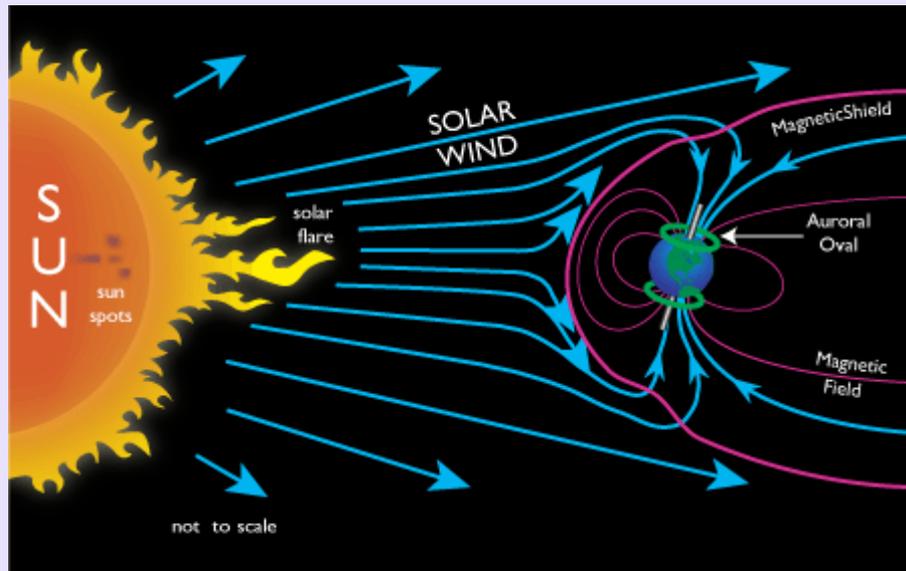


Campo Magnética



Prof. Fábio de Oliveira Borges

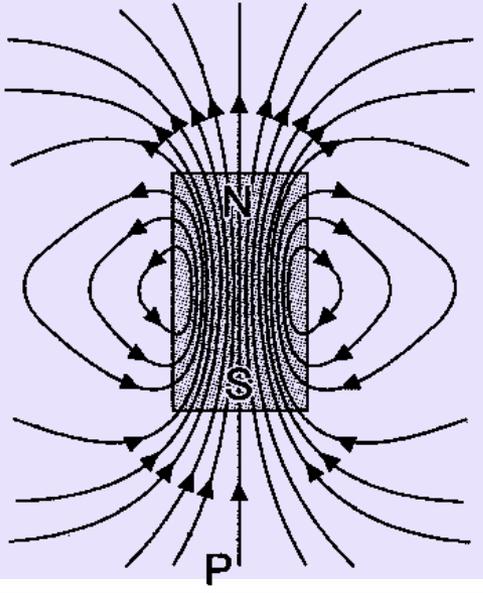
Curso de Física II

Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense

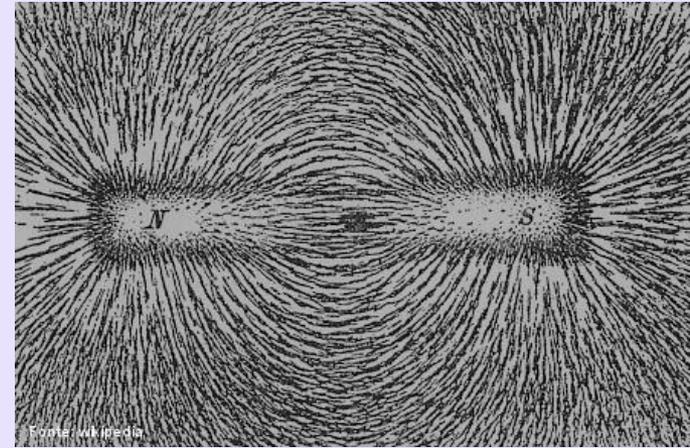
Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

<https://cursos.if.uff.br/!fisica2-0217/doku.php>

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 $\Rightarrow \vec{F}_E \propto \frac{1}{r^2}$

$\hookrightarrow \vec{F}_E = K \frac{q_+ q_-}{r^2}$

Força magnética $\Rightarrow \vec{F}_B \propto \frac{1}{r^2}$

$\hookrightarrow \vec{F}_B = K_B \frac{q_N q_S}{r^2} \text{ ?????}$

“Pode-se descrever o magnetismo 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:

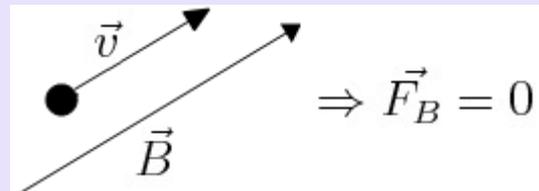
1) A força magnética é proporcional a carga, q , e ao módulo da velocidade, v , da partícula.

