

CAMPO MAGNÉTICO e FORÇA MAGNÉTICA (Cap. 28)

Introdução

Uma barra de plástico carregada (por ex. por atrito) gera um campo (vetorial) elétrico em todos os pontos ao seu redor.

Semelhantemente, um ímã produz um campo (vetorial) magnético, ao seu redor.

exemplos de ímã: ímãs permanentes (feitos de material imantado) como os ímãs de geladeira, eletroímã.

Temos uma relação:

carga el. $\leftrightarrow \vec{E} \leftrightarrow$ carga el.

"cargas elétricas criam um campo elétrico, o qual por sua vez exerce uma força elétrica sobre uma outra carga (de prova por ex.) colocada no campo.

A simetria, ferramenta muito usada na física, sugere que:

carga magn. $\leftrightarrow \vec{B} \leftrightarrow$ carga magn. ~~ERRADO~~

tudo indica que NÃO EXISTE cargas magnéticas i.e. objetos pontiformes isolados dos quais emergem linhas de campo magnético. Precisamente:

Os ímãs sempre vem com dois polos, "norte" e "sul". Nunca se encontrou um polo magnético isolado ou carga magnética.

\Rightarrow DE ONDE VEM O CAMPO MAGNÉTICO?

A experiência mostra que o campo magnético vem de cargas elétricas em movimento.

Uma carga el. cria um campo el., quer ela esteja em repouso, quer em movimento. Mas se cria um campo magnético se ela estiver em movimento.

Num ímã permanente, é o movimento coordenado de alguns elétrons dos átomos que produz o campo magnético. Num eletroímã, são os elétrons que se movem através da bobina.

Assim:

carga em mov.^{to} $\xrightarrow{(1)}$ \vec{B} $\xrightarrow{(2)}$ carga em mov.^{to}

Uma carga em movimento ou corrente cria um campo magnético. (2) Se colocarmos uma carga em movimento ou fio com corrente num campo magn., uma força magnética atua sobre ele.

Por enquanto, falaremos da parte (2). A parte (1) será vista mais tarde.

Exemplos de ímãs

ímã permanente →



eletroímã ↓

(= bobina com núcleos de ferro de ferro, precisa de corrente)



Fig. 30-1 Aparas metálicas separadas por um eletroímã numa usina siderúrgica.



Fig. 30-2 Eletroímãs usados num acelerador de partículas para curv e focalizar um feixe de partículas carregadas.

A definição de \vec{B}

136

\vec{E} em um ponto, foi definido colocando uma carga de prova q_0 pequena, positiva, neste ponto. A força sobre q_0 é $\vec{F}_E = q_0 \vec{E}$ - definimos $\vec{E} = \frac{\vec{F}_E}{q_0}$.
Se tivéssemos monopólos magn., poderíamos fazer a mesma coisa p/ definir \vec{B} , mas não os temos.
 \Rightarrow Temos que definir \vec{B} em termo da força magn. exercida sobre uma carga em movimento.

Para conhecer \vec{B} num ponto, lançamos uma carga- teste através do ponto, várias vezes, mudando sua velocidade em módulo, direção e sentido, e determinamos a força \vec{F}_B em cada caso. Concluímos que \vec{F}_B pode ser escrita como:

$$\vec{F}_B = q \vec{v} \wedge \vec{B}$$

força sobre a carga carga + ou - velocidade da carga campo magn.

Isto define \vec{B} em módulo, direção e sentido.

