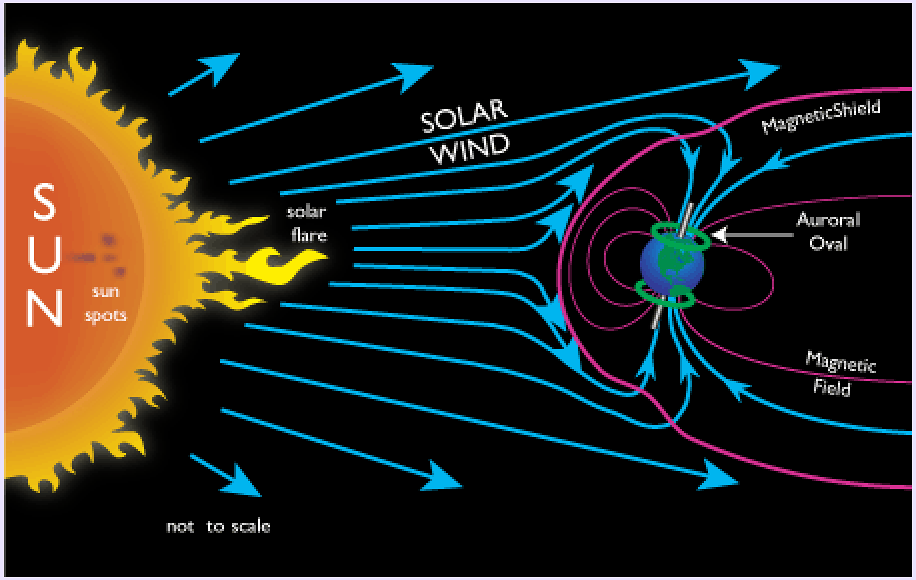
Campo Magnética



Prof. Fábio de Oliveira Borges

Curso de Física II

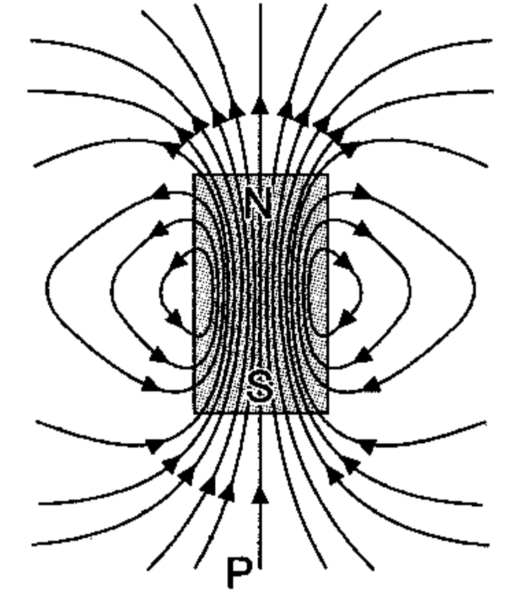
Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense

Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

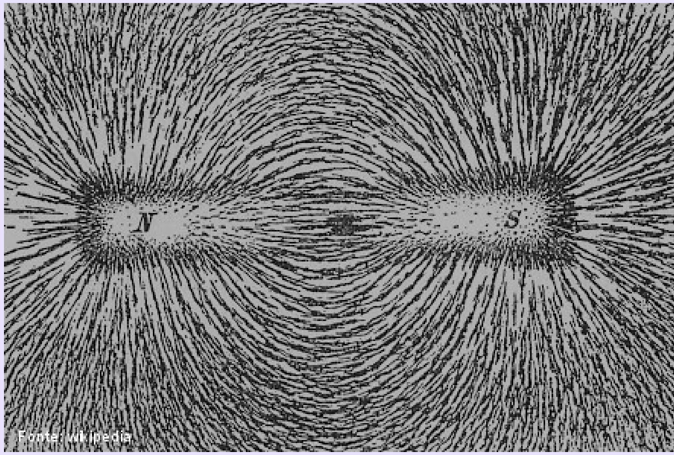
http://cursos.if.uff.br/fisica2-2015/

INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Campo magnético



- **Pólos norte(N) e Sul(S)**
- **Pólos de mesmo nome (N e N ou S e S) se repelem**
- **Pólos de nomes diferentes (N e S) se atraem**



Força elétrica $\vec{F_E} \propto \frac{1}{r^2}$

$$\vec{F_E} = K\frac{q_+q_-}{r^2}$$

Força magnética $\vec{F_B} \propto \frac{1}{r^2}$

$$\vec{F_B} = K_B\frac{q_N q_S}{r^2} \; ????$$

"Se pode descrever o magnétismo como a eletrostática?"

Campo magnético

- **Não é possível separar os pólos norte e sul de um imã**

Não existe monopolos magnéticos (carga magnética)

barra magnética → **análogo a um dipolo elétrico** → **descrita como um dipolo magnético**

posição de equilíbrio de um dipolo elétrico → alinhado com o campo → o mesmo vale para um dipolo magnético

- Podemos realizar a ideia de um dipolo magnético com uma agulha imantada e usa-la para mapear a direção e o sentido de um campo magnético qualquer.

Convenção: o campo magnético aponta do pólo norte para o pólo sul

A força magnética

Vamos tentar uma analogia entre $\vec{E}$ e $\vec{B}$

$\vec{F} = q\vec{E}$ ⇨ O campo elétrico, E, atua sobre uma carga elétrica

Não existe uma carga magnética

$\vec{F} = q\vec{B}$?

O campo magnético não atua sobre uma carga elétrica de prova estática

“o campo magnético só exerce força sobre cargas em movimentos”

A força magnética

Resultados experimentais com partículas carregadas em movimento num campo magnético:

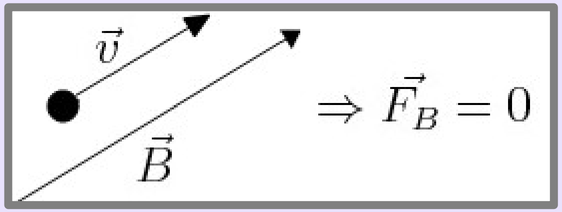
1) A força magnética é proporcional a carga, *q*, e ao módulo da velocidade, *v*, da partícula.

$$\boxed{|\vec{F}_B| \propto q|\vec{v}|}$$

2) O módulo da força magnética é proporcional ao módulo do campo magnético.

