r_{100} o raio da trajetória circular do próton no

momento em que completa as 100 passagens e entra em um dê, e seja r_{101} o raio após a passagem seguinte. (c) Qual é o aumento percentual do raio de r_{100} para r_{101} , ou seja, qual é o valor de

$$\text{aumento percentual} = \frac{r_{101} - r_{100}}{r_{100}} 100\%?$$

••38 Um ciclotron no qual o raio dos dês é 53,0 cm é operado a uma frequência de 12,0 MHz para acelerar prótons. (a) Qual deve ser o módulo B do campo magnético para que haja ressonância? (b) Para este valor do campo, qual é a energia cinética dos prótons que saem do ciclotron? Suponha que o campo seja mudado para 1,57 T. (c) Qual deve ser a nova frequência do oscilador para que haja ressonância? (d) Para este valor da frequência, qual é a energia cinética dos prótons que saem do ciclotron?

seção 28-8 Força Magnética em um Fio Percorrido por Corrente

•39 Um fio com 13,0 g de massa e $L = 62,0$ cm de comprimento está suspenso por um par de contatos flexíveis na presença de um campo magnético uniforme de módulo 0,440 T (Fig. 28-44). Determine (a) o valor absoluto e (b) o sentido (para a direita ou para a esquerda) da corrente necessária para remover a tensão dos contatos.

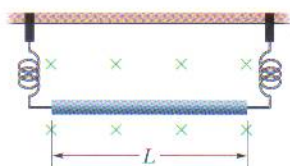


FIG. 28-44 Problema 39.

•40 O fio dobrado da Fig. 28-45 está submetido a um campo magnético uniforme. Cada trecho retilíneo tem 2,0 m de comprimento e faz um ângulo $\theta = 60^\circ$ com o eixo x . O fio é percorrido por uma corrente de 2,0 A. Qual é a força que o campo magnético exerce sobre o fio, em termos dos vetores unitários, se o campo magnético é (a) $4,0\hat{k}$ T; (b) $4,0\hat{i}$ T?

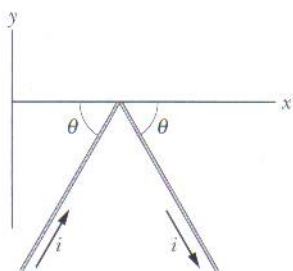


FIG. 28-45 Problema 40.

•41 Uma linha de transmissão horizontal é percorrida por uma corrente de 5000 A no sentido sul-norte. O campo magnético da Terra ($60,0 \mu\text{T}$) tem a direção norte e faz um ângulo de $70,0^\circ$ com a horizontal. Determine (a) o módulo e (b) a direção da força magnética exercida pelo campo magnético da Terra sobre 100 m da linha.

•42 Um fio de 1,80 m de comprimento é percorrido por uma corrente de 13,0 A e faz um ângulo de $35,0^\circ$ com um campo magnético uniforme de módulo $B = 1,50$ T. Calcule a força magnética exercida pelo campo sobre o fio.

••43 Um fio de 50,0 cm de comprimento é percorrido por uma corrente de 0,500 A no sentido positivo do eixo x na presença de um campo magnético $\vec{B} = (3,00 \text{ mT})\hat{j} + (10,0 \text{ mT})\hat{k}$. Em termos dos vetores unitários, qual é a força que o campo magnético exerce sobre o fio?

••44 Na Fig. 28-46 um fio metálico de massa $m = 24,1$ mg pode deslizar com atrito insignificante sobre dois trilhos paralelos horizontais separados por uma distância $d = 2,56$ cm. O conjunto está em uma região onde existe um campo magnético uniforme de módulo 56,3 mT. No instante $t = 0$ um gerador G é ligado aos trilhos e produz uma corrente constante $i = 9,13$ mA no fio e nos trilhos (mesmo quando o fio está se movendo). No instante $t = 61,1$ ms, determine (a) a velocidade escalar do fio; (b) o sentido do movimento do fio (para a esquerda ou para a direita).

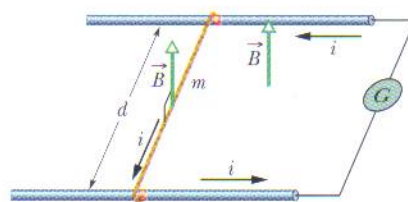


FIG. 28-46 Problema 44.