Obs. (i) $|\vec{F}_B| = |q v B \sin \phi|$

(ii) $|\vec{F}_B| = 0$ se $\vec{v} \parallel \vec{B}$ ou anti- \parallel ($\phi = 0$ ou π)

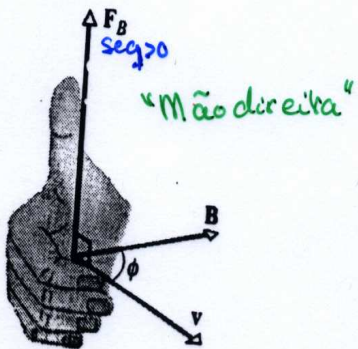
(iii) $|\vec{F}_B|$ é máxima se $\vec{v} \perp \vec{B}$ ($\phi = \pm \pi/2$)

(iv) \vec{F}_B é \perp \vec{v} e \vec{B}

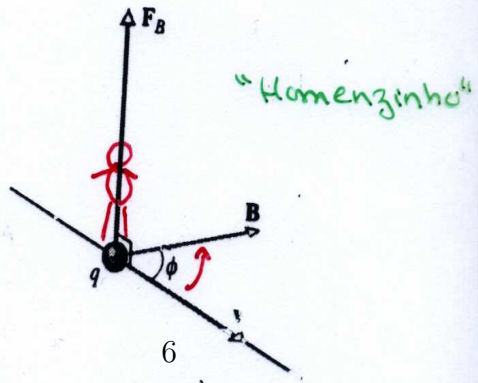
(v) A força magn. sobre q está oposta a da força sobre $-q$ se ambas se movem com o mesmo \vec{v} .

Regras de orientação

Para $\vec{F}_B = q\vec{v} \wedge \vec{B}$



- 1) Dedos da mão direita apontando na direção de \vec{v}
- 2) Curvar eles na direção de \vec{B}
- Polegar aponta na direção de \vec{F}_B



- 1) Homenzinho em pé sobre o plano (\vec{v}, \vec{B})
- 2) Se \vec{v} vai para \vec{B} no sentido anti-horário, o homenzinho aponta na direção de \vec{F}_B

O sentido de \vec{F}_B se inverte quando q troca de sinal

136

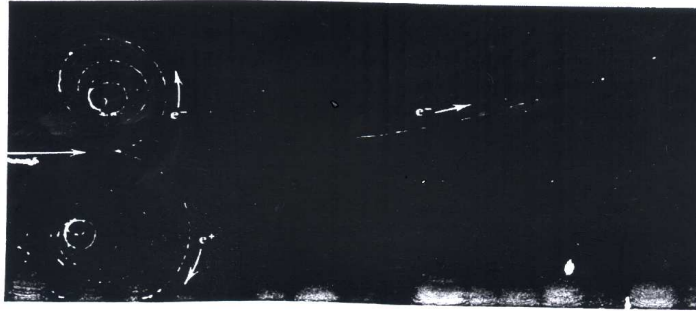
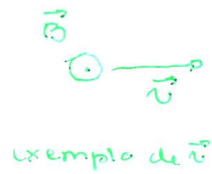


Fig. 30-6 Os traços de dois elétrons (e^-) e um pósitron (e^+) numa câmara de bolha que está imersa num campo magnético que aponta para fora do plano da figura.



$$\begin{aligned} \uparrow \vec{F}_e &= -e\vec{v} \wedge \vec{B} \\ \downarrow \vec{F}_{e^+} &= e\vec{v} \wedge \vec{B} \end{aligned}$$

forças para e^+ e e^-

consequencia: as trajetórias de e^+ e e^- são espirais que se enrolam de modo oposto

Há diferenças importantes entre as forças elétricas e as magnéticas:

ii) a força el. está sempre na direção do campo el., a força magn. é perpendicular à direção do campo magn.

iii) a força el. atua sempre sobre uma carga, a força magn. atua somente quando a carga estiver em mov.º

iv) a força el. realiza trabalho ao deslocar uma partícula carregada, a força magn. não efetua trabalho: $dW_m = \vec{F}_m \cdot d\vec{l} = \vec{F}_m \cdot \vec{v} dt = 0$
⇒ quando a carga se move em um campo magn., a vel. pode mudar de direção mas não de módulo (caso contrário, a en-cinética mudaria mas sabemos que $\Delta K = W$).