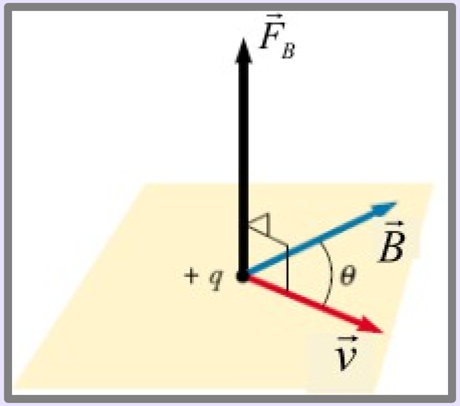
$$\boxed{|\vec{F}_B| \propto |\vec{B}|}$$

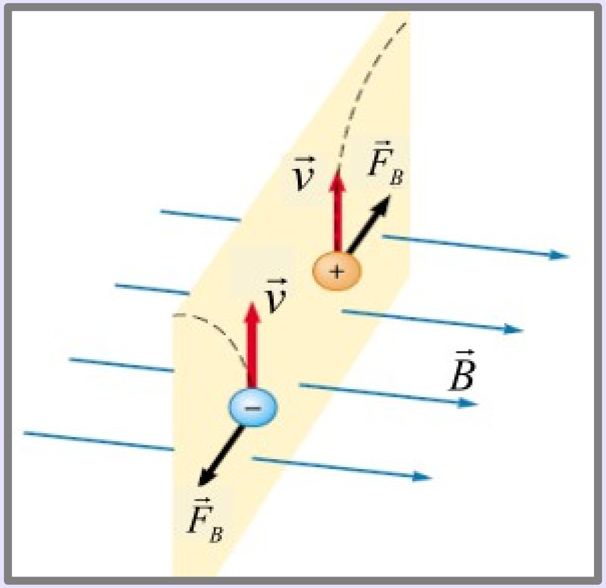
3) Quando uma partícula carregada se move numa direção paralela ao vetor campo magnético, ***B***, a força magnética, $\boldsymbol{F_B}$, sobre a partícula é nula.



A força magnética

4) Quando o vetor velocidade fizer um ângulo, θ,com o campo magnético, a força magnética atua numa direção perpendicular a velocidade, ***v***, ao campo magnético, ***B***; isto é, $\boldsymbol{F_B}$ é perpendicular ao plano definido por ***v*** e ***B***.





5) A força magnética sobre uma carga positiva está na direção oposta à direção da força sobre uma carga negativaque se mova com o mesmo vetor velocidade ***v***.

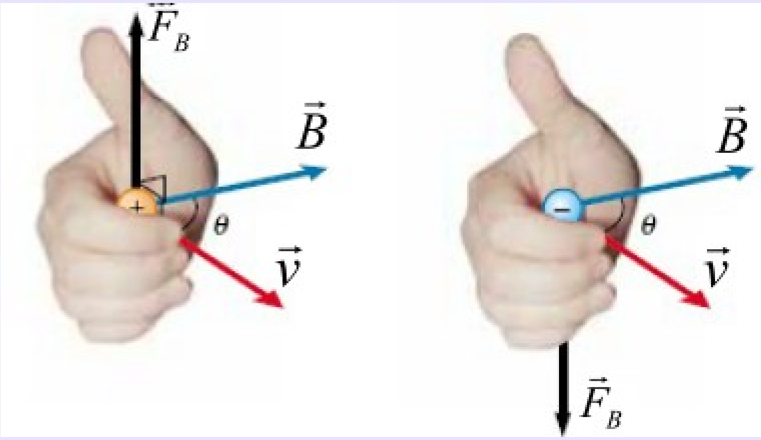
A força magnética

6) Se o vetor velocidade fizer um ângulo, θ, com o vetor campo magnético, o módulo da força magnética é proporcional ao seno deste ângulo.

$$\boxed{|\vec{F}_B| \propto sen\theta}$$

$$\boxed{\Rightarrow |\vec{F}_B| = Kq|\vec{v}||\vec{B}|sen\theta}$$

K $\rightarrow$ C^{te} positiva que depende do sistema de unidade, no SI K=1.



$$\Rightarrow |\vec{F}_B| = q|\vec{v}||\vec{B}|sen\theta$$

$$\boxed{\Rightarrow \vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}}$$

Força magnética

A força magnética

Unidade no SI $\Rightarrow 1T(Tesla) = \dfrac{1N/C(Newton/Coulomb)}{1m/s(metro/segundo)}$

A unidade Gauss (G) no CGS é muito usada na física.

$$\Rightarrow 1G(Gauss) = 10^{-4}T(Tesla)$$

Se, além de um campo magnético, tivermos um campo elétrico atuando sobre a partícula, a força total fica dada por:

$$\boxed{\Rightarrow \vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}}$$

conhecida como força de Lorentz

Trabalho realizado pela força de Lorentz

Uma carga q sofre um deslocamento $d\vec{l}$ durante um intervalo de tempo infinitesimal $dt \Rightarrow d\vec{l} = \vec{v}dt$

$$dW = \vec{F}.d\vec{l}$$

$$dW = \vec{F}.\vec{v}dt$$

$$dW = q\vec{E}.\vec{v}dt + q(\vec{v} \times \vec{B}).\vec{v}dt$$

$q(\vec{v} \times \vec{B}) =$ Um vetor que é perpendicular a $\vec{v}$ $\quad \vec{F_B} \perp \vec{v} \Rightarrow \vec{F_B}.\vec{v} = 0$

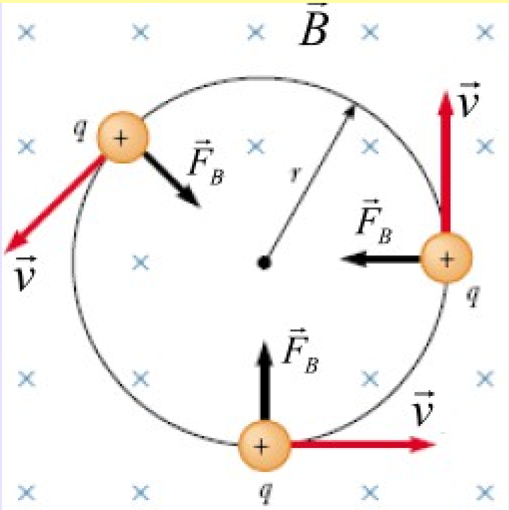
$$\boxed{\Rightarrow P = \frac{dW}{dt} = q\vec{E}.\vec{v}}$$

$\rightarrow$ A potência se deve exclusivamente ao campo elétrico

"O campo magnético não realiza trabalho, porque a força magnética é sempre perpendicular à velocidade da partícula"

A energia cinética de uma partícula carregada num campo magnético permanece constante.