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

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

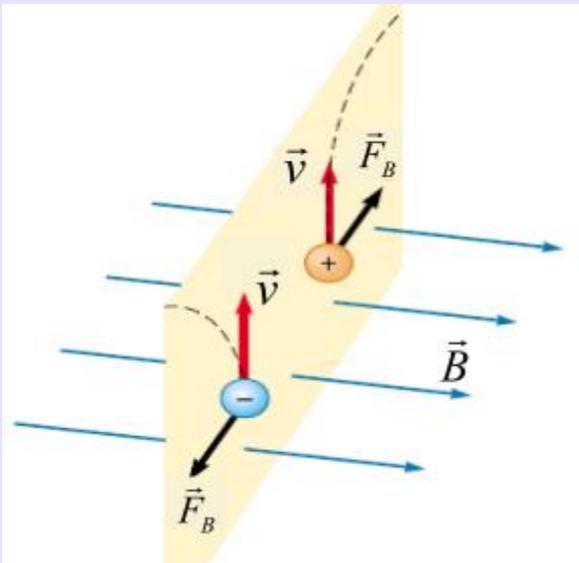
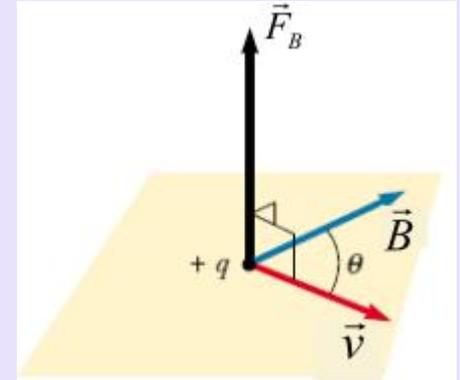
$$|\vec{F}_B| \propto |\vec{B}|$$

3) Quando uma partícula carregada se move numa direção paralela ao vetor campo magnético, \vec{B} , a força magnética, \vec{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, \mathbf{v} , ao campo magnético, \mathbf{B} ; isto é, \mathbf{F}_B é perpendicular ao plano definido por \mathbf{v} e \mathbf{B} .



5) A força magnética sobre uma carga positiva está na direção oposta à direção da força sobre uma carga negativa que se move com o mesmo vetor velocidade \mathbf{v} .



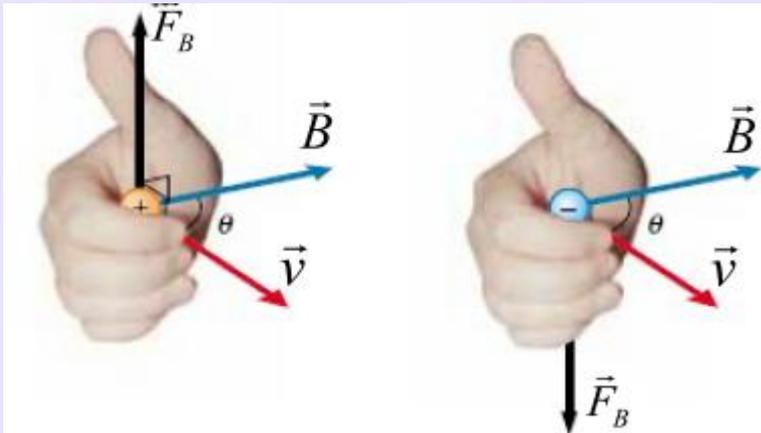
A força magnética

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.

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

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

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



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

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

 Força magnética



A força magnética

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

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

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

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

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



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 $dt \Rightarrow d\vec{l} = \vec{v}dt$

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

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

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

$q(\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} = 0$ Um vetor que é perpendicular a \vec{v} $\vec{F}_B \perp \vec{v} \Rightarrow \vec{F}_B \cdot \vec{v} = 0$

$\Rightarrow P = \frac{dW}{dt} = q\vec{E} \cdot \vec{v}$ \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 \Rightarrow Altera a direção da velocidade, porém não afeta seu módulo

$$\text{como } \vec{F}_B \perp \vec{v} \Rightarrow |\vec{v}| = C^{te} \Rightarrow MCU$$

$$\vec{F}_B = \vec{F}_C$$

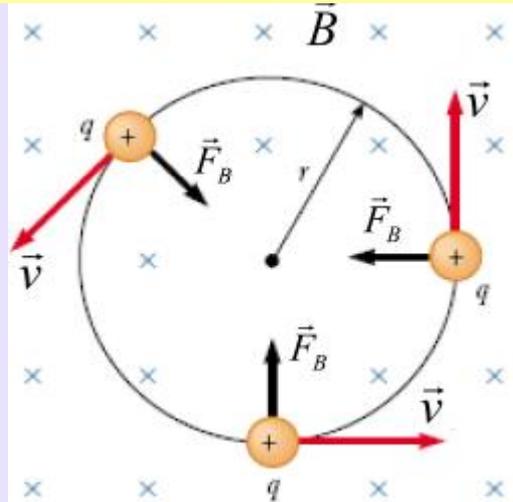
$$qvB = m \frac{v^2}{r}$$

$$r = \frac{mv}{qB} \leftarrow \text{raio de Larmor}$$

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

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

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



Movimento de uma partícula carregada num campo magnético

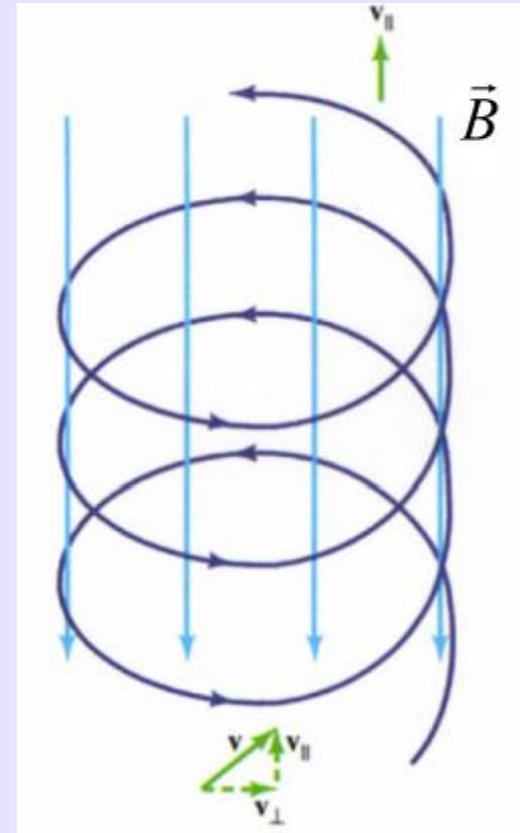
velocidade : $\vec{v} = v_{//} + v_{\perp}$ (em Relação a \vec{B})

