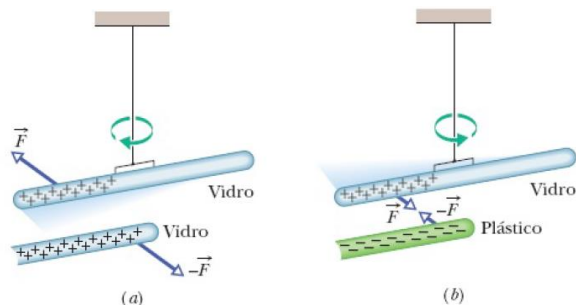


CAPÍTULO 21

A1 A Lei de Coulomb

Cargas Elétricas → **Dois Tipos de Carga** → **Excesso de Carga**.



Carga Induzida.

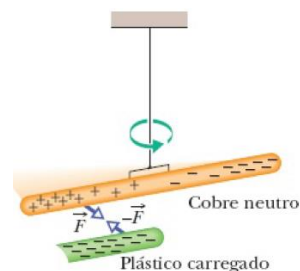


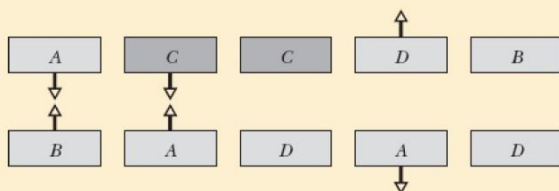
Figura 21-1 (a) Dois bastões de vidro foram esfregados com um pedaço de seda, e um deles foi suspenso por um barbante. Quando aproximamos os dois bastões, eles se repelem. (b) O bastão de plástico foi esfregado com um pedaço de pele. Quando aproximamos os dois bastões, eles se atraem.

Partículas com cargas de mesmo sinal se repelem e partículas com cargas de sinais opostos se atraem.

condutores, isolantes, semicondutores, supercondutores. → Condução de Eletricidade. → Partículas Carregadas.

✓ Teste 1

A figura mostra cinco pares de placas. *A*, *B* e *D* são placas de plástico carregadas e *C* é uma placa de cobre eletricamente neutra. As forças eletrostáticas entre três dos pares de placas estão indicadas. Os outros dois pares de placas se atraem ou se repelem?



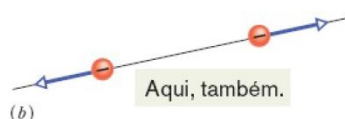
A Lei de Coulomb → **força eletrostática**

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (\text{lei de Coulomb}), \quad (21-1)$$

Sempre desenhe o vetor força com a origem na partícula.



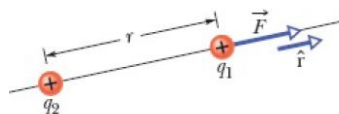
As forças tendem a afastar as partículas.



Aqui, também.



Aqui, porém, as forças tendem a aproximar as partículas.

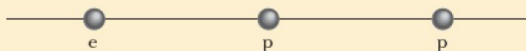


As constantes da Eqs. 21-1 têm os valores $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$, $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$.

Várias Forças → $\vec{F}_{1,\text{tot}} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \vec{F}_{15} + \dots + \vec{F}_{1n}$.

Teste 2

A figura mostra dois prótons (símbolo p) e um elétron (símbolo e) em uma reta. Determine o sentido (a) da força eletrostática exercida pelo elétron sobre o próton central; (b) da força eletrostática exercida pelo outro próton sobre o próton central; (c) da força total exercida sobre o próton central.



Exemplo 21.01 Cálculo da força total exercida por duas partículas

Este exemplo na verdade é uma série de três exemplos com um grau crescente de dificuldade. Todos envolvem a mesma partícula carregada 1. Primeiro, a partícula está sujeita a uma única força (coisa fácil). Em seguida, as forças são duas, mas apontam em direções opostas (o que facilita as coisas). Finalmente, as forças também são duas, mas apontam em direções diferentes (agora a Fig. 21-7a mostra duas partículas positivamente carregadas situadas em pontos fixos do eixo x. As cargas são $q_1 = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$ e $q_2 = 3,20 \times 10^{-19} \text{ C}$ e a distância entre as cargas é $R = 0,0200 \text{ m}$. Determine o módulo e a orientação da força eletrostática \vec{F}_{12} exercida pela partícula 2 sobre a partícula 1.

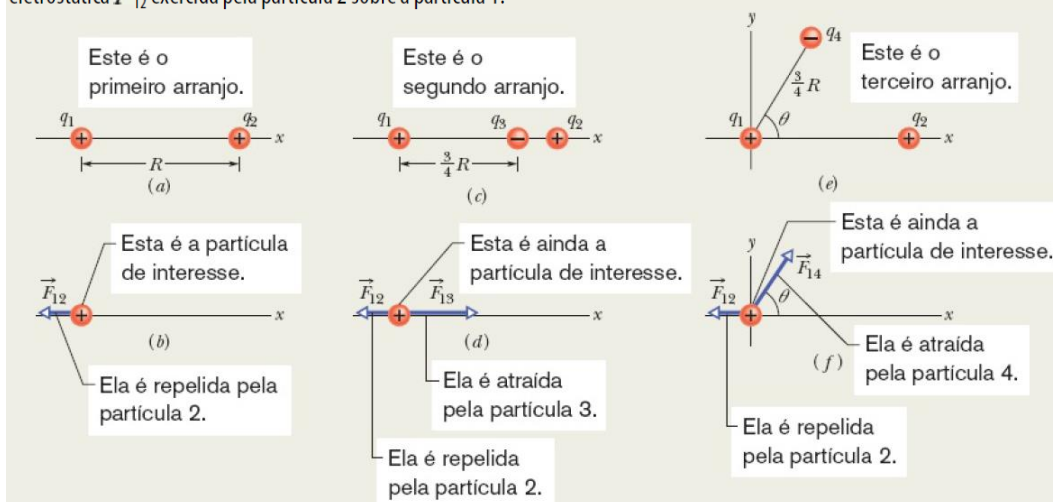


Fig. 21-7

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{R^2} = (8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \times \frac{(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(3,20 \times 10^{-19} \text{ C})}{(0,0200 \text{ m})^2} = 1,15 \times 10^{-24} \text{ N}. \quad \vec{F}_{12} = -(1,15 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i}. \quad (\text{Resposta})$$