••45 Uma barra de cobre de 1,0 kg repousa em dois trilhos horizontais situados a 1,0 m de distância um do outro e é percorrida por uma corrente de 50 A. O coeficiente de atrito estático entre a barra e os trilhos é 0,60. Determine (a) o módulo e (b) o ângulo (em relação à vertical) do menor campo magnético que faz a barra se mover.

••46 Um condutor longo, rígido, retilíneo, situado sobre o eixo x , é percorrido por uma corrente de 5,0 A no sentido negativo do eixo x . Um campo magnético $\vec{B}$ está presente, dado por $\vec{B} = 3,0\hat{i} + 8,0x^2\hat{j}$, com x em metros e $\vec{B}$ em militeslas. Determine, em termos dos vetores unitários, a força exercida pelo campo sobre o segmento de 2,0 m do condutor entre os pontos $x = 1,0$ m e $x = 3,0$ m.

seção 28-9 Torque em uma Espira Percorrida por Corrente

•47 A Fig. 28-47 mostra uma bobina retangular de cobre, de 20 espiras, com 10 cm de altura e 5 cm de largura. A bobina conduz uma corrente de 0,10 A e dispõe de uma dobradiça em um dos lados verticais. Está montada no plano xy , fazendo um ângulo $\theta = 30^\circ$ com a direção de um campo magnético uniforme de módulo 0,50 T. Em termos dos vetores unitários, qual é o torque que o campo exerce sobre a bobina em relação à dobradiça?

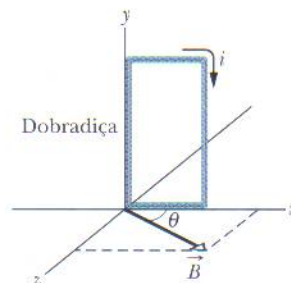


FIG. 28-47 Problema 47.

•48 Uma bobina de uma espira, percorrida por uma corrente de 4,00 A, tem a forma de um triângulo retângulo cujos lados medem 50,0, 120 e 130 cm. A bobina é submetida a um campo magnético uniforme de módulo 75,0 mT paralelo à corrente no lado de 130 cm. Determine o módulo da força magnética (a) no lado de 130 cm; (b) no lado de 50,0 cm; (c) no lado de 120 cm. (d) Determine a força total que o campo magnético exerce sobre a espira.

•49 A Fig. 28-48 mostra um anel circular de fio com um raio $a = 1,8$ cm, submetido a um campo magnético divergente de simetria radial. O campo magnético em todos os pontos do anel tem o mesmo módulo $B = 3,4$ mT, é perpendicular ao anel e faz um ângulo $\theta = 20^\circ$ com a normal ao plano do anel. A influência dos fios de alimentação da espira pode ser desprezada. Determine o módulo da força que o campo exerce sobre a espira se a corrente na espira é $i = 4,6$ mA.

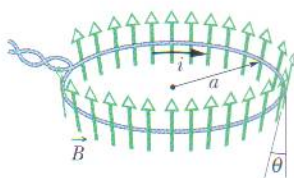


FIG. 28-48 Problema 49.

•50 Na Fig. 28-49 uma bobina retangular percorrida por corrente está no plano de um campo magnético uniforme de módulo 0,040 T. A bobina é formada por uma única espira de fio flexível enrolado em um suporte flexível que permite mudar as dimensões do retângulo. (O comprimento total do fio permanece inalterado.) Quando o comprimento x de um dos lados do retângulo varia de aproximadamente zero para o valor máximo de aproximadamente 4,0 cm, o módulo τ do torque passa por um valor máximo de $4,80 \times 10^{-8}$ N · m. Qual é a corrente na bobina?

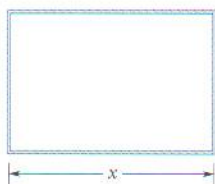


FIG. 28-49 Problema 50.

•51 A bobina de um certo galvanômetro (veja o Exemplo 28-7) tem uma resistência de 75,3 Ω ; o ponteiro chega ao final da escala quando uma corrente de 1,62 mA atravessa a bobina. (a) Determine o valor da resistência auxiliar necessária para converter o galvanômetro em um voltímetro que indique uma tensão máxima de 1,00 V. (b) A resistência do item (a) deve ser ligada em série ou em paralelo com o galvanômetro? (c) Determine o valor da resistência auxiliar necessária para converter o galvanômetro em um amperímetro que indique uma corrente máxima de 50,0 mA. (d) A resistência do item (c) deve ser ligada em série ou em paralelo?