$v_{\perp} \Rightarrow$ movimento circular

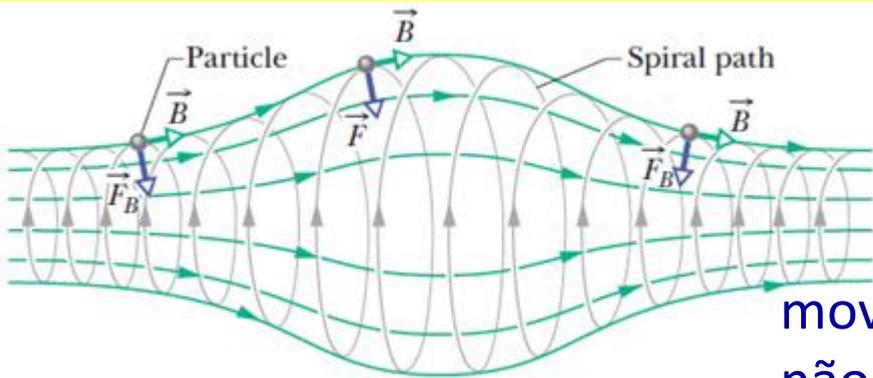
$v_{//} \Rightarrow$ constante (força magnética nula)

Resultado: trajetória helicoidal da partícula

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

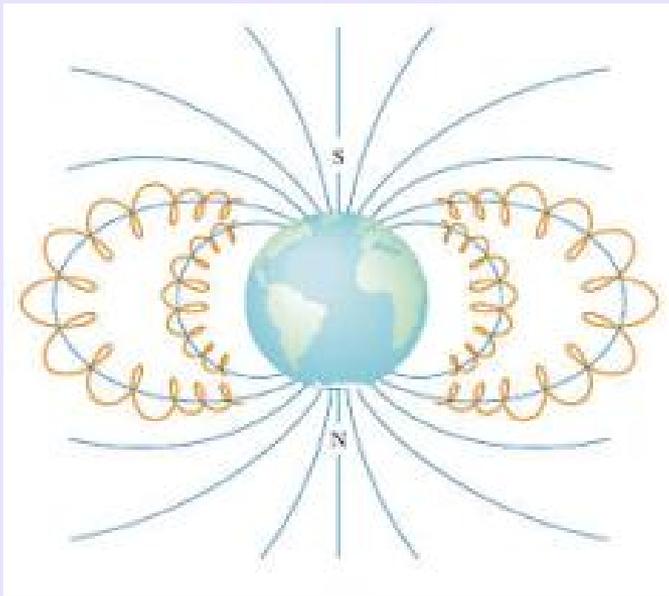


Movimento de uma partícula carregada num campo magnético



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 aprimonada e se desloca para frente e para trás em uma trajetória espiral em torno das linhas de campo.

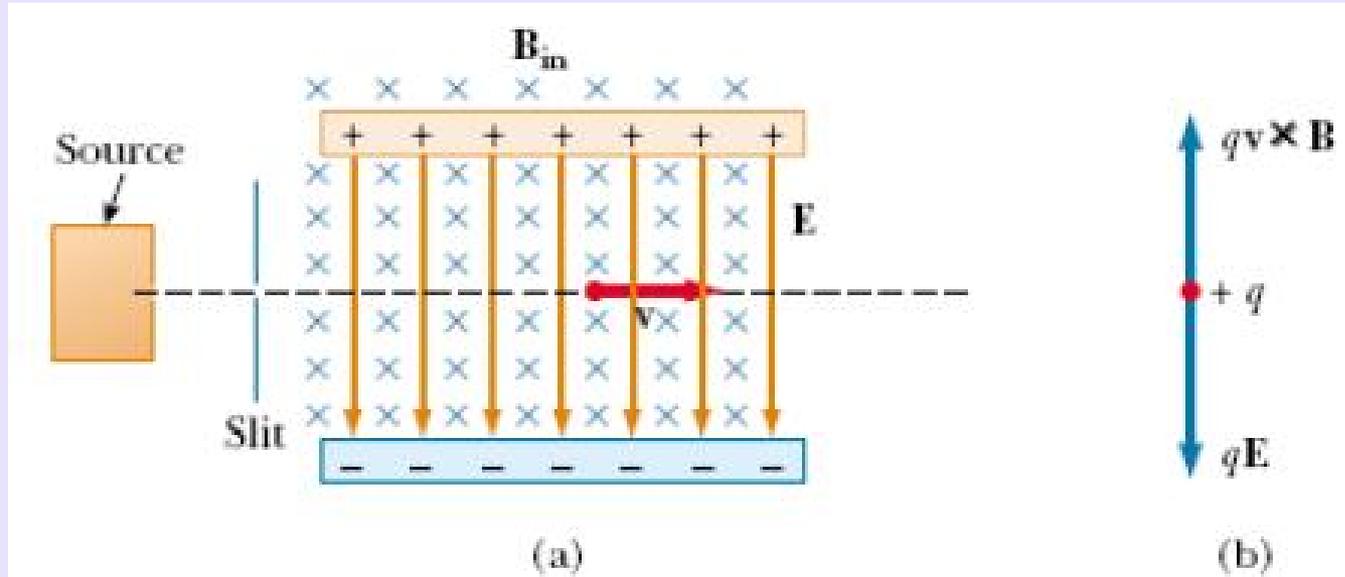


Desta maneira, elétrons e prótons ficam aprisionados pelo campo magnético terrestre não-uniforme, formando os cinturões de radiação de Van Allen.