(b) A Fig. 21-7c é igual à Fig. 21-7a, exceto pelo fato de que agora existe uma partícula 3 no eixo x entre as partículas 1 e 2. A partícula 3 tem uma carga $q_3 = -3,20 \times 10^{-19} \text{ C}$ e está a uma distância $3R/4$ da partícula 1. Determine a força eletrostática $\vec{F}_{1,\text{tot}}$ exercida sobre a partícula 1 pelas partículas 2 e 3.

$$F_{13} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_3|}{(\frac{3}{4}R)^2} = (8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \times \frac{(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(3,20 \times 10^{-19} \text{ C})}{(\frac{3}{4})^2(0,0200 \text{ m})^2} = 2,05 \times 10^{-24} \text{ N}. \quad \vec{F}_{13} = (2,05 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i}.$$

$$\vec{F}_{1,\text{tot}} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} = -(1,15 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i} + (2,05 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i} = (9,00 \times 10^{-25} \text{ N})\hat{i}. \quad (\text{Resposta})$$

(c) A Fig. 21-7e é igual à Fig. 21-7a, exceto pelo fato de que agora existe uma partícula 4. A partícula 4 tem uma carga $q_4 = -3,20 \times 10^{-19} \text{ C}$, está a uma distância $3R/4$ da partícula 1 e está em uma reta que faz um ângulo $\theta = 60^\circ$ com o eixo x. Determine a força de atração eletrostática $\vec{F}_{1,\text{tot}}$ exercida sobre a partícula 1 pelas partículas 2 e 4.

$$F_{14} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_4|}{(\frac{3}{4}R)^2} = (8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \times \frac{(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(3,20 \times 10^{-19} \text{ C})}{(\frac{3}{4})^2(0,0200 \text{ m})^2} = 2,05 \times 10^{-24} \text{ N}. \quad \vec{F}_{14} = (1,025 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i} + (1,775 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{j}.$$

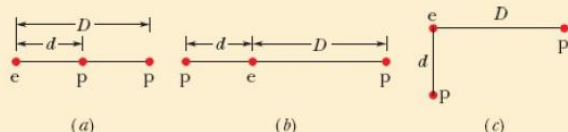
$$\vec{F}_{1,\text{tot}} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{14} = -(1,15 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i} + (1,025 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{i} + (1,775 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{j} \approx (-1,25 \times 10^{-25} \text{ N})\hat{i} + (1,78 \times 10^{-24} \text{ N})\hat{j}. \quad (\text{Resposta})$$

$$F_{1,\text{tot},x} = F_{12,x} + F_{14,x} = -1,25 \times 10^{-25} \text{ N}. \quad F_{1,\text{tot},y} = F_{12,y} + F_{14,y} = 1,78 \times 10^{-24} \text{ N}. \quad F_{1,\text{tot}} = \sqrt{F_{1,\text{tot},x}^2 + F_{1,\text{tot},y}^2} = 1,78 \times 10^{-24} \text{ N}. \quad (\text{Resposta})$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_{1,\text{tot},y}}{F_{1,\text{tot},x}} = -86,0^\circ. \rightarrow -86,0^\circ + 180^\circ = 94,0^\circ. \quad (\text{Resposta})$$

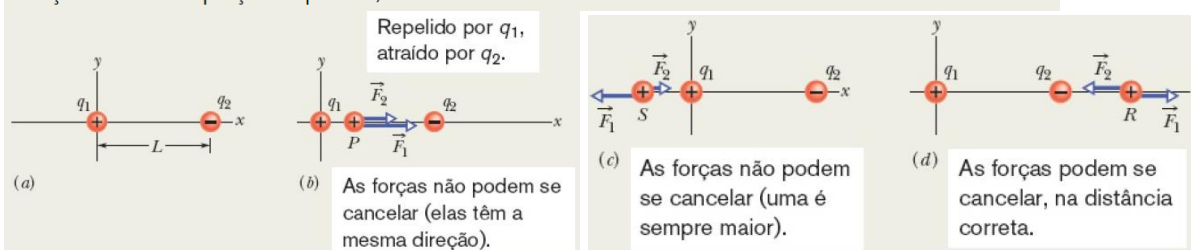
Teste 3

A figura mostra três arranjos de um elétron, e, e dois prótons, p. (a) Ordene os arranjos de acordo com o módulo da força eletrostática exercida pelos prótons sobre o elétron, em ordem decrescente. (b) No arranjo c, o ângulo entre a força total exercida sobre o elétron e a reta d é maior ou menor que 45° ?