A unidade de \vec{B} no S.I. é o Tesla:

$$1 T = 1 \frac{N}{C \cdot m/s} = 1 \frac{N}{A \cdot m}$$

Outra unidade (não S.I.) comum é o Gauss

$$1 T = 10^4 G$$

Se uma carga q de vel. \vec{v} viaje numa região onde há um campo el. e um magn., a força sobre ela é:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

(força de Lorentz)

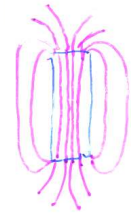
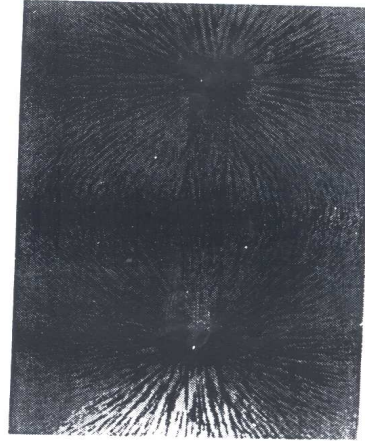
Ordem de grandeza para B :
exemplos

Alguns Campos Magnéticos*

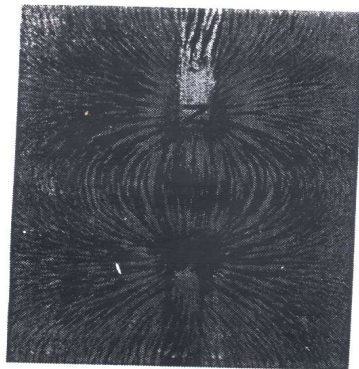
Na superfície de uma estrela de nêutrons (calculada)	10^8 T
Um eletroímã	1,5 T
Próximo a uma pequena barra imantada	10^{-2} T
Na superfície da Terra	10^{-4} T
No espaço interestelar	10^{-10} T
O menor valor numa sala magneticamente blindada	10^{-14} T

*Valores aproximados.

Linhas de campo magnético



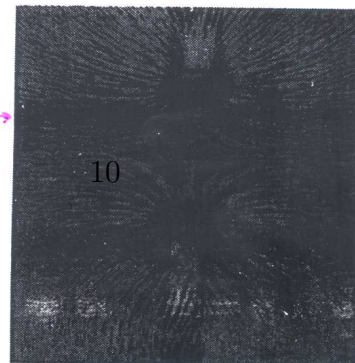
Configuração do campo magnético de uma barra imantada, evidenciada por limalha de ferro sobre uma folha de papel. (Cortesia de Henry Leap e Jim Lehman)



← atração

repulsão →

Configuração do campo magnético de duas barras imantadas, evidenciada por limalha de ferro. Esta configuração é a do campo magnético entre pólos contrários. (Cortesia de Henry Leap e Jim Lehman)



10

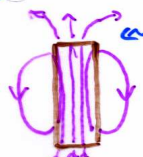
Configuração do campo magnético entre dois pólos iguais

linhas de campo magn. e fluxo magn.

- As linhas de campo magn. são definidas de maneira semelhante as do campo el.
- (i) direção tangente a \vec{B}
- (ii) sentido de \vec{B}
- (iii) espaçamento proporcional a $|\vec{B}|$
- Elas podem ser visualizadas com limalha de ferro como mostrado na transparência.

Notamos que:

(i) Para uma barra imantada:



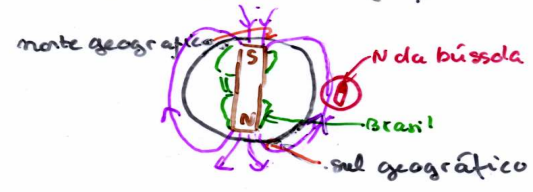
as linhas emergentes \equiv pôlo N

as linhas entrando \equiv pôlo S

(há mais linhas nos pólos $\Rightarrow |\vec{B}|$ maior)

(ii) pólos contrários se atraem e iguais se repelem.

- A própria terra é um ímã: seu pólo N geográfico está próximo do pólo S magn. \Rightarrow o pólo N da agulha da bússola (= ímã pequeno) aponta para o N geográfico (com um pequeno desvio chamado declinação magn.)



(137)

Podemos definir o fluxo magn. através de uma superfície qualquer S:

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

A unidade de Φ_B é o Weber: $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$

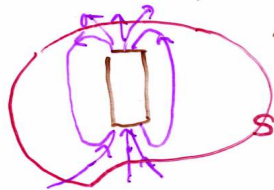
Enquanto $\Phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{\text{enc}}}{\epsilon_0}$ p/S fechada

$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Lei de Gauss do magnetismo

pois não existe monopólo magn.

Uma consequência disto é que as linhas de campo de \vec{B} tem que ser fechadas (todas as linhas que entram, saem)



Movimento de partículas carregadas em um campo magnético (13)

CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME com $\vec{v} \perp \vec{B}$

Como vimos que $\vec{F} \perp \vec{v}$ e \vec{v} só muda de sentido não de módulo, o movimento é circular uniforme



$$F_B = |q|vB = m\frac{v^2}{r}$$

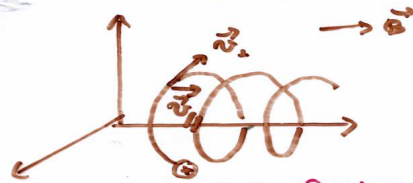
$$\Rightarrow r = \frac{mv}{|q|B}$$

a frequência angular é: $\omega = \frac{v}{r} = \frac{|q|B}{m}$

exemplo de aplicação: na transparência com os elétrons e o positron na câmara de bolha, as partículas perdem energia $\Rightarrow v \downarrow$ e $r \downarrow \Rightarrow$ as trajetórias são espirais.

CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME com \vec{v} QUALQUER

Há superposição do movimento circular no plano $\perp \vec{B}$ com raio $r = \frac{mv_{\perp}}{|q|B}$ e um movimento de translação $\parallel \vec{B}$ com vel. constante v_{\parallel}



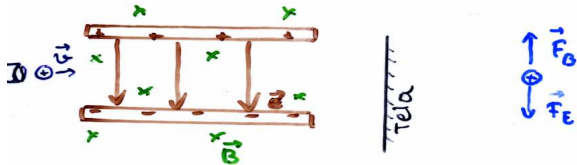
CAMPO MAGNÉTICO QUALQUER: pode haver aprisionamento

A carga é refletida p/ tras e p/ frente p/ as extremidades \vec{F} aponta p/ o centro da garrafa.

exemplos de aplicação: confinamento de plasma (= gás quente), cinturões de van Allen da terra que confina cargas vindas do sol (\Rightarrow aurora boreal/austral).

Movimento de partículas em campos elétrico e magnético (139)

SELETOR DE VELOCIDADE: \vec{E} e \vec{B} cruzados



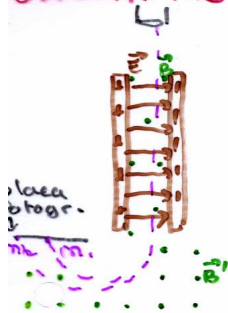
- (i) Quando $\vec{E} = \vec{B} = 0$, notar a posição do feixe na tela
- (ii) Se $\vec{E} \neq 0$, $\vec{B} = 0$, teria um movimento parabólico
- (iii) Pode-se ajustar \vec{E} e \vec{B} de modo que $F_B + F_E = 0$ (a partícula segue uma linha) $\Leftrightarrow qE = qvB \Leftrightarrow v = \frac{E}{B}$ a trajetória é reta

EXPERIÊNCIA DE THOMSON P/ MEDIR e/m

Elétrons de uma fonte são acelerados por um adp: $eV = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$ e passam por campos \vec{E} e \vec{B} cruzados, os que tem trajetória retilínea satisfazem $v = \frac{E}{B}$, assim $\frac{e}{m} = \frac{E^2}{2VB^2}$

(Obs Thomson descobriu o elétron com isto ^{em 1897} pois várias fontes haviam o mesmo e/m)

ESPECTRÔMETRO DE MASSA



Primeiro tem um seletor de vel. a fim de bloquear todos os ions exceto aqueles com $v = E/B$. Depois só tem um campo magn. $\vec{B} \perp \vec{v} \Rightarrow$ os ions se movem sobre arcos circulares com $R = mv/qB \Rightarrow$ ions com massas diferentes caidem em lugares diferentes da placa fotográfica.

14

isto pode ser usado p/ estudar isótopos.

Exemplos:

146

① O campo magnético numa certa região é $\vec{B} = (4\hat{x} - 11\hat{y})\text{T}$. Um elétron se move no campo com $\vec{v} = (-2\hat{x} + 3\hat{y} - 7\hat{z})\text{m/s}$. \vec{F}_B ?

$$\begin{aligned} \vec{F}_B &= -e (-2\hat{x} + 3\hat{y} - 7\hat{z}) \wedge (4\hat{x} - 11\hat{y}) \\ &= -e \left(\underbrace{22}_{+3} \hat{x} \wedge \hat{y} + \underbrace{12}_{-3} \hat{y} \wedge \hat{x} - \underbrace{28}_{+7} \hat{z} \wedge \hat{x} + \underbrace{77}_{-2} \hat{z} \wedge \hat{y} \right) \\ &= +e (10\hat{z} + 28\hat{y} + 77\hat{x}) \end{aligned}$$

② Um próton com $v_x = 1,5 \cdot 10^5 \text{m/s}$, $v_y = 0$ e $v_z = 2,0 \cdot 10^5 \text{m/s}$ em $z=0$ entra numa região com $\vec{B} = 0,500\text{T}\hat{z}$.

a) \vec{F}_B em $t=0$?

b) raio da trajetória helicoidal, vel. ang. do próton e passo da hélice (= dist. percorrida ao longo do eixo da hélice durante uma revolução)

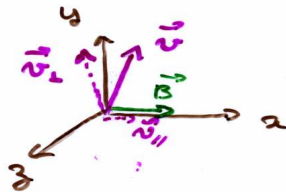
a) $\vec{F}_B = e \vec{v} \wedge \vec{B}$ com $\vec{v} = v_x \hat{x} + v_z \hat{z} \Rightarrow \vec{F}_B = e v_z B \hat{y} = (1,60 \cdot 10^{-14} \text{N}) \hat{y}$
 $\vec{B} = B \hat{z}$

b) $F_B = e v_{\perp} B = m \frac{v_{\perp}^2}{r} \Rightarrow r = \frac{m v_{\perp}^2}{e B} = 4,18 \text{ mm}$ ($v_{\perp} = v_x$)
 $v_{\perp} = v_x = v_z$

$\omega = \frac{v_{\perp}}{r} = \frac{e B}{m} = 4,79 \cdot 10^8 \text{ rad/s}$

passo: $\frac{v_z}{\omega} T$ com $T = \frac{2\pi}{\omega}$ período ($v_{\parallel} = v_z$)

= 19,7 mm



EXERCÍCIOS SOBRE CAMPO MAGN. E FORÇA MAGN.

(141)

Um elétron no ponto A na figura possui velocidade $v_0 = 1,41 \times 10^6 \text{ m/s}$. Determine:

a) o módulo, direção e sentido do campo magnético que obriga o elétron a descrever uma órbita semicircular de A a B.

b) o tempo necessário para que o elétron se desloque de A a B.



522 29.13