Filtro de velocidade

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



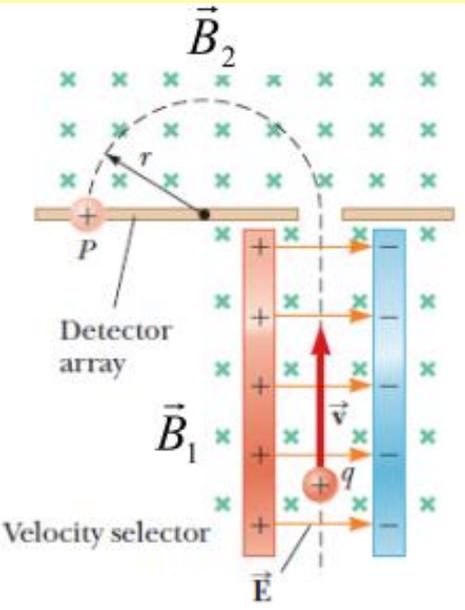
Se as duas forças forem equilibradas a partícula não sofre desvio.

$$\Rightarrow qE = qvB$$

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

← velocidade da partícula ao sair da região de campo

Espectrômetro de massa



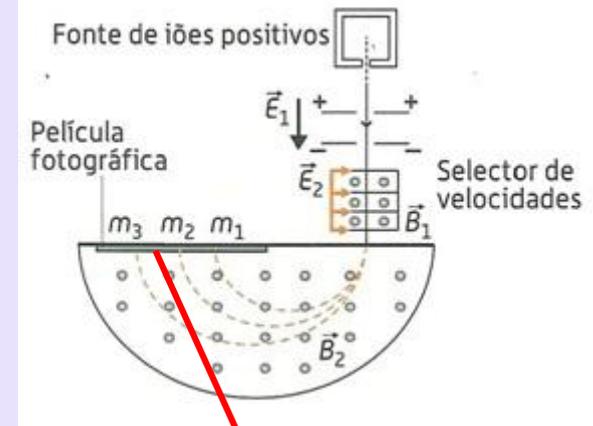
I) o íon entra no filtro de velocidade

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

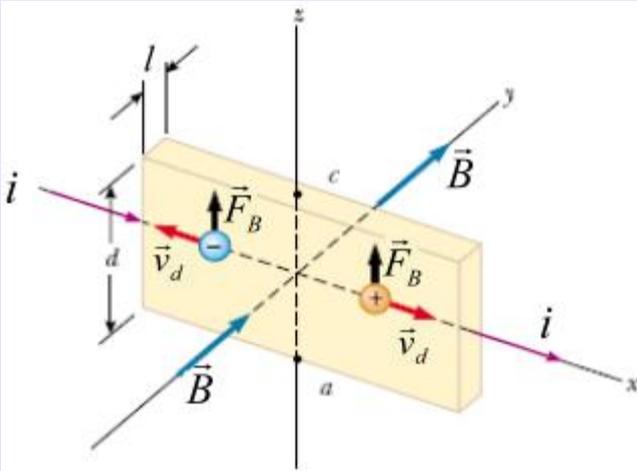
II) o íon é injetado numa região de campo magnético uniforme se movendo em um círculo com o raio de Larmor.

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

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



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 positivos movendo-se para direita como portadores negativos movendo-se para a esquerda.

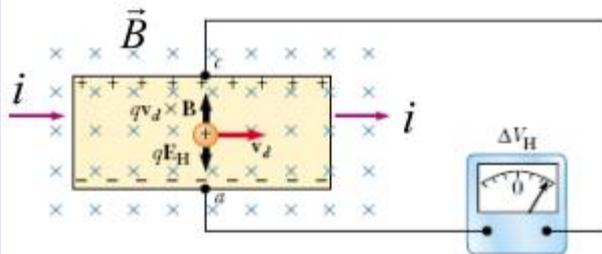
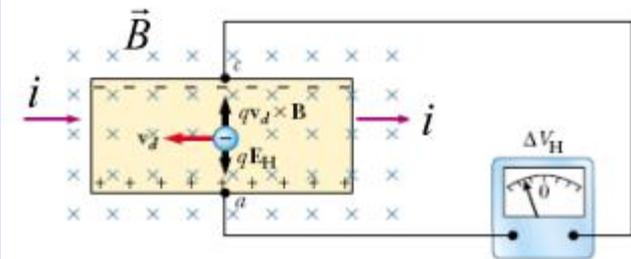
Medindo-se a ddp de Hall (V_H) entre os pontos a e c , pode-se determinar o sinal e a densidade volumétrica (n) dos portadores.

$$\text{equilíbrio} \Rightarrow qv_d B = qE_H \Rightarrow E_H = v_d B$$

$$\text{largura da fita} \rightarrow d \Rightarrow V_H = E_H d$$

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

como : $i = nqv_d A$ onde $A = ld$, área da fita

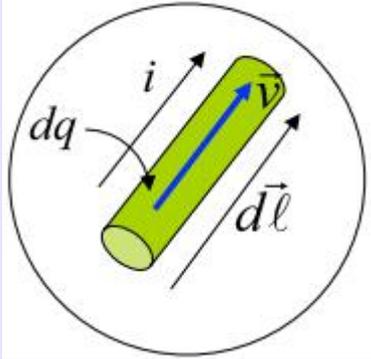


$$\Rightarrow V_H = \frac{i B d}{n q A} = \frac{i B}{n q l}$$

$$\Rightarrow B = \underbrace{(n q l)}_a \frac{V_H}{i} = a \frac{V_H}{i}$$



Força magnética sobre uma corrente



← Fio metálico condutor onde os portadores de carga são os elétrons.