Exemplo 21.02 Equilíbrio de uma partícula submetida a duas forças

A Fig. 21-8a mostra duas partículas fixas: uma partícula de carga $q_1 = +8q$ na origem e uma partícula de carga $q_2 = -2q$ em $x = L$. Em que ponto (que não esteja a uma distância infinita das cargas) um próton pode ser colocado de modo a ficar *em equilíbrio* (sem estar submetido a uma força)? O equilíbrio é *estável* ou *instável*? (Ou seja, se o próton sofrer um pequeno deslocamento, as forças o farão voltar à posição de equilíbrio?)



$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0 \rightarrow F_1 = F_2, \rightarrow \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{8qq_p}{x^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2qq_p}{(x-L)^2} \rightarrow \left(\frac{x-L}{x}\right)^2 = \frac{1}{4} \rightarrow x = 2L. \quad (\text{Resposta}) \quad \text{O equilíbrio no ponto } x = 2L \text{ é instável.}$$

Condutores Esféricos → a casca passa a atrair ou repelir uma carga externa como se todo o excesso de cargas estivesse no centro da casca.

Teste 4

Inicialmente, a esfera A possui uma carga de $-50e$ e a esfera B uma carga de $+20e$. As esferas são feitas de um material condutor e têm o mesmo tamanho. Se as esferas são colocadas em contato, qual é o novo valor da carga da esfera A?

A2 - A CARGA É QUANTIZADA → $q = ne$, $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Partícula	Símbolo	Carga
Elétron	e ou e^-	$-e$
Próton	p	$+e$
Nêutron	n	0

A CARGA É CONSERVADA → A soma algébrica das transferências de cargas antes e depois de qualquer processo atômico é sempre nula. (O mesmo vale para a massa atômica.)

Exemplos importantes: Decaimento radioativo $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} + ^4\text{He}$. Processo de aniquilação $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$.

Produção de um par $\gamma \rightarrow e^- + e^+$.

Campos Elétricos

Linhas de Campo Elétrico

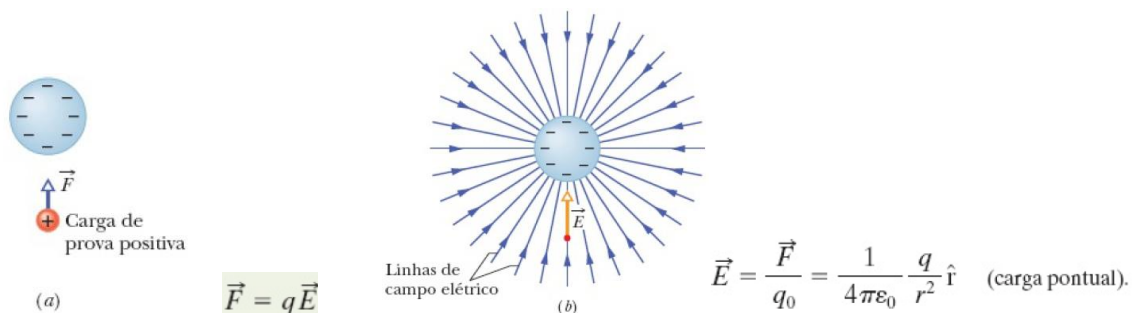


Figura 22-3 (a) Uma força eletrostática \vec{F} age sobre uma carga de prova positiva. (b) O vetor campo elétrico \vec{E} na posição da carga de prova e as linhas de campo no espaço que cerca a esfera.

As linhas de campo elétrico se afastam das cargas positivas (onde começam) e se aproximam das cargas negativas (onde terminam).

O princípio da superposição se aplica aos campos elétricos.

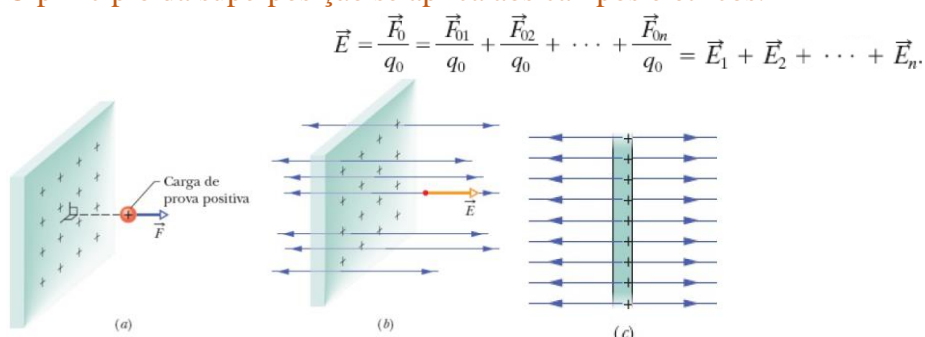


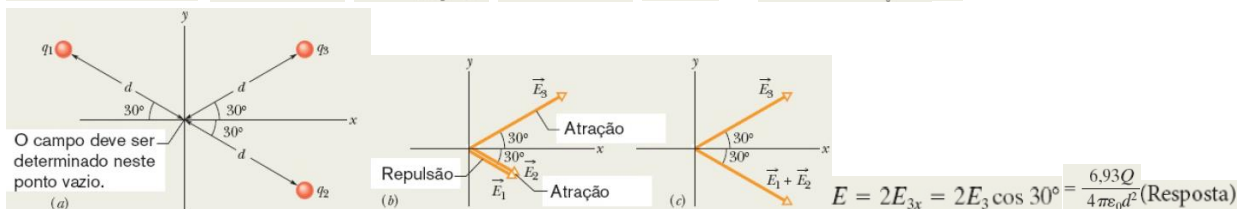
Figura 22-4 (a) A força \vec{F} que age sobre uma carga de prova positiva colocada nas proximidades de uma placa muito grande, isolante, com uma distribuição uniforme de carga positiva na superfície direita. (b) O vetor campo elétrico \vec{E} na posição da carga de prova e as linhas de campo nas vizinhanças da placa. As linhas de campo elétrico começam na superfície da placa. (c) Vista lateral de (b). Nesse caso o campo elétrico é dito ser uniforme.