•52 Um elétron se move em um círculo de raio $r = 5,29 \times 10^{-11}$ m com uma velocidade de $2,19 \times 10^6$ m/s. Trate a trajetória circular como uma espira percorrida por uma corrente constante igual à razão entre a carga do elétron e o período do movimen-

to. Se a trajetória do elétron está em uma região onde existe um campo magnético uniforme de módulo $B = 7,10$ mT, qual é o maior valor possível do módulo do torque aplicado pelo campo à espira?

•53 A Fig. 28-50 mostra um cilindro de madeira de massa $m = 0,250$ kg e comprimento $L = 0,100$ m, com $N = 10,0$ espiras de fio enroladas longitudinalmente para formar uma bobina; o plano da bobina passa pelo eixo do cilindro. O cilindro é liberado a partir do repouso em um plano inclinado que faz um ângulo θ com a horizontal, com o plano da bobina paralelo ao plano inclinado. Se o conjunto é submetido a um campo magnético uniforme de módulo 0,500 T, qual é a menor corrente i na bobina que impede que o cilindro entre em movimento?

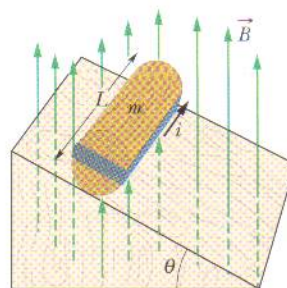


FIG. 28-50 Problema 53.

seção 28-10 O Momento Magnético Dipolar

•54 Uma bobina circular de 15,0 cm de raio conduz uma corrente de 2,60 A. A normal ao plano da bobina faz um ângulo de $41,0^\circ$ com um campo magnético uniforme de módulo 12,0 T. (a) Calcule o módulo do momento dipolar magnético da bobina. (b) Qual é o módulo do torque que age sobre a bobina?

•55 Uma bobina circular de 160 espiras tem um raio de 1,90 cm. (a) Calcule a corrente que resulta em um momento dipolar magnético de módulo $2,30$ A · m². (b) Determine o valor máximo do torque a que a bobina é submetida quando, sendo percorrida por essa corrente, é colocada na presença de um campo magnético uniforme de módulo 35,0 mT.

•56 O módulo de momento dipolar magnético da Terra é $8,00 \times 10^{22}$ J/T. Suponha que esse momento é produzido por cargas que circulam na parte externa do núcleo da Terra. Se o raio da trajetória dessas cargas é 3500 km, calcule a corrente associada.

•57 Uma bobina que conduz uma corrente de 5,0 A tem a forma de um triângulo retângulo cujos lados medem 30, 40 e 50 cm. A bobina é submetida a um campo magnético uniforme de módulo 80 mT paralelo à corrente no lado de 50 cm da bobina. Determine o módulo (a) do momento dipolar magnético da bobina; (b) do torque sobre a bobina.

•58 Um dipolo magnético com um momento dipolar de módulo 0,020 J/T é liberado a partir do repouso em um campo magnético uniforme de módulo 52 mT e gira livremente sob a ação da força magnética. Quando o dipolo está passando pela orientação na qual o momento dipolar está alinhado com o campo magnético, sua energia cinética é 0,80 mJ. (a) Qual é o ângulo inicial entre o momento dipolar e o campo magnético? (b) Qual é o ângulo quando o dipolo volta a entrar (momentaneamente) em repouso?

•59 Duas espiras circulares concêntricas, de raios $r_1 = 20,0$ cm e $r_2 = 30,0$ cm, estão situadas no plano xy; ambas são percorridas

por uma corrente de 7,00 A no sentido horário (Fig. 28-51). (a) Determine o módulo do momento dipolar magnético do sistema. (b) Repita o cálculo supondo que a corrente da espira menor mudou de sentido.

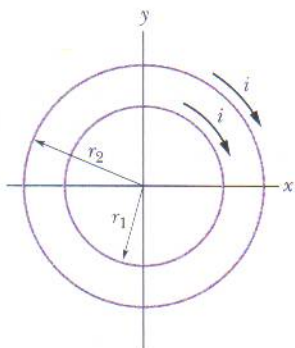


FIG. 28-51 Problema 59.