$-e\vec{v}_d \times \vec{B} \rightarrow$ Força média sobre cada elétron livre do condutor.

$\Rightarrow \vec{f} = -ne \vec{v}_d \times \vec{B}$ ← 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: $\vec{j} = -nev_d \Rightarrow \vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}$

Assim, para encontrarmos a força total, dF , exercida sobre os elétrons 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

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

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

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

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

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

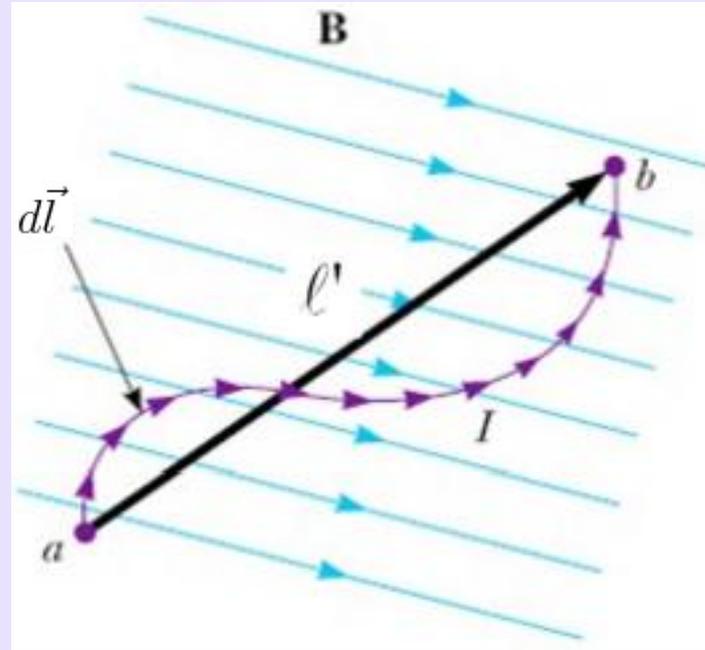
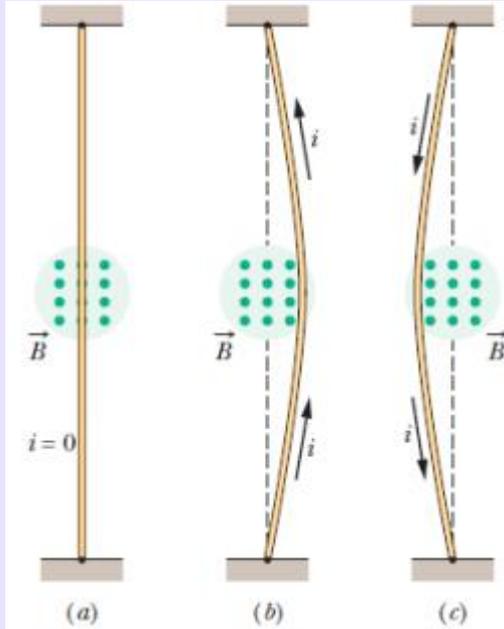


Força sobre um pedaço de fio.



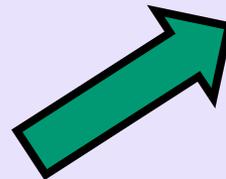
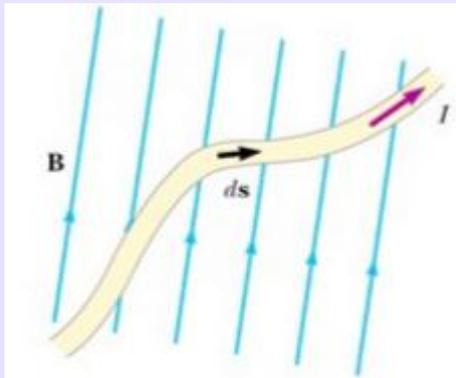
Força magnética sobre uma corrente