Movimento de uma partícula carregada num campo magnético



Campo magnético não realiza trabalho ⇨ Altera a direção da velocidade, porém não afeta seu módulo

$$como\ \vec{F_B} \perp \vec{v} \Rightarrow |\vec{v}| = C^{\underline{te}} \Rightarrow MCU$$

$$\vec{F_B} = \vec{F_C}$$

$$qvB = m\frac{v^2}{r}$$

$$\boxed{r = \frac{mv}{qB}}$$ ← raio de Larmor

$$\boxed{T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}}$$ ← período do movimento circular

$$\boxed{f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m} \Rightarrow \omega = 2\pi f = \frac{qB}{m}}$$ ← frequência de cíclotron

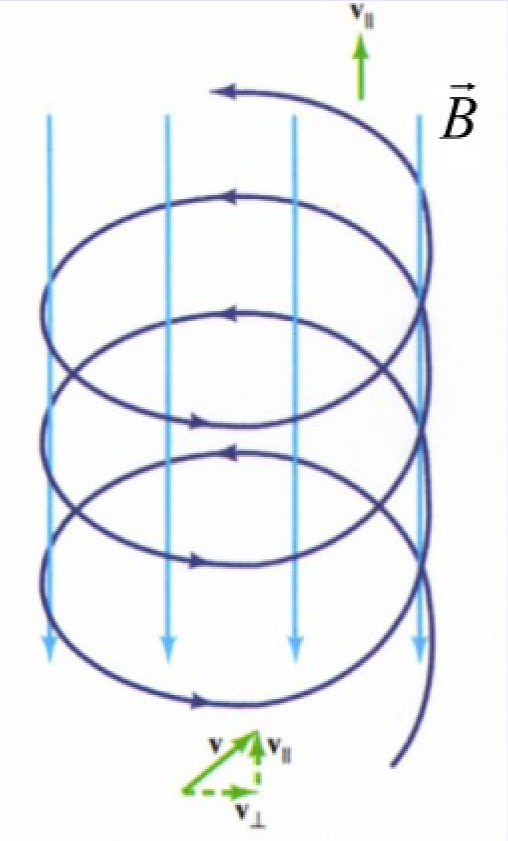
Note que *T* e *f* são independentes de *v* e *r*.

Movimento de uma partícula carregada num campo magnético

$$velocidade: \ \vec{v} = v_{//} + v_{\perp} \ \ (em\ relao\ a\ \vec{B})$$

$$v_{\perp} \Rightarrow movimento\ circular$$

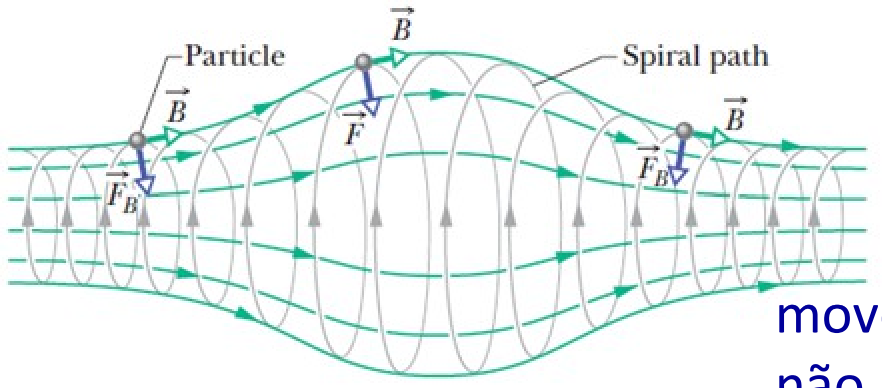
$$v_{//} \Rightarrow constante(força\ magnética\ nula)$$



Resultado: trajetória <u>helicoidal</u> da partícula

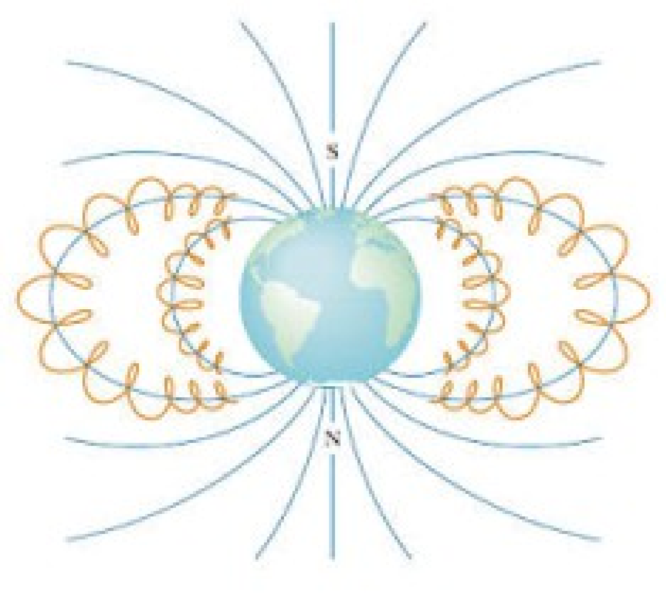
$$\boxed{Passo: \ d = v_{//}T = \frac{2\pi m}{|q|B} v_{//}}$$

Movimento de uma partícula carregada num campo magnético



Garrafa Magnética:

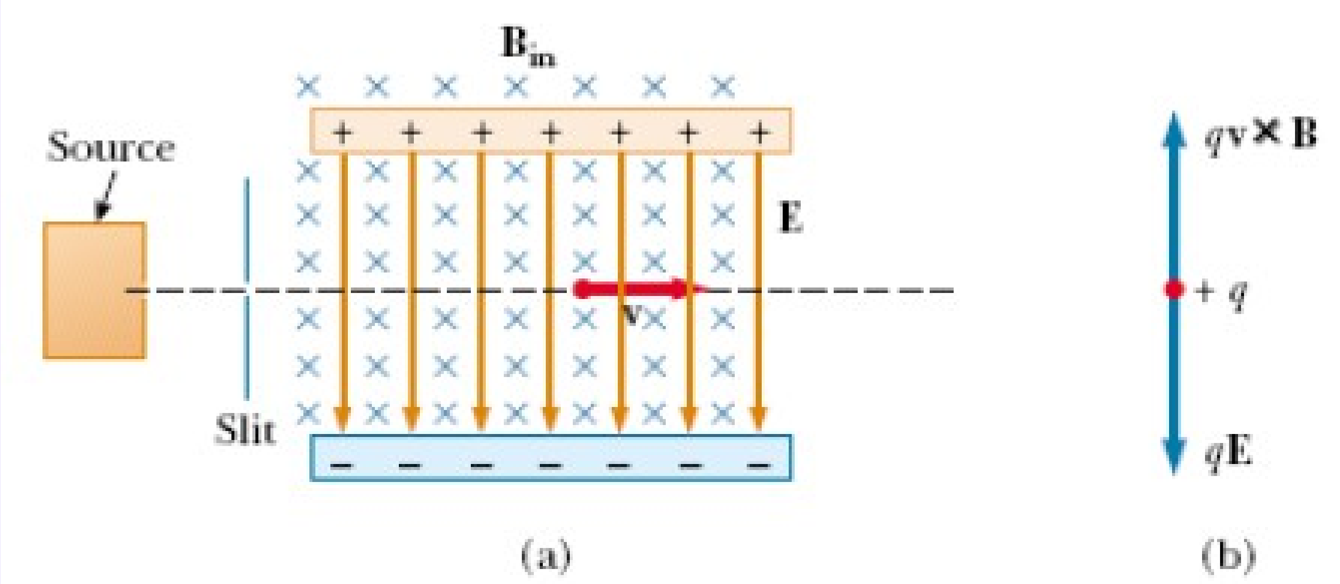
Quando uma partícula carregada se move em espiral em um campo magnético não uniforme, que é mais forte em ambas as extremidades e mais fraco no meio, ela fica aprisionada e se desloca para frente e para trás em uma trajetória espiral em torno das linhas de campo.



Desta maneira, elétrons e prótons ficam aprisionados pelo campo magnético terrestre não-uniforme, formando os cinturões de radiação de Van Allen.

Filtro de velocidade

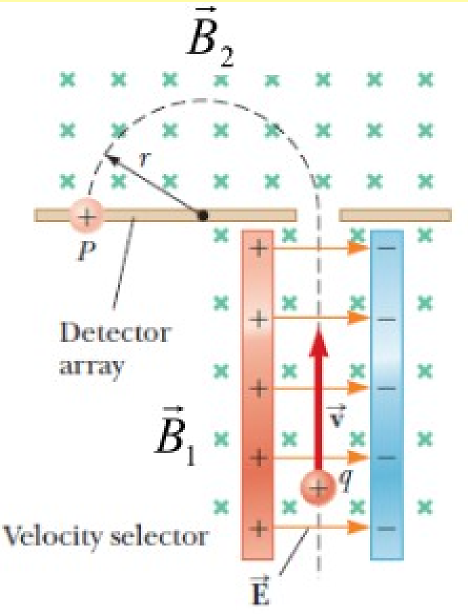
Vamos analisar agora uma partícula carregada positivamente atravessando uma região com campos magnético e elétrico uniformes e cruzados.



Se as duas forças forem equilibradas a partícula não sofre desvio. $\Rightarrow qE = qvB$

$$\boxed{v = \frac{E}{B}}$$ $\leftarrow$ velocidade da partícula ao sair da região de campo

Espectrômetro de massa

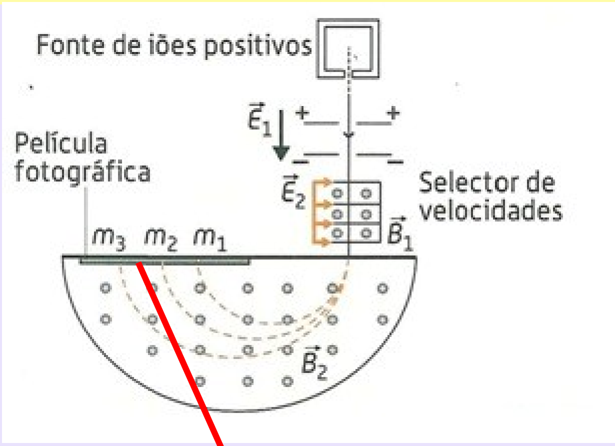


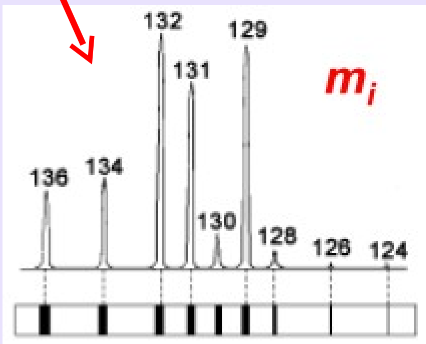
I) o íon entra no filtro de velocidade

$$v = \frac{E}{B_1}$$

II) o íon é injetado numa região de campo magnético uniforme se movendo em um círculo com o raio de Larmor.

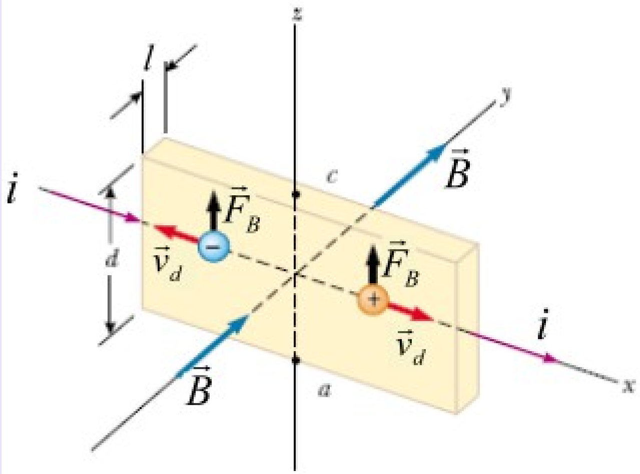
$$r = \frac{mv}{qB_2}$$





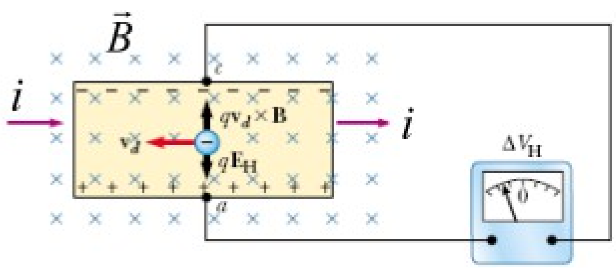
$$\Rightarrow m_i = qB_2 \frac{B_1}{E} r_i$$

Efeito Hall



Um condutor achatado conduz uma corrente na direção x e um campo magnético é aplicado na direção y. A corrente pode ser devida tanto a portadores <u>positivos</u> movendo-se para <u>direita</u> como portadores <u>negativos</u> movendo-se para a <u>esquerda</u>.

Medindo-se a <u>ddp de Hall</u> (V_H) entre os pontos *a* e *c*, pode-se determinar o <u>sinal</u> e a <u>densidade volumétrica</u> (*n*) dos portadores.

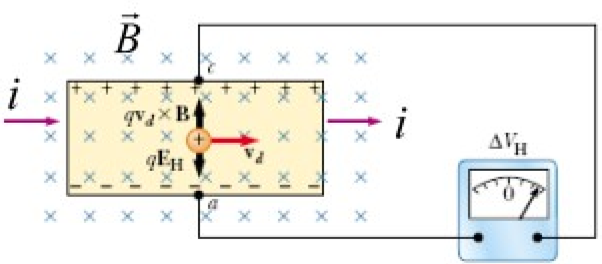


$$equil\acute{\imath}brio \Rightarrow qv_dB = qE_H \Rightarrow E_H = v_dB$$

$$largura\ da\ fita \rightarrow d \Rightarrow V_H = E_H d$$

$$\Rightarrow V_H = E_H d = v_d B d$$

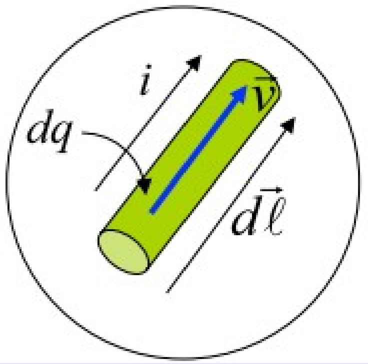
$$como:\ \ i = nqv_dA\ onde\ A = ld, \acute{a}rea\ da\ fita$$



$$\Rightarrow V_H = \frac{iBd}{nqA} = \frac{iB}{nql}$$

$$\boxed{\Rightarrow B = \underbrace{(nql)}_{a}\frac{V_H}{i} = a\frac{V_H}{i}}$$

Força magnética sobre uma corrente



$\leftarrow$ Fio metálico condutor onde os portadores de carga são os elétrons.

$-e\vec{v_d} \times \vec{B} \longrightarrow$ Força média sobre cada elétron livre do condutor.

$\Rightarrow \vec{f} = -ne\ \vec{v_d} \times \vec{B}$ $\leftarrow$ força por unidade de volume exercida pelo campo magnético. (densidade de força)

nº de portadores de carga por unidade de volume no condutor.

Lembrando que: $\vec{j} = -ne\vec{v_d}$ $\quad \Rightarrow \vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}$

Assim, para encontrarmos a força total, *dF*, exercida sobre os elétrosn livres contidos no infinitesimal de volume *Adl*, fazemos:

$$d\vec{F} = \vec{f} Adl = \vec{j} Adl \times \vec{B}$$

Força magnética sobre uma corrente

$$como: \; j = \frac{i}{A} \Rightarrow d\vec{F} = i d\vec{l} \times \vec{B}$$

$i d\vec{l} \longrightarrow$ elemento de corrente

$d\vec{l} \longrightarrow$ é um vetor que aponta no sentido da corrente e seu módulo é igual ao tamanho do trecho de fio considerado.

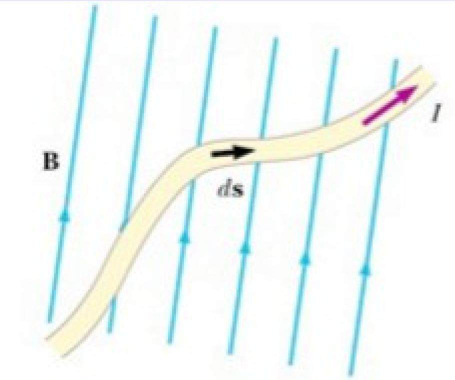
$d\vec{F} \longrightarrow$ Força exercida pelo campo magnético sobre o trecho *dl* do fio.

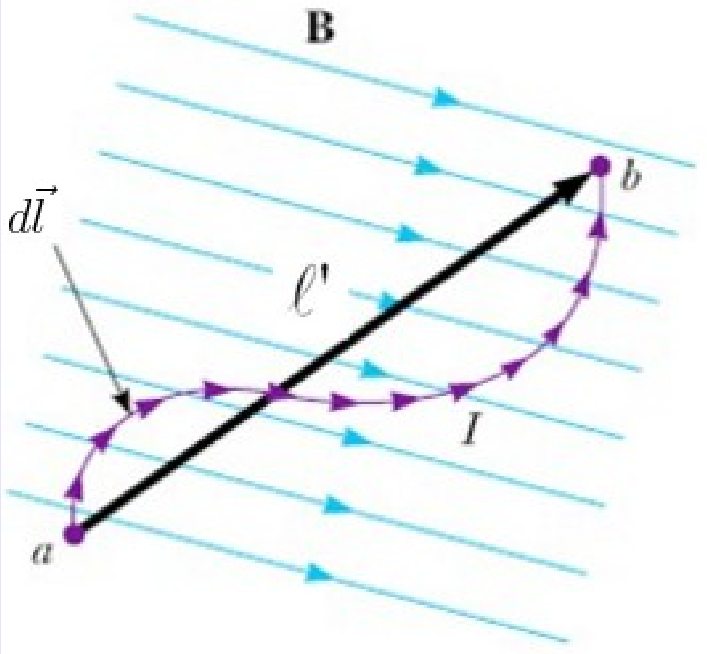
$$\boxed{\vec{F}_B = i \int_i^f d\vec{l} \times \vec{B}}$$

Força sobre um pedaço de fio.

Força magnética sobre uma corrente

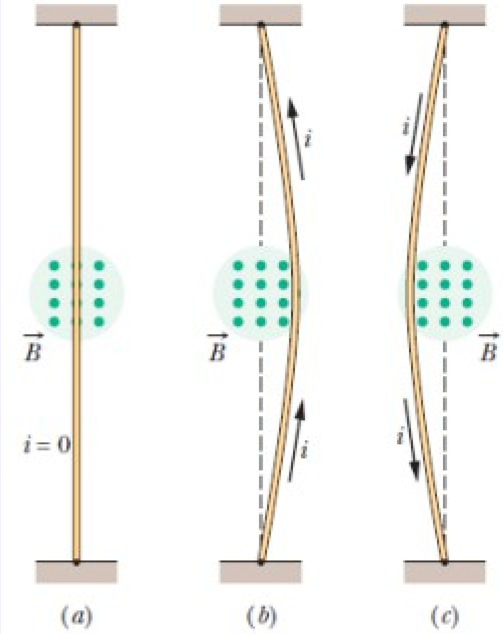
I) pedaço de um fio curvo num campo magnético





$$\vec{B} = C^{\underline{te}}$$

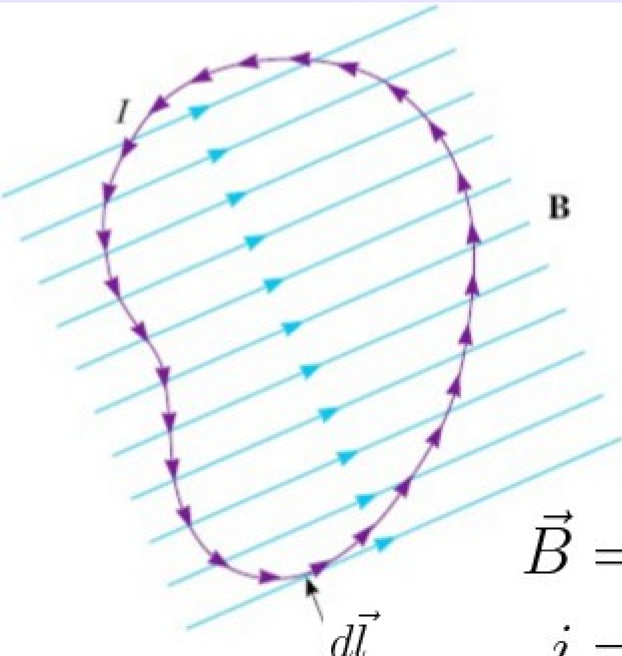
$$i = C^{\underline{te}}$$



$$\vec{F} = i\left(\int_i^f d\vec{l}\right) \times \vec{B}$$

$$\boxed{\Rightarrow \vec{F} = i\vec{l'} \times \vec{B}}$$

Força magnética sobre uma corrente



$$\vec{B} = C^{\underline{te}}$$

$$i = C^{\underline{te}}$$

II) circuito fechado num campo magnético

$$\Rightarrow \vec{F} = i \underbrace{\left(\oint_C d\vec{l} \right)}_{=0} \times \vec{B}$$

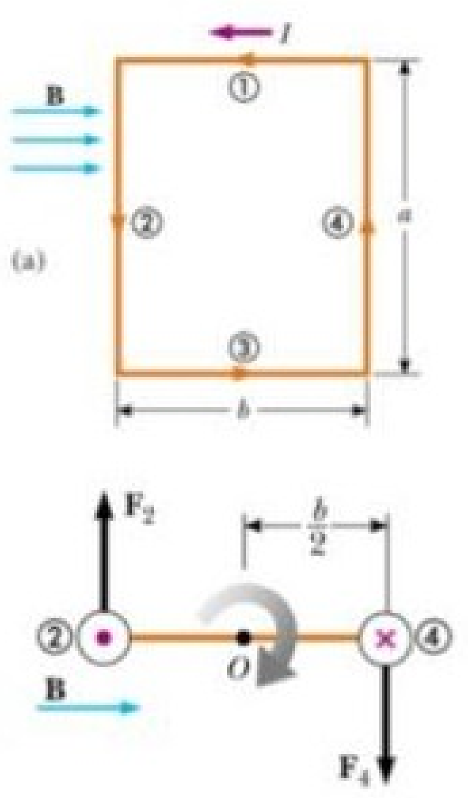
A soma dos vetores $d\vec{l}$ forma um polígono fechado

$$\boxed{\Rightarrow \vec{F} = 0}$$

A força sobre qualquer circuito fechado percorrido por uma corrente estacionária é nula.

Isso não quer dizer que o torque seja nulo.

Torque sobre uma espira de corrente num campo magnético uniforme



- **Campo magnético está paralelo ao plano da espira**

$$\vec{F}_B = i\int_i^f d\vec{l} \times \vec{B}$$

$$sendo\ que \Rightarrow d\vec{l} \times \vec{B} = |\vec{B}||d\vec{l}|sen\theta$$

Assim, para os lados 1 e 3, temos que:

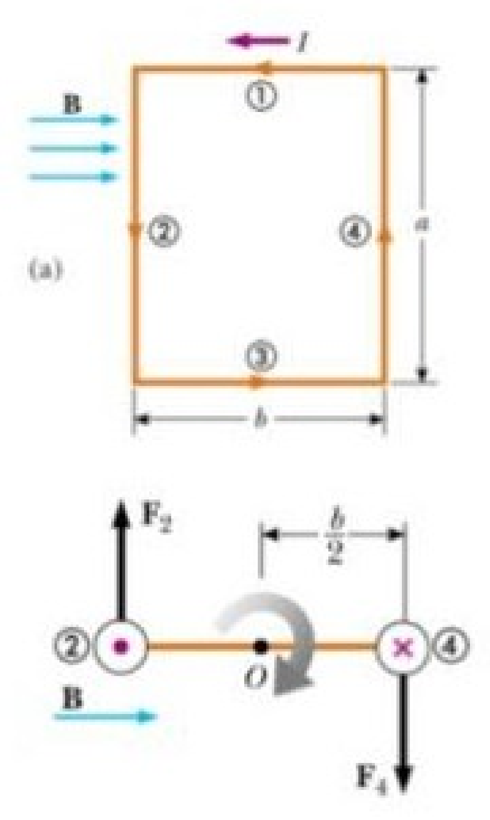
$$d\vec{l}//\vec{B} \Rightarrow d\vec{l} \times \vec{B} = 0$$
$$\Rightarrow \vec{F}_B = 0$$

E para os lados 2 e 4, temos que:

$$d\vec{l} \perp \vec{B} \Rightarrow d\vec{l} \times \vec{B} = Bdl$$
$$\Rightarrow |\vec{F}_B| = iaB$$

$$\vec{F}_2 = -\vec{F}_4 \Rightarrow$$ Não há força líquida sobre a espira, porém forças iguais e contrárias correspondem a um binário de forças que provoca torque.

Torque sobre uma espira de corrente num campo magnético uniforme



As duas forças, F_2 e F_4, provocam um momento (torque) em relação ao ponto O que provoca uma rotação no sentido horário.

$$\tau = \vec{r} \times \vec{F}$$

$$\vec{r} \perp \vec{F} \Rightarrow \tau_{máx} = F_2\frac{b}{2} + F_4\frac{b}{2}$$

$$\Rightarrow \tau_{máx} = (iaB)\frac{b}{2} + (iaB)\frac{b}{2}$$

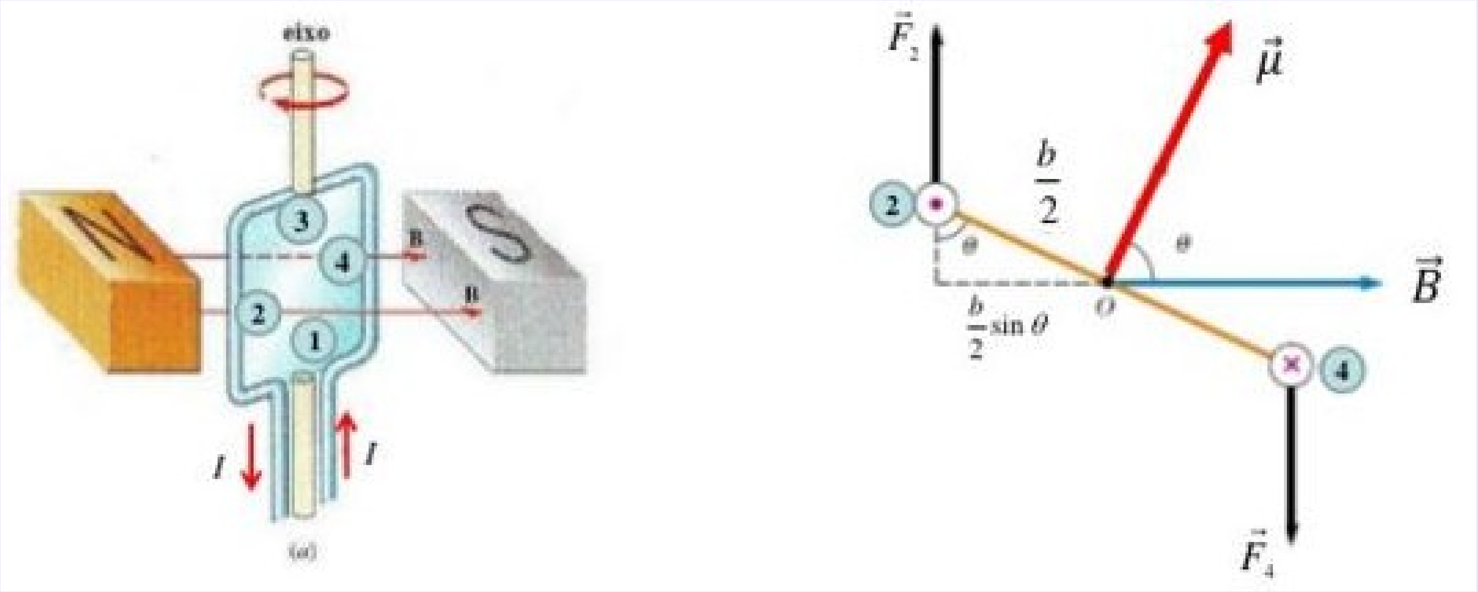
$$\Rightarrow \tau_{máx} = (iabB)$$

$$A = ab \rightarrow área\ da\ espira$$

$$\boxed{\tau_{máx} = iAB}$$

Torque sobre uma espira de corrente num campo magnético uniforme

- O campo magnético faz um ângulo qualquer com a espira



$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_3 \Rightarrow \vec{F}_1 + \vec{F}_3 = 0$$

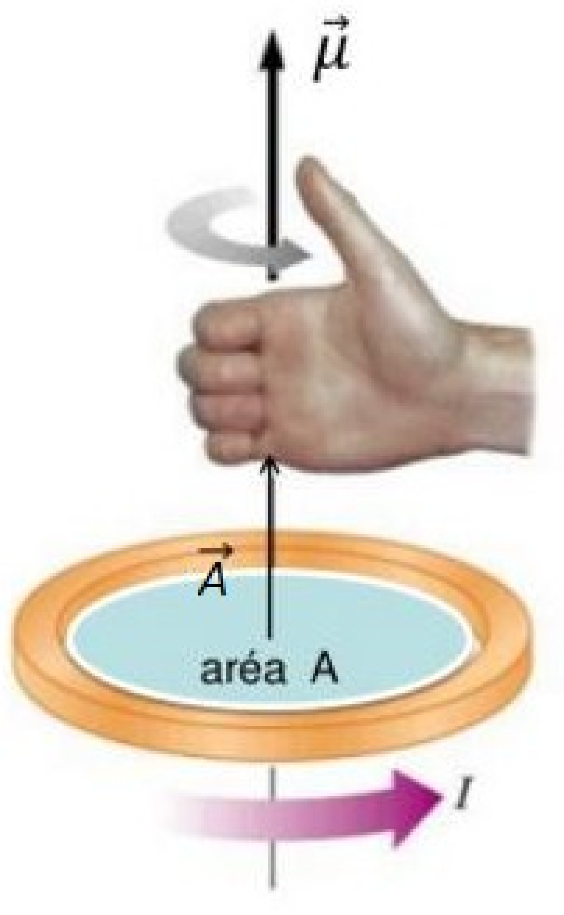
$$\tau = F_2 \frac{b}{2} sen\theta + F_4 \frac{b}{2} sen\theta$$

$$\tau = (iaB)\frac{b}{2} sen\theta + (iaB)\frac{b}{2} sen\theta = iabBsen\theta$$

$$A = ab \rightarrow \acute{a}rea\ da\ espira$$

$$\boxed{\Rightarrow \tau = iABsen\theta}$$

Momento de dipolo magnético



$$\boxed{\vec{\mu} = i\vec{A}}$$

$$\vec{A} \longrightarrow \acute{a}rea\ orientada$$

O vetor área é normal ao plano da espira orientado segundo a circulação da corrente como na figura.

Assim, o torque pode ser escrito como

$$\boxed{\Rightarrow \tau = \vec{\mu} \times \vec{B}}$$

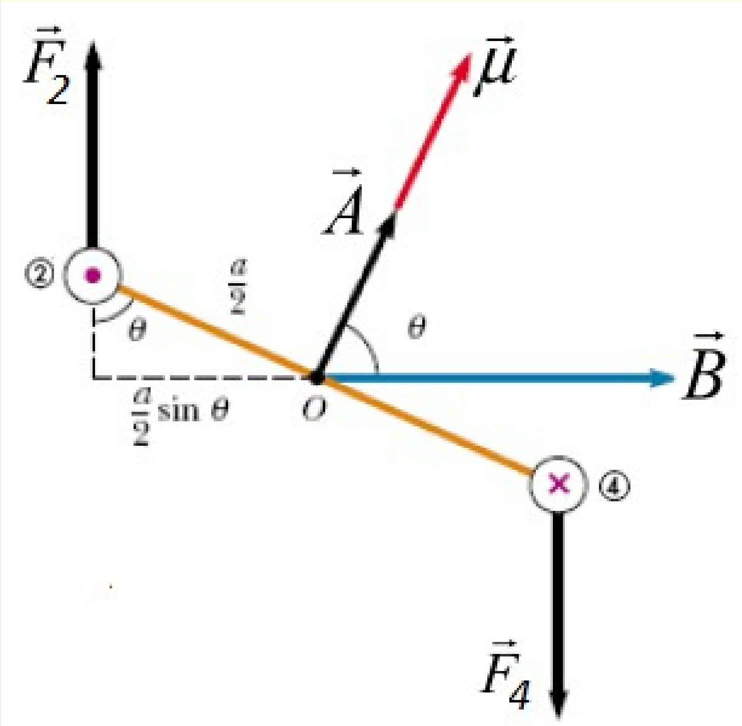
Desta equação podemos ver que o vetor momento magnético tende a se alinhar com o campo.

Para uma bobina de N espiras

$$\boxed{\Rightarrow \vec{\mu} = Ni\vec{A}}$$

Energia potencial de um dipolo magnético

Quando um dipolo magnético gira de um ângulo $d\theta$ a partir de uma dada orientação num campo magnético, um trabalho dW é realizado sobre o dipolo pelo campo magnético:



$$dW = \tau d\theta$$

$$dU = -dW_{F_{mag}}$$

$$\Rightarrow dU = -\tau d\theta$$

$$dU = -\mu B sen\theta d\theta$$

$$U = -\mu B cos\theta + U_0$$

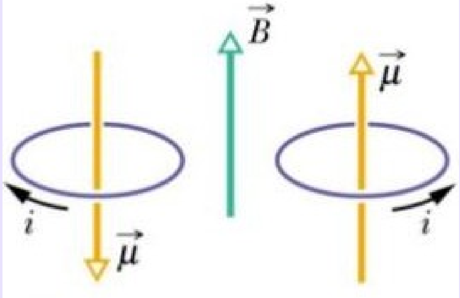
$$\theta = 90^o \Rightarrow U_0 = 0$$

$$\Rightarrow U = -\mu B cos\theta$$

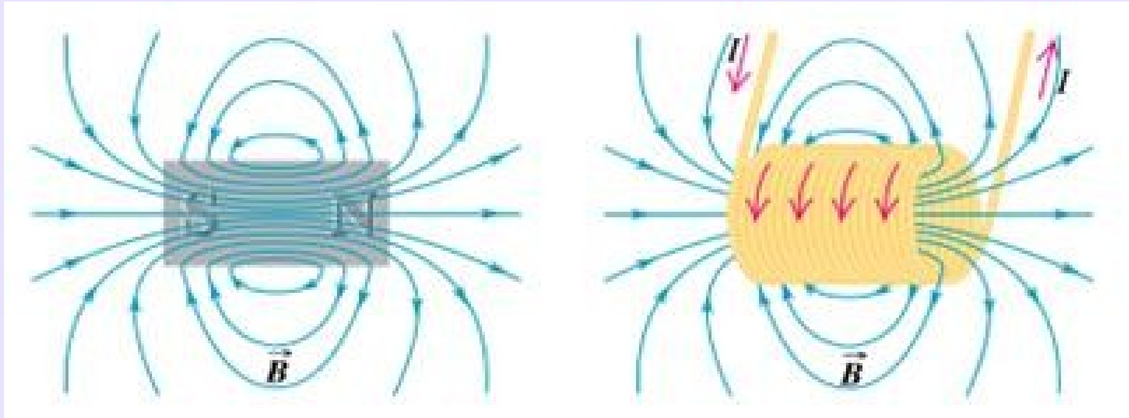
$$\boxed{U = -\vec{\mu}.\vec{B}}$$

Assim:

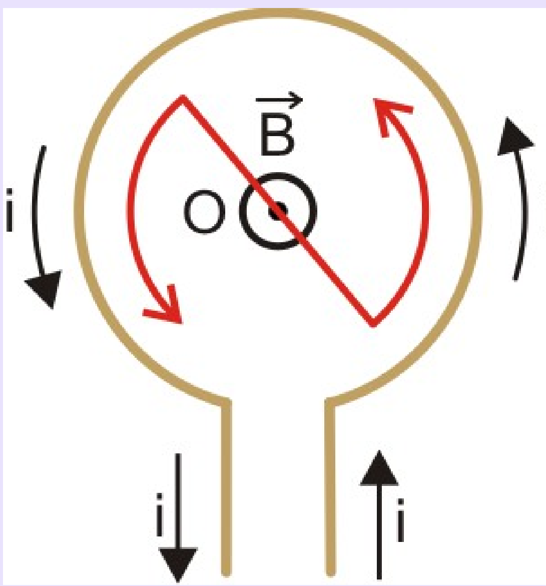
- **Quando $\vec{\mu}//\vec{B}$ configuração de menor energia potencial.**
- **Quando $\vec{\mu} \perp \vec{B}$ configuração de maior energia potencial.**

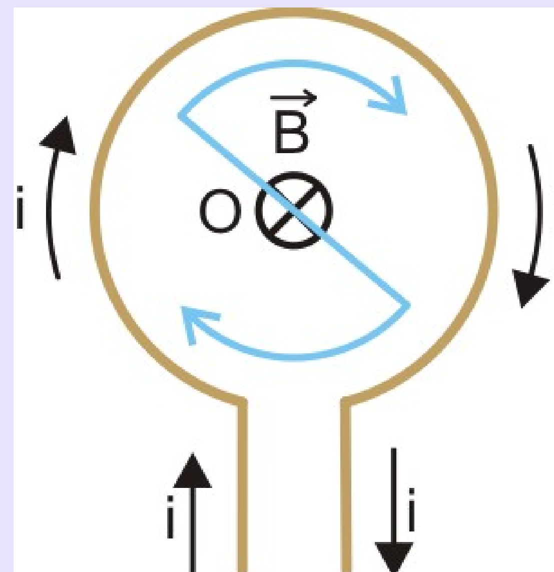


Dipolo magnético

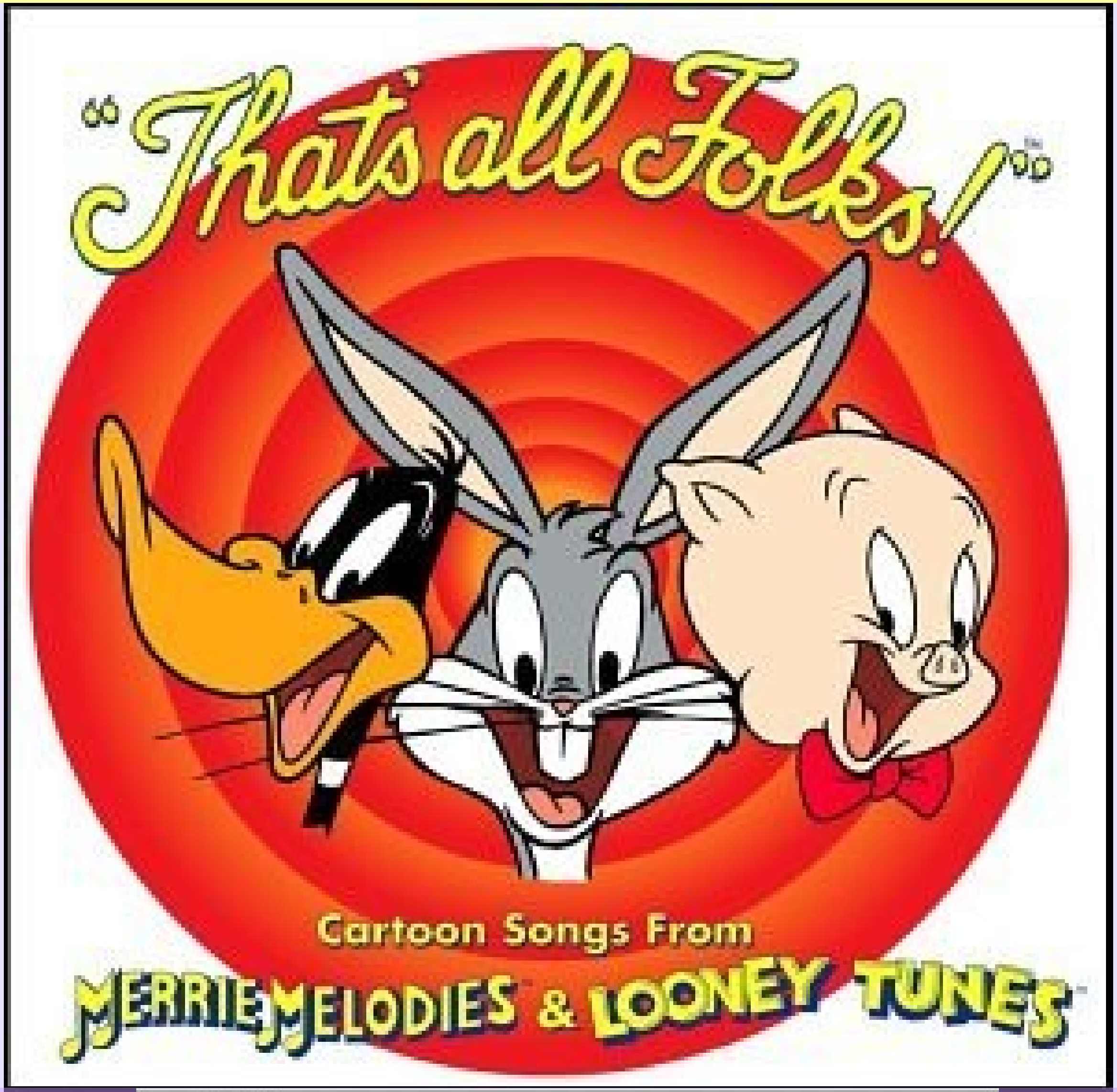


Regra para lembrar qual é a “face norte” ou a “face sul” do dipolo magnético.





FIM


"That's all Folks!"
Cartoon Songs From
MERRIE MELODIES & LOONEY TUNES