••60 A Fig. 28-52 mostra a energia potencial U de um dipolo magnético na presença de um campo magnético externo $\vec{B}$ em função do ângulo ϕ entre a direção de $\vec{B}$ e a direção do dipolo magnético. A escala do eixo vertical é definida por $U_s = 2,0 \times 10^{-4}$ J. O dipolo pode girar em torno de um eixo com atrito desprezível, o que permite fazer variar o valor de ϕ . Rotações no sentido anti-horário a partir de $\phi = 0$ correspondem a valores positivos de ϕ , e rotações no sentido horário correspondem a valores negativos de ϕ . O dipolo é liberado na posição $\phi = 0$ com uma energia cinética de $6,7 \times 10^{-4}$ J e gira no sentido anti-horário. Até que ângulo ϕ vai a rotação? (Na terminologia da Seção 8-6, qual é o valor de ϕ no ponto de retorno do poço de potencial da Fig. 28-52?)

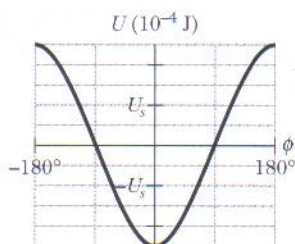


FIG. 28-52 Problema 60.

••61 Uma espira circular com 8,0 cm de raio é percorrida por uma corrente de 0,20 A. Um vetor de comprimento unitário, paralelo ao momento dipolar $\vec{\mu}$ da espira, é dado por $0,60\hat{i} - 0,80\hat{j}$. Se a espira é submetida a um campo magnético uniforme dado por $\vec{B} = (0,25 \text{ T})\hat{i} + (0,30 \text{ T})\hat{k}$, determine (a) o torque sobre a espira (em termos dos vetores unitários) e (b) a energia potencial magnética da espira.

••62 A Fig. 28-53 mostra uma espira ABCDEFA percorrida por uma corrente $i = 5,00$ A. Os lados da espira são paralelos aos eixos coordenados, com $AB = 20,0$ cm, $BC = 30,0$ cm e $FA = 10,0$ cm. Em termos dos vetores unitários, qual é o momento dipolar magnético da espira? (Sugestão: Imagine correntes iguais e opostas no segmento AD e calcule o momento produzido por duas espiras retangulares, ABCDA e ADEFA.)

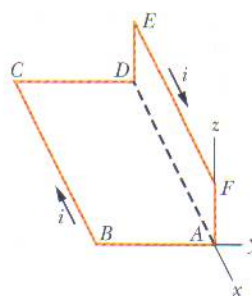


FIG. 28-53 Problema 62.

••63 Um fio de 25,0 cm de comprimento, percorrido por uma corrente de 4,51 mA, é convertido em uma bobina circular e submetido a um campo magnético uniforme $\vec{B}$ de módulo 5,71 mT. Se o torque que o campo exerce sobre a espira é o maior possível, determine (a) o ângulo entre $\vec{B}$ e o momento dipolar magnético da bobina e (b) o número de espiras da bobina. (c) Determine o módulo do torque máximo.

••64 Na Fig. 28-54a duas espiras concêntricas, situadas no mesmo plano, são percorridas por correntes em sentidos contrários. A corrente i_1 na espira 1 é fixa e a corrente i_2 na espira 2 é variável. A Fig. 28-54b mostra o momento magnético total do sistema em função de i_2 . A escala do eixo vertical é definida por $\mu_{\text{tot},s} = 2,0 \times 10^{-5}$ A $\cdot$ m², e a escala do eixo horizontal é definida por $i_{2,s} = 10,0$ mA. Se o sentido da corrente na espira 2 for invertido, qual será o módulo do momento magnético total do sistema para $i_2 = 7,0$ mA?

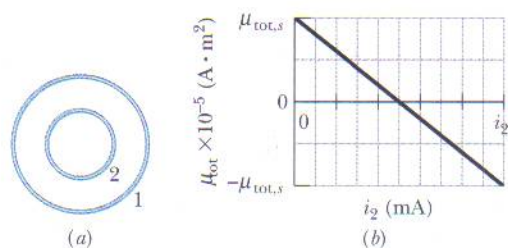


FIG. 28-54 Problema 64.