I) pedaço de um fio curvo num campo magnético



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

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

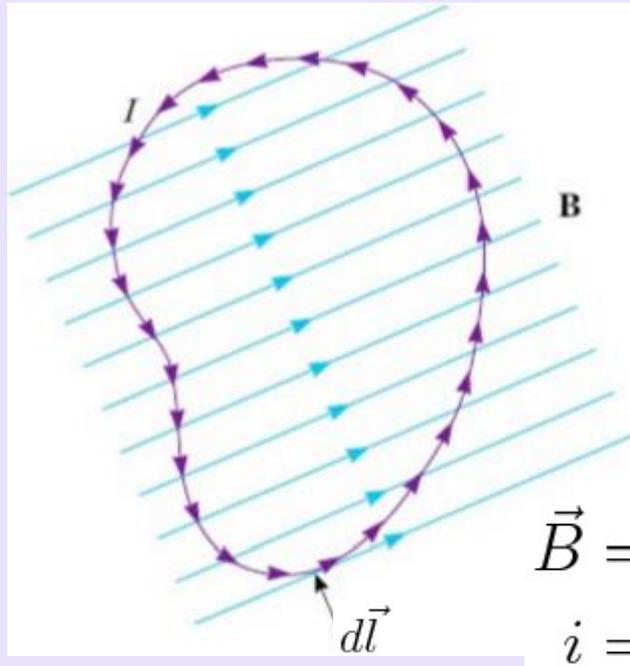


$$\vec{F} = i \left(\int_a^b d\vec{l} \right) \times \vec{B}$$

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

$\vec{l}' \rightarrow$ Fio reto que sofre a mesma força que o curvo

Força magnética sobre uma corrente



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


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

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

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

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

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

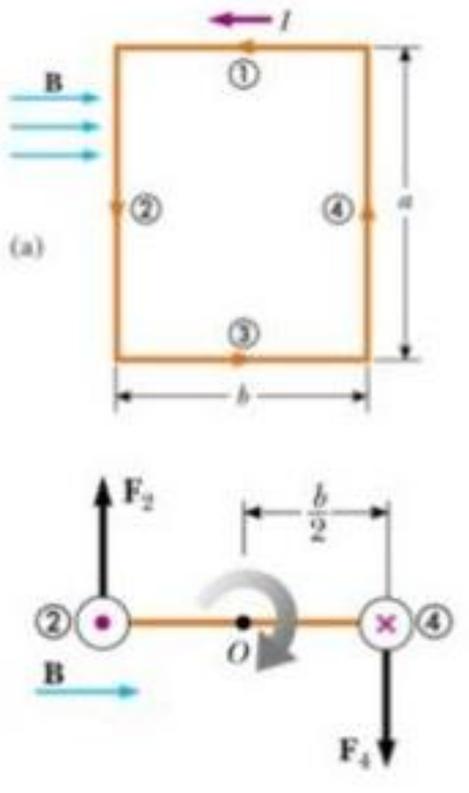
$$\begin{aligned} d\vec{l} // \vec{B} &\Rightarrow d\vec{l} \times \vec{B} = 0 \\ &\Rightarrow \vec{F}_B = 0 \end{aligned}$$

E para os lados 2 e 4, temos que:

$$\begin{aligned} d\vec{l} \perp \vec{B} &\Rightarrow d\vec{l} \times \vec{B} = B dl \\ &\Rightarrow |\vec{F}_B| = iaB \end{aligned}$$

$$\vec{F}_2 = -\vec{F}_4 \Rightarrow$$

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.

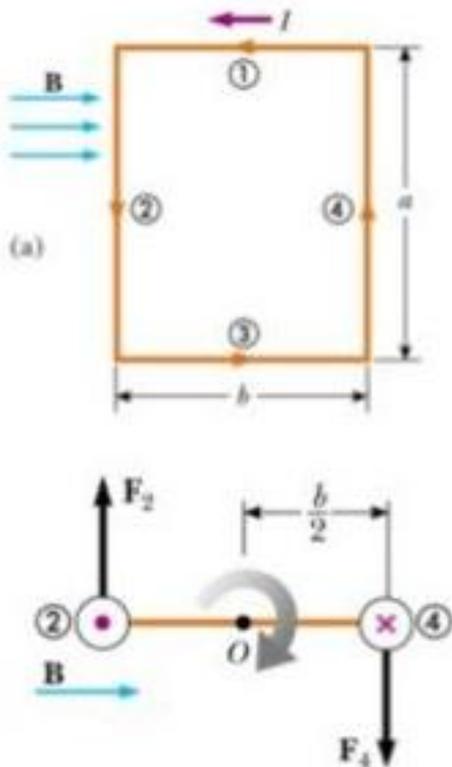
$$\tau = \vec{r} \times \vec{F}$$

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

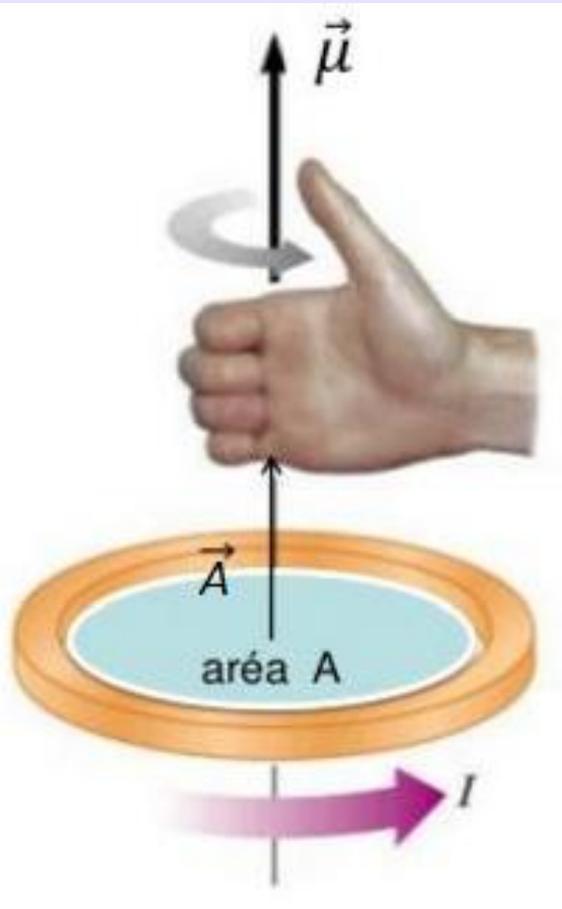
$$\tau = (iaB) \frac{b}{2} \text{sen}\theta + (iaB) \frac{b}{2} \text{sen}\theta = iabB \text{sen}\theta$$