Exemplo 22.01 Campo elétrico total produzido por três partículas carregadas

A Fig. 22-7a mostra três partículas de cargas $q_1 = +2Q$, $q_2 = -2Q$ e $q_3 = -4Q$, todas situadas a uma distância d da origem.

Determine o campo elétrico total \vec{E} produzido na origem pelas três partículas.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 \quad E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Q}{d^2} \quad E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Q}{d^2} \quad E_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4Q}{d^2} \quad \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \rightarrow E_1 + E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{4Q}{d^2} = E_3$$



CAPÍTULO 28

A3 - Campos Magnéticos

O que Produz um Campo Magnético?

Os campos magnéticos podem ser produzidos por partículas eletricamente carregadas em movimento, como os elétrons responsáveis pela corrente elétrica em um fio, o que constitui um **eletroímã**. O campo magnético produzido por correntes elétricas será discutido no Capítulo 29. A outra forma de produzir um campo magnético se baseia no fato de que muitas partículas elementares, entre elas o elétron, possuem um campo magnético *intrínseco*. Isto será discutido no Capítulo 32.

A definição do Campo Magnético B e da força magnética:

Definimos o **campo magnético** como uma grandeza vetorial cuja direção coincide com aquela para a qual a força magnética é zero:

$$B = \frac{F_B}{|q|v} \rightarrow \vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \rightarrow F_B = |q|vB \sin \phi,$$

Determinação da Força Magnética

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} .

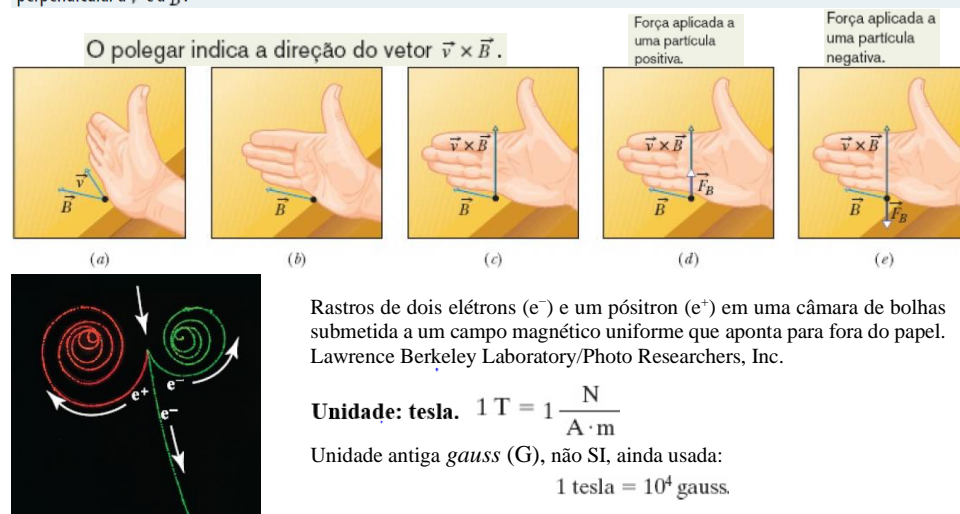
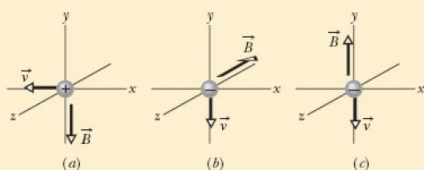


Tabela 28-1 Ordem de Grandeza de Alguns Campos Magnéticos

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?

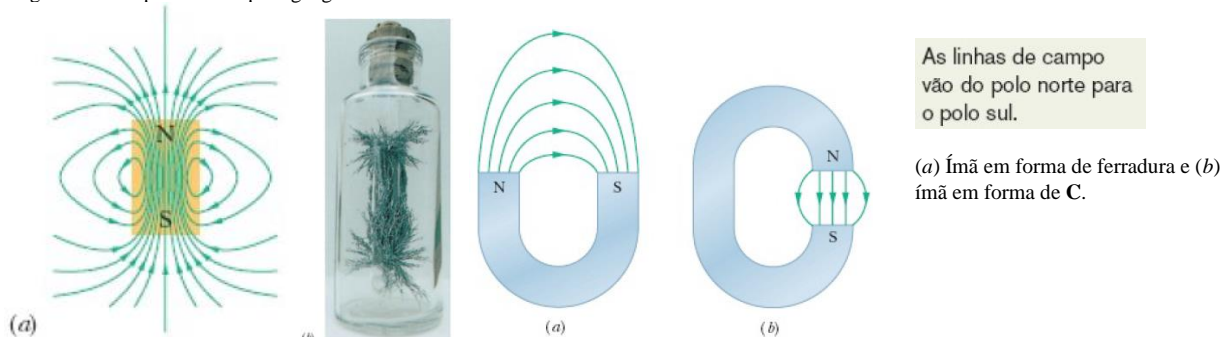


Linhas de Campo Magnético

O campo magnético pode ser representado por linhas de campo. (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. **Dois Polos.** As linhas de campo entram no ímã por uma das extremidades, *polo norte*, e saem pela outra, *polo sul*. Como um ímã tem dois polos, ele se comporta como um **dipolo magnético**.

Polos magnéticos de tipos diferentes se atraem e polos do mesmo tipo se repelem.

A Terra possui um campo magnético que é produzido, no interior do planeta, por um mecanismo até hoje pouco conhecido. O polo *sul* do campo magnético da Terra está situado nas proximidades do polo geográfico norte. Assim, o correto seria chamarmos de polo magnético sul o polo magnético mais próximo do polo geográfico norte.



Exemplo 28.01 Força magnética a que é submetida uma partícula carregada em movimento

No interior de uma câmara de laboratório existe um campo magnético uniforme, de módulo 1,2 mT, orientado verticalmente para cima. Um próton com uma energia cinética de 5,3 MeV entra na câmara movendo-se horizontalmente do sul para o 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 efeito do campo magnético da Terra.)

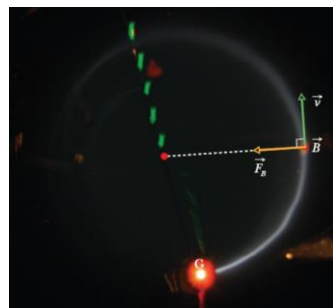
$$K = \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2K}{m}} = \sqrt{\frac{(2)(5,3 \text{ MeV})(1,60 \times 10^{-13} \text{ J/MeV})}{1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}}} = 3,2 \times 10^7 \text{ m/s.}$$

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

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

O princípio da superposição se aplica aos campos magnéticos.

Uma Partícula Carregada em Movimento Circular



A força magnética que age sobre uma partícula é centrípeta, seu módulo é $|q|vB$. O movimento circular, de acordo com a segunda lei de Newton, torna-se

$$|q|vB = \frac{mv^2}{r} \rightarrow r = \frac{mv}{|q|B} \rightarrow T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{v} \frac{mv}{|q|B} = \frac{2\pi m}{|q|B} \rightarrow \omega = 2\pi f = \frac{|q|B}{m}$$

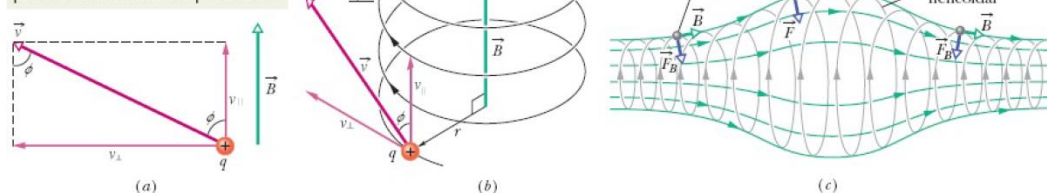
Elétrons circulando em uma câmara que contém uma pequena quantidade de gás (a trajetória dos elétrons é o anel claro). Na câmara existe um campo magnético uniforme que aponta para fora do papel. Note que a força magnética é radial; para que o movimento seja circular, é preciso que aponte para o centro da trajetória. Utilize a regra da mão direita para produtos vetoriais a fim de confirmar que tem a direção apropriada. (Não se esqueça do sinal de q .)

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 de uma dessas partículas separado em duas componentes, uma paralela a \vec{B} e outra perpendicular a \vec{B} :

$$v_{\parallel} = v \cos \phi \quad \text{e} \quad v_{\perp} = v \sin \phi$$

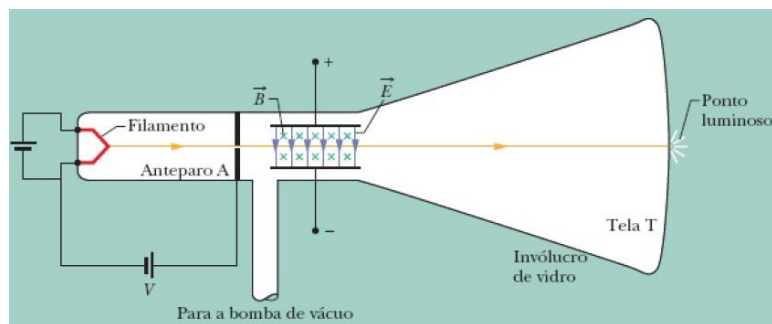
A componente da velocidade perpendicular ao campo produz um movimento circular; a componente paralela ao campo produz um movimento para cima.



A figura (c) 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 ela está aprisionada em uma *garrafa magnética*.

A4 - Campos Cruzados: A Descoberta do Elétron

Quando os dois campos \mathbf{E} e \mathbf{B} são mutuamente perpendiculares, eles são chamados de *campos cruzados*. Vamos discutir o experimento que levou à descoberta do elétron, realizado por J. J. Thomson em 1897 na Universidade de Cambridge.



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 produzido pelo feixe sem nenhum desvio.
- 2- Aplique o campo e registre a nova posição do ponto na tela.
- 3- Mantendo constante o módulo do campo \mathbf{E} , aplique o campo \mathbf{B} e ajuste o valor do módulo de \mathbf{B} para que o ponto volte à posição inicial.

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.

Num *tubo de raios catódicos*, TRC, elétrons são emitidos por um filamento aquecido em uma das extremidades de um tubo evacuado e acelerados por uma diferença de potencial V . Em seguida, passam por uma região onde existem campos \mathbf{E} e \mathbf{B} cruzados e atingem uma tela fluorescente T, onde produzem um ponto luminoso. Devido aos campos cruzados, os elétrons são desviados para cima pelo campo elétrico e para baixo pelo campo magnético, pois as duas forças estão *em oposição*.

$|q|E = |q|vB \sin(90^\circ) = |q|vB \rightarrow v = \frac{E}{B}$ (Forças que se cancelam.)

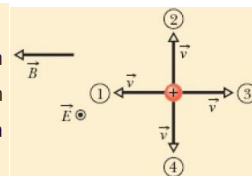
A deflexão de uma carga de velocidade v , massa m , carga q por uma distância L devido a um campo elétrico uniforme foi obtida no Ex. 22.04, substituindo-se a velocidade resulta

$$y = \frac{|q|EL^2}{2mv^2} \rightarrow \frac{m}{|q|} = \frac{B^2L^2}{2yE}.$$

Assim, os campos cruzados permitem medir a razão $m/|q|$ das partículas que estão sendo investigadas, o que levou à descoberta do elétron por Thomson.

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} (que aponta para fora do papel e está 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 na ordem decrescente do módulo da força total que age sobre a partícula. (b) Das quatro direções, qual é a única em que a força total pode ser zero?



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} que aponta para dentro do papel. Uma partícula é um próton; 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?



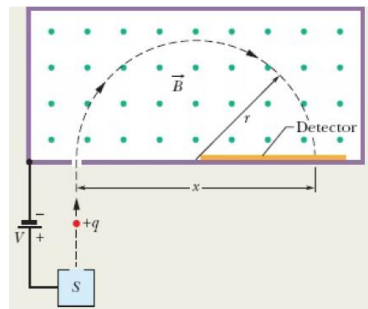
Exemplo 28.03 Movimento helicoidal de uma partícula carregada em um campo magnético

Um elétron com uma energia cinética de 22,5 eV penetra em uma região onde existe um campo magnético 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?

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m}} = 2,81 \times 10^6 \text{ m/s} \rightarrow p = v_{\parallel} T = (v \cos \phi) \frac{2\pi m}{|q|B} = (2,81 \times 10^6 \text{ m/s})(\cos 65,5^\circ) \frac{2\pi(9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})}{(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(4,55 \times 10^{-4} \text{ T})} = 9,16 \text{ cm}$$

Exemplo 28.04 Movimento circular uniforme de uma partícula carregada em um campo magnético

A figura ilustra o princípio de funcionamento do espectrômetro de massa, um instrumento 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 velocidade. O campo faz com que o íon descreva uma trajetória semicircular antes de atingir um detector situado na superfície inferior da câmara. Suponha que $B = 80.000$ mT, $V = 1000,0$ V e que íons de carga $q = +1,6022 \times 10^{-19}$ C atinjam o detector em um ponto situado a uma distância $x = 1,6254$ m do ponto de entrada na câmara. Qual é a massa m dos íons em unidades de massa atômica? (Eq. 1-7: $1 \text{ u} = 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$.)

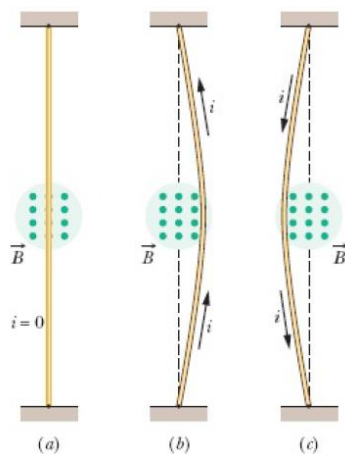


Quando o íon deixa a fonte, a energia cinética é aproximadamente zero; ao entrar na câmara, a energia cinética aumentou para $mv^2/2$. Além disso, durante a aceleração, o íon positivo sofre uma variação de potencial elétrico de $-V$. Como o íon possui uma carga positiva q , a variação de energia potencial é $-qV$. De acordo com a lei de conservação da energia mecânica, $\Delta K + \Delta U = 0 \rightarrow mv^2/2 - qV = 0 \rightarrow$

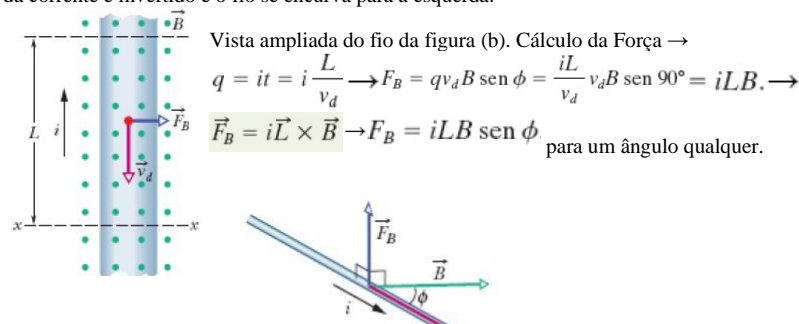
$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}} \rightarrow r = \frac{mv}{qB} = \frac{m}{qB} \sqrt{\frac{2qV}{m}} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{q}}, \quad x = 2r \rightarrow$$

$$m = \frac{B^2 q x^2}{8V} = 3,3863 \times 10^{-25} \text{ kg} = 203,93 \text{ u}.$$

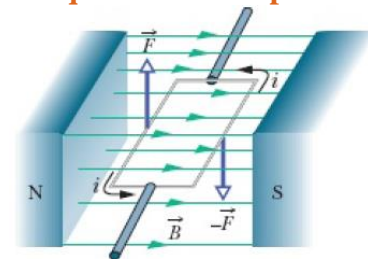
Força Magnética em um Fio Percorrido por uma Corrente $i = dq/dt$.



Em (a) um fio vertical, que não conduz corrente e está preso nas duas extremidades, é colocado no espaço entre os polos de um ímã. O campo magnético do ímã aponta para fora do papel. Em (b) uma corrente para cima passa a circular no fio, que se encurva para a direita. Em (c) o sentido da corrente é invertido e o fio se encurva para a esquerda.

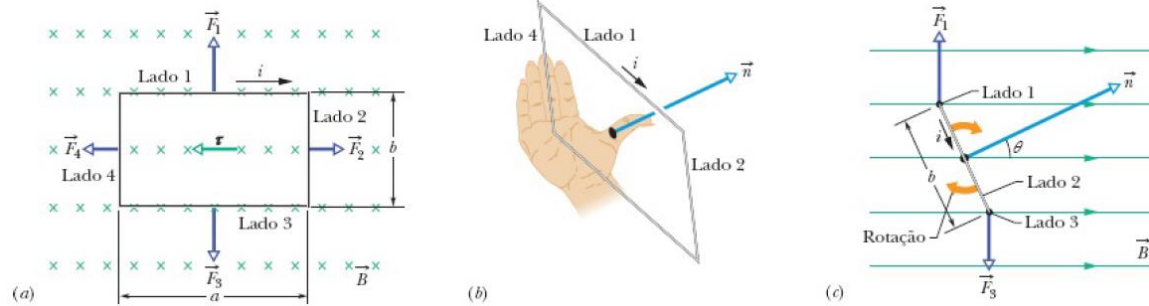


Torque em uma Espira Percorrida por Corrente – motor simples



A figura ao lado mostra um motor simples, constituído por uma espira percorrida por uma corrente e submetida a um campo magnético. As forças magnéticas \vec{F} e $-\vec{F}$ produzem um torque na espira que tende a fazê-la girar em torno do eixo central. Um campo magnético atuando numa espira percorrida por corrente produz um movimento de rotação. 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.

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 figura (b) abaixo ilustra o uso da regra da mão direita para determinar a direção de \vec{n} .



Torque Total:

As forças F_2 e F_4 se cancelam e estão aplicadas ao longo do eixo de rotação da espira, logo o torque total produzido por elas também é zero. A situação é diferente para os lados 1 e 3, onde as forças formam um binário. O módulo τ' do torque produzido por elas é, portanto (figura c). Utilizando-se uma bobina com N espiras o torque total é incrementado por um fator N :

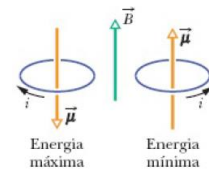
$$\tau' = \left(iab \frac{b}{2} \sin \theta \right) + \left(iab \frac{b}{2} \sin \theta \right) = iabB \sin \theta \rightarrow \text{bobina de } N \text{ espiras} \rightarrow \tau = N\tau' = NiabB \sin \theta = (NiA)B \sin \theta,$$

em que $A = ab$ é a área limitada pela bobina.

O Momento Dipolar Magnético e Energia Potencial Magnética

Uma bobina percorrida por corrente se comporta como um *dipolo magnético*. Além disso, para descrever o torque exercido sobre a bobina por um campo magnético, associamos um **momento dipolar magnético** μ à bobina. A direção de μ é a do vetor normal \vec{n} e seu módulo é $\mu = NiA$. O torque torna-se $\tau = \mu \times \mathbf{B}$, sua parte algébrica é $\tau = \mu B \sin \theta$, em que θ é o ângulo entre os vetores μ e \mathbf{B} .

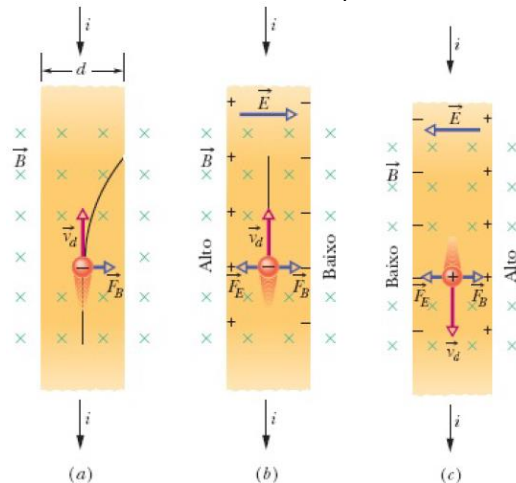
Já a energia potencial magnética é definida como $U(\theta) = -\mu \cdot \mathbf{B} = -\mu B \cos \theta$, que tem seu valor mínimo $U_{\min} = -\mu B$, que ocorre quando $\theta = 0^\circ$ e μ e \mathbf{B} estão alinhados ou paralelos, e valor máximo $U_{\max} = +\mu B$, que ocorre quando $\theta = 180^\circ$ e μ e \mathbf{B} estão desalinhados ou antiparalelos.



SUPLEMENTOS: EXEMPLOS DE ALTA TECNOLOGIA

1-Campos Cruzados: O Efeito Hall

Em 1879, Edwin H. Hall, na época um aluno de doutorado, de 24 anos, da Johns Hopkins University, descobriu uma propriedade, que mais tarde veio a ser conhecida como **efeito Hall**, permite verificar se os portadores de corrente em um condutor têm carga positiva ou negativa.



Elétrons se acumulam na borda direita da fita, deixando cargas positivas não compensadas na borda esquerda. A separação de cargas positivas e negativas produz um campo elétrico no interior da fita que aponta para a direita na figura (b). O campo exerce uma força sobre os elétrons que tende a desviá-los para a esquerda e, portanto, se opõe à força magnética. Os elétrons continuam a se acumular na borda direita da fita até que a força exercida pelo campo elétrico equilibre a força exercida pelo campo magnético. Quando isso acontece, as forças têm módulos iguais e sentidos opostos. Os elétrons passam a se mover em linha reta em direção ao alto do desenho com velocidade v_d e o campo elétrico para de aumentar. (c) Para o mesmo sentido da corrente, se os portadores de corrente fossem positivos, eles tenderiam a se acumular no lado direito, que ficaria com um potencial maior.

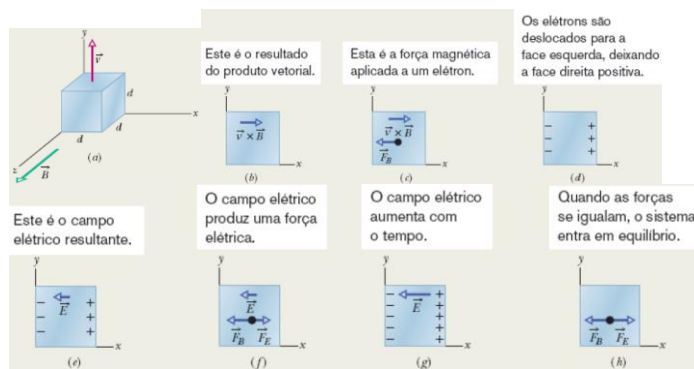
Diferença de potencial de Hall $\rightarrow V = E d$.

Equilíbrio dos campos $\rightarrow e E = e v_d B \rightarrow v_d = E/B$.

De acordo com a Eq. 26-7 $\rightarrow v_d = i/(neA) \rightarrow n = Bi/(Vle)$, onde $l = A/d$, A é a área da seção reta da fita e d sua largura.

Exemplo 28.02 Diferença de potencial em um condutor em movimento

A Fig. 28-9a mostra um cubo de metal de aresta $d = 1,5$ cm que se move no sentido positivo do eixo y com uma velocidade constante de módulo $4,0$ m/s. Na região existe um campo magnético uniforme 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 o potencial é maior por causa da influência do campo magnético? (b) Qual é a diferença de potencial entre as faces de maior e menor potencial elétrico?



(a) O cubo contém elétrons de condução que estão livres para se mover. Alguns são desviados pela força na direção da face esquerda do cubo, o que torna essa face negativamente carregada e deixa a face da direita positivamente carregada. Assim, o potencial da face esquerda é menor e o potencial da face direita é maior.

(b) No equilíbrio $|q|E = |q|vB \sin 90^\circ = |q|vB \rightarrow$

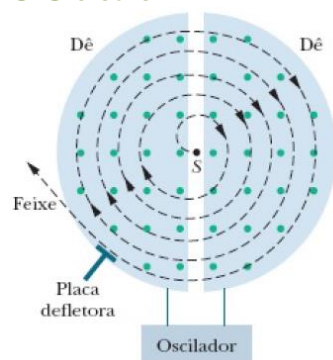
$$E = vB \rightarrow V = Ed \rightarrow V = vBd \rightarrow$$

$$V = (4,0 \text{ m/s})(0,050 \text{ T})(0,015 \text{ m}) = 3,0 \text{ mV}.$$

2-Cíclotrons e Síncrotrons

Feixes de partículas de alta energia, como elétrons e prótons, tem sido imensamente úteis para os estudos de átomos e núcleos que têm por objetivo conhecer a estrutura fundamental da matéria. 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



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.

No instante em que o próton chega ao espaço central, proveniente do dê da esquerda, a diferença de potencial entre os dois dês é 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 a 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 dês.

Condição de ressonância: $f = |q|B/2\pi m = f_{\text{osc}}$. A frequência f com a qual a partícula circula sob o efeito do campo magnético deve ser igual à frequência f_{osc} do oscilador elétrico. O valor de B é ajustado até que essa condição seja satisfeita.

O cíclotron convencional funciona bem apenas para velocidades muito menores que a velocidade da luz, com uma energia menor que 50 MeV. Para velocidades acima de 10% da velocidade da luz, as partículas se atrasam em relação à frequência do oscilador 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, o que exigiria um ímã de tamanho descomunal, ocupando uma área da ordem de $4 \times 10^6 \text{ m}^2$.

er os dois problemas do cíclotron convencional. Em vez de possuírem valores fixos, 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, a frequência de revolução das partículas permanece em fase com a frequência do oscilador; as partículas descrevem uma trajetória circular em vez de espiral. Isso significa que o campo magnético precisa cobrir uma área bem menor, correspondente a essa trajetória. Mesmo assim, no caso de partículas de alta energia, o raio da trajetória deve ser muito grande. Esse sistema é utilizado em aceleradores modernos, como o LHC do CERN.

Exemplo 28.05 Aceleração de uma partícula carregada em um cíclotron

A frequência do oscilador de um cíclotron é 12 MHz e o raio dos dês é $R = 53 \text{ cm}$. (a) Qual é o módulo do campo magnético necessário para acelerar dêuterons nesse cíclotron? A massa do dêuteron é $m = 3,34 \times 10^{-27} \text{ kg}$ (duas vezes maior que a massa do próton). (b) Qual é a energia cinética dos dêuterons acelerados pelo cíclotron?

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

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

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

(b) ($> 10\%$ da velocidade da luz). \rightarrow

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(3,34 \times 10^{-27} \text{ kg})(3,99 \times 10^7 \text{ m/s})^2 = 2,7 \times 10^{-12} \text{ J, ou cerca de 17 MeV.}$$

Vejam os vídeos ilustrativos na playlist “onde os campos atuam” no YouTube.