••65 A bobina da Fig. 28-55 conduz uma corrente $i = 2,00$ A no sentido indicado, é paralela ao plano xz , possui 3,00 espiras, tem uma área de $4,00 \times 10^{-3}$ m² e está submetida a um campo magnético uniforme $\vec{B} = (2,00\hat{i} - 3,00\hat{j} - 4,00\hat{k})$ mT. Determine (a) a energia potencial magnética do sistema bobina-campo magnético; (b) o torque magnético (em termos dos vetores unitários) a que está sujeita a bobina.

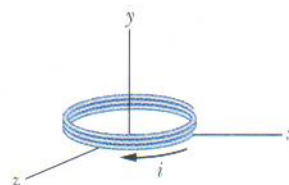


FIG. 28-55 Problema 65.

Problemas Adicionais

66 Um fio situado sobre o eixo y , entre $y = 0$ e $y = 0,250$ m, é percorrido por uma corrente de 2,00 mA no sentido negativo do

eixo. Na região existe um campo magnético não-uniforme dado por $\vec{B} = (0,300 \text{ T/m})y\hat{i} + (0,400 \text{ T/m})y\hat{j}$. Em termos dos vetores unitários, qual é a força magnética que o campo exerce sobre o fio?

67 O físico S. A. Goudsmit inventou um método para medir a massa de um íon pesado determinando seu período de revolução na presença de um campo magnético conhecido. Um íon de iodo monoionizado descreve 7,00 revoluções em 1,29 milissegundo em um campo de 45,0 militeslas. Calcule a massa do íon em unidades de massa atômica.

68 Um elétron do tubo de imagem de um receptor de televisão está se movendo a $7,20 \times 10^6 \text{ m/s}$ na presença de um campo magnético de 83,0 mT. Determine (a) o valor máximo e (b) o valor mínimo da força que o campo magnético pode exercer sobre o elétron. (c) Em um certo instante o elétron tem uma aceleração de módulo $4,90 \times 10^{14} \text{ m/s}^2$. Qual é o ângulo entre a velocidade do elétron e o campo magnético nesse instante?

69 Um relógio de parede tem um mostrador com 15 cm de raio. Seis espiras de fio são enroladas no mostrador; o fio conduz uma corrente de 2,0 A no sentido horário. No local onde o relógio se encontra existe um campo magnético uniforme de 70 mT (o que não impede o relógio de mostrar corretamente a hora). Exatamente às 13 h o ponteiro das horas do relógio aponta na direção do campo magnético. (a) Após quantos minutos o ponteiro de minutos do relógio aponta na direção do torque exercido pelo campo magnético sobre a bobina? (b) Determine o módulo do torque.

70 Em um experimento de efeito Hall uma corrente de 3,0 A que percorre longitudinalmente um condutor com 1,0 cm de largura, 4,0 cm de comprimento e $10 \mu\text{m}$ de espessura produz uma diferença de potencial de Hall entre os lados do condutor de $10 \mu\text{V}$ quando um campo magnético de 1,5 T é aplicado perpendicularmente ao plano do condutor. A partir desses dados determine (a) a velocidade de deriva dos portadores de carga e (b) a concentração dos portadores de carga. (c) Mostre em um diagrama a polaridade da diferença de potencial de Hall com sentidos arbitrados para a corrente e o campo magnético, supondo que os portadores de carga são elétrons.

71 O átomo 1, de massa 35 u, e o átomo 2, de massa 37 u, são ambos monoionizados com uma carga $+e$. Depois de ser introduzido em um espectrômetro de massa (Fig. 28-14) e acelerado a partir do repouso por uma diferença de potencial $V = 7,3 \text{ kV}$, cada íon segue uma trajetória circular em um campo magnético de módulo $B = 0,50 \text{ T}$. Qual é a distância Δx entre os pontos em que os íons atingem o detector?

72 Um elétron com uma energia cinética de 2,5 keV, movendo-se em linha reta no sentido positivo do eixo x , penetra em uma região onde existe um campo elétrico uniforme de módulo 10 kV/m orientado no sentido negativo do eixo y . Deseja-se aplicar um campo $\vec{B}$ na mesma região para que o elétron continue a se mover em linha reta, e a direção de $\vec{B}$ deve ser tal que o módulo de $\vec{B}$ seja o menor possível. Em termos dos vetores unitários, qual deve ser o campo $\vec{B}$?

73 Na Fig. 28-56 um elétron se move com uma velocidade $v = 100 \text{ m/s}$ ao longo do eixo x , na presença de um campo magnético uniforme e de um campo elétrico uniforme. O campo magnético $\vec{B}$ aponta para dentro do papel e tem módulo 5,00 T. Qual é o campo elétrico em termos dos vetores unitários?

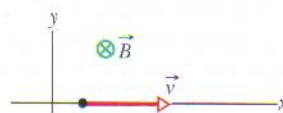


FIG. 28-56 Problema 73.

74 Um feixe de elétrons de energia cinética K emerge de uma “janela” de folha de alumínio na extremidade de um acelerador. A uma distância d dessa janela existe uma placa de metal perpendicular à direção do feixe (Fig. 28-57). (a) Mostre que é possível evitar que o feixe atinja a placa aplicando um campo uniforme $\vec{B}$ tal que

$$B \geq \sqrt{\frac{2mK}{e^2 d^2}},$$

onde m e e são a massa e a carga do elétron. (b) Qual deve ser a orientação de $\vec{B}$?

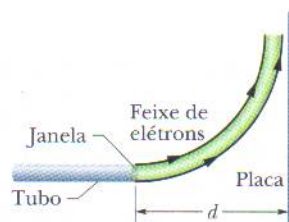


FIG. 28-57 Problema 74.

75 Um próton, um dêuteron ($q = +e$, $m = 2,0 \text{ u}$) e uma partícula alfa ($q = +2e$, $m = 4,0 \text{ u}$) são acelerados pela mesma diferença de potencial e entram em uma região onde existe um campo magnético uniforme $\vec{B}$, movendo-se perpendicularmente a $\vec{B}$. Determine a razão (a) entre a energia cinética do próton, K_p , e a energia cinética da partícula alfa, K_α ; (b) entre a energia cinética do dêuteron, K_d , e K_α . Se o raio da trajetória circular do próton é 10 cm, determine o raio (c) da trajetória do dêuteron e (d) da trajetória da partícula alfa.

76 Um próton de carga $+e$ e massa m penetra com velocidade inicial $\vec{v} = v_{0x}\hat{i} + v_{0y}\hat{j}$ em uma região onde existe um campo magnético $\vec{B} = B\hat{i}$. Escreva uma expressão, em termos dos vetores unitários, para a velocidade $\vec{v}$ em qualquer instante de tempo posterior t .

77 Uma partícula de massa 6,0 g está se movendo a 4,0 km/s no plano xy , em uma região onde existe um campo magnético uniforme dado por $5,0\hat{i} \text{ mT}$. No instante em que a velocidade da partícula faz um ângulo de 37° no sentido anti-horário com o semi-eixo x positivo, a força magnética que o campo exerce sobre a partícula é $0,48\hat{k} \text{ N}$. Qual é a carga da partícula?

78 O espectrômetro de massa de Bainbridge, mostrado de forma esquemática na Fig. 28-58, separa íons de mesma velocidade e mede a razão q/m desses íons. Depois de entrar no aparelho através das fendas colimadoras S_1 e S_2 , os íons passam por um seletor de velocidade composto por um campo elétrico produzido pelas placas carregadas P e P' e por um campo magnético $\vec{B}$ perpendicular ao campo elétrico e à trajetória dos íons. Os íons que passam pelos campos cruzados $\vec{E}$ e $\vec{B}$ sem serem desviados (ou seja, os que possuem uma velocidade E/B), entram em uma região onde existe um segundo campo magnético, $\vec{B}'$ que os faz descrever um semicírculo. Uma placa fotográfica (ou um detec-

tor moderno) registra a posição final dos íons. Mostre que a razão entre a carga e a massa dos íons é dada por $q/m = E/rBB'$, onde r é o raio do semicírculo.

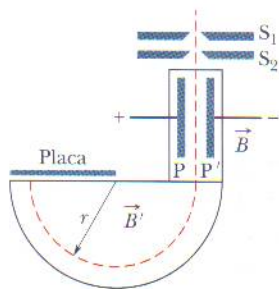


FIG. 28-58 Problema 78.

79 Em um certo instante, $\vec{v} = (-2,00\hat{i} + 4,00\hat{j} - 6,00\hat{k})$ m/s é a velocidade de um próton em um campo magnético uniforme $\vec{B} = (2,00\hat{i} + 4,00\hat{j} + 8,00\hat{k})$ mT. Nesse instante, determine (a) a força magnética $\vec{F}$ que o campo exerce sobre o próton, em termos dos vetores unitários; (b) o ângulo entre $\vec{v}$ e $\vec{F}$; (c) o ângulo entre $\vec{v}$ e $\vec{B}$.

80 (a) Na Fig. 28-8, mostre que a razão entre o módulo E do campo elétrico de Hall e o módulo E_C do campo elétrico responsável pelo movimento das cargas (corrente) é dado por

$$\frac{E}{E_C} = \frac{B}{ne\rho},$$

onde ρ é a resistividade do material e n é a concentração de portadores de carga. (b) Calcule o valor numérico da razão para os dados do Problema 13. (Veja a Tabela 26-1.)

81 No instante $t = 0$ um elétron com uma energia cinética de 12 keV, que está se movendo no sentido positivo de um eixo x paralelo à componente horizontal do campo magnético $\vec{B}$ da Terra, passa pelo ponto $x = 0$. A componente vertical do campo aponta para baixo e tem um módulo de $55,0 \mu\text{T}$. (a) Qual é o módulo da aceleração do elétron produzida pelo campo $\vec{B}$? (b) Qual é a distância a que se encontra o elétron do eixo x quando chega ao ponto de coordenada $x = 20 \text{ cm}$?

82 A velocidade de um elétron é $\vec{v} = (32\hat{i} + 40\hat{j})$ km/s no instante em que penetra em uma região onde existe um campo magnético uniforme $\vec{B} = 60\hat{i} \mu\text{T}$. Determine (a) o raio da trajetória helicoidal do elétron; (b) o passo da trajetória. (c) Para um observador que olha para a região onde existe o campo magnético a partir do ponto de entrada do elétron, o elétron se move no sentido horário ou no sentido anti-horário?

83 Um próton, um dêuteron ($q = +e, m = 2,0 u$) e uma partícula alfa ($q = +2e, m = 4,0 u$), todos com a mesma energia cinética, entram em uma região onde existe um campo magnético uniforme $\vec{B}$ movendo-se perpendicularmente a $\vec{B}$. Determine a razão (a) entre o raio r_d da trajetória do dêuteron e o raio r_p da trajetória do próton; (b) entre o raio r_α da trajetória da partícula alfa e r_p .

84 Uma partícula de carga $2,0 \text{ C}$ está se movendo na presença de um campo magnético uniforme. Em um certo instante, a velocidade da partícula é $(2,0\hat{i} + 4,0\hat{j} + 6,0\hat{k})$ m/s e a força magnética experimentada pela partícula é $(4,0\hat{i} - 20\hat{j} + 12\hat{k})$ N. As componentes x e y do campo magnético são iguais. Qual é o campo $\vec{B}$?

85 Uma partícula com uma carga de $5,0 \mu\text{C}$ está se movendo em uma região onde existem um campo magnético de $-20\hat{i}$ mT e um campo elétrico de $300\hat{j}$ V/m. Em um certo instante a velocidade da partícula é $(17\hat{i} - 11\hat{j} + 7,0\hat{k})$ km/s. Nesse instante, em termos dos vetores unitários, qual é a força eletromagnética total (a soma das forças elétrica e magnética) a que a partícula está submetida?

86 Um fio situado sobre o eixo x , entre os pontos $x = 0$ e $x = 1,00 \text{ m}$, conduz uma corrente de $3,00 \text{ A}$ no sentido positivo do eixo. Na região existe um campo magnético não-uniforme dado por $\vec{B} = (4,00 \text{ T/m}^2)x^2\hat{i} - (0,600 \text{ T/m}^2)x^2\hat{j}$. Em termos dos vetores unitários, qual é a força magnética que o campo exerce sobre o fio?

87 Prove que a relação $\tau = NiAB \sin \theta$ é válida não só para a espira retangular da Fig. 28-22, mas também para uma espira fechada de qualquer forma. (Sugestão: Substitua a espira de forma arbitrária por um conjunto de espiras longas, finas, aproximadamente retangulares, que sejam quase equivalentes à espira de forma arbitrária no que diz respeito à distribuição de corrente.)