$$A = ab \rightarrow \text{área da espira}$$

$$\Rightarrow \tau = iAB \text{sen}\theta$$



Momento de dipolo magnético



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

$\vec{A} \rightarrow$ área 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

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



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

Para uma bobina de N espiras

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



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:

$$dW = -\tau d\theta$$

$$dU = -dW$$



O torque tende a diminuir o ângulo θ

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

$$dU = \mu B \sin\theta d\theta$$

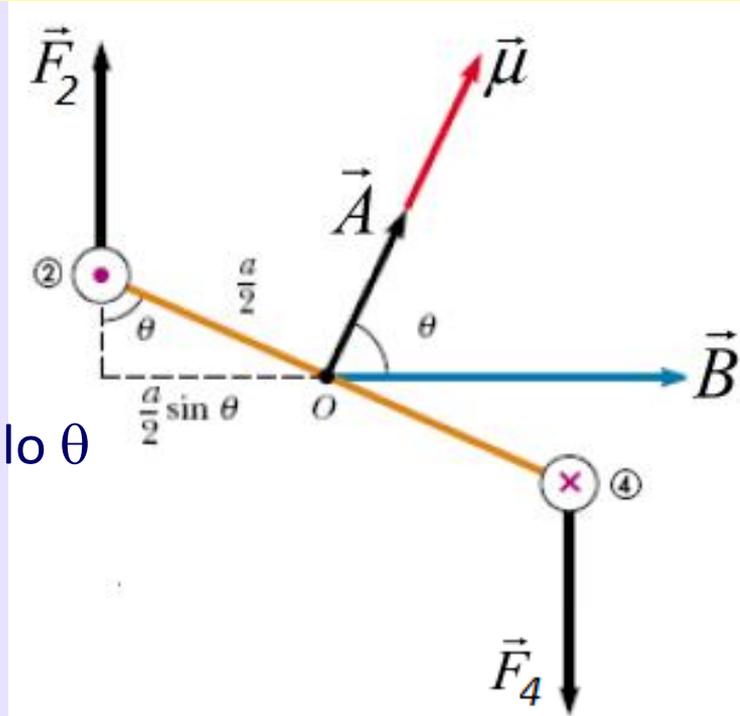
$$U = -\mu B \cos\theta + U_0$$

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

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

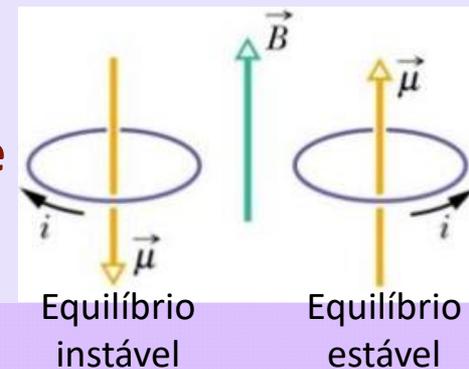
$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

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

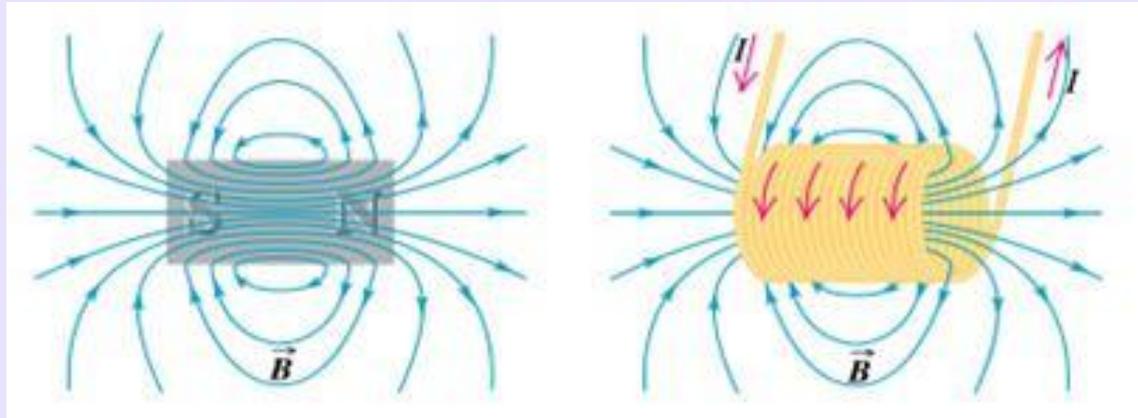


Assim:

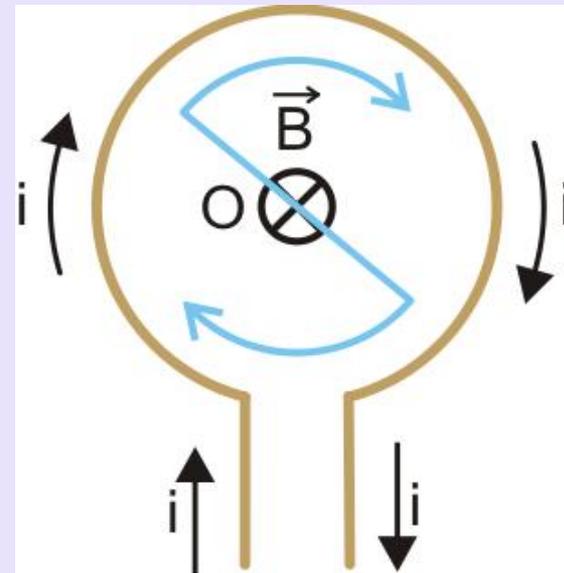
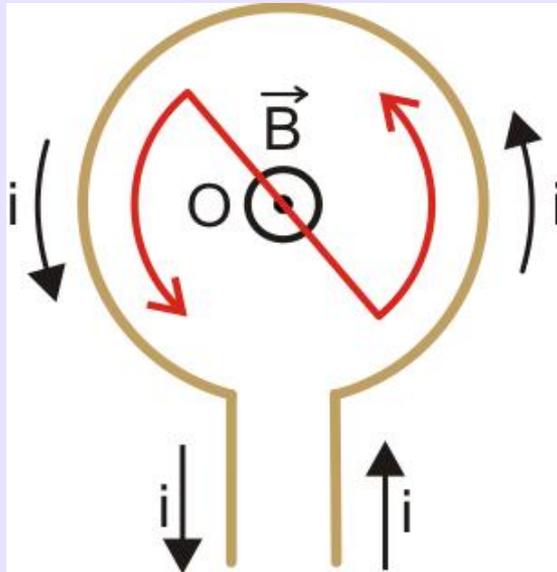
- Quando $\vec{\mu} // \vec{B}$ configuração de menor energia potencial.



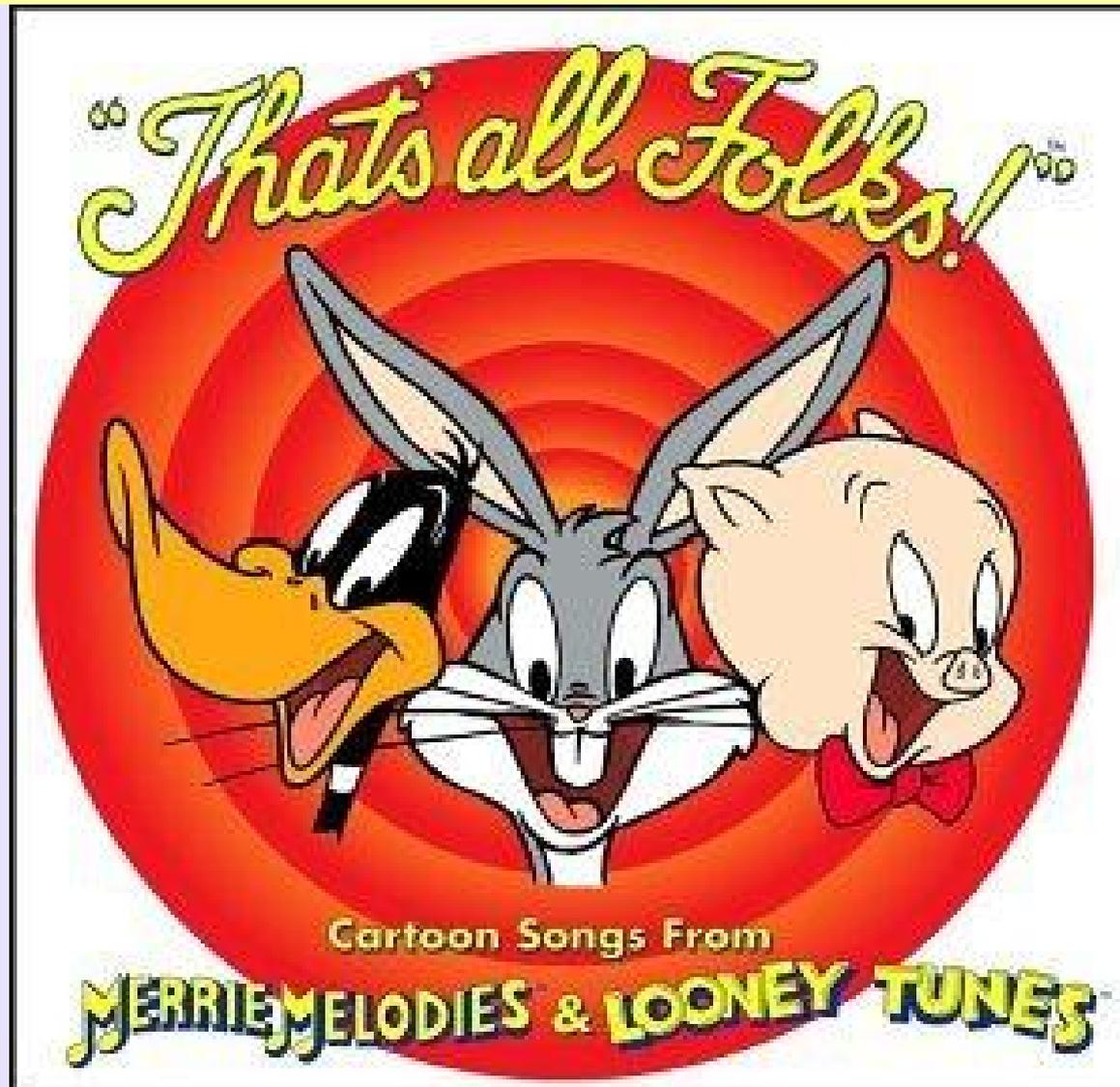
Dipolo magnético



Regra para lembrar qual é a “face norte” ou a “face sul” do de uma espira (dipolo magnético).



FIM



INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense