



Introdução

Um dos aspectos mais familiares do magnetismo é aquele associado aos ímãs permanentes, que atrai objetos de ferro.

A agulha de uma bússola alinhada ao campo magnético da Terra fornece um exemplo da interação magnética.

A natureza fundamental do magnetismo é a interação produzida por cargas elétricas que se movem.



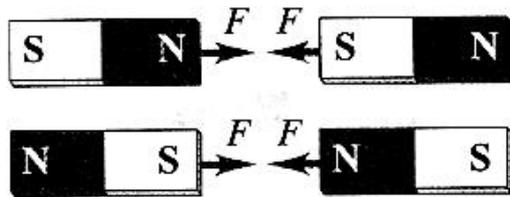
Nas aulas anteriores estudamos que a força elétrica surge em duas etapas: (1) uma carga produz um campo elétrico no espaço na sua vizinhança e (2) uma segunda carga reage a este campo.

As forças magnéticas também surgem em duas etapas: (1) Uma carga em movimento ou um conjunto de cargas em movimento (corrente elétrica) produz um campo magnético. A seguir, uma outra carga em movimento ou outro conjunto de cargas em movimento reage a este campo magnético e sofre a ação de uma força magnética.

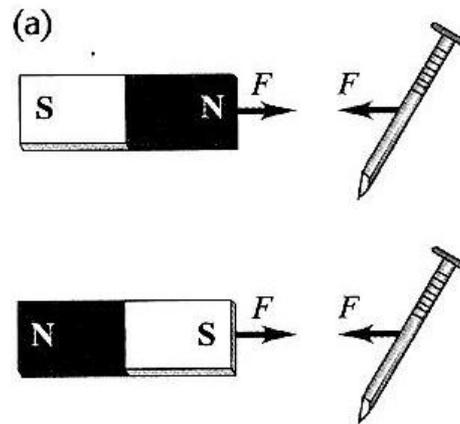
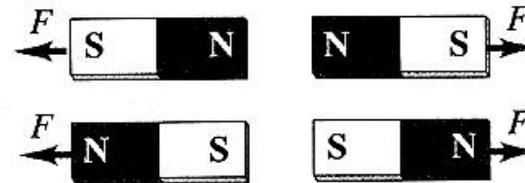


Fenômenos conhecidos de ímãs permanentes

(a) Pólos opostos se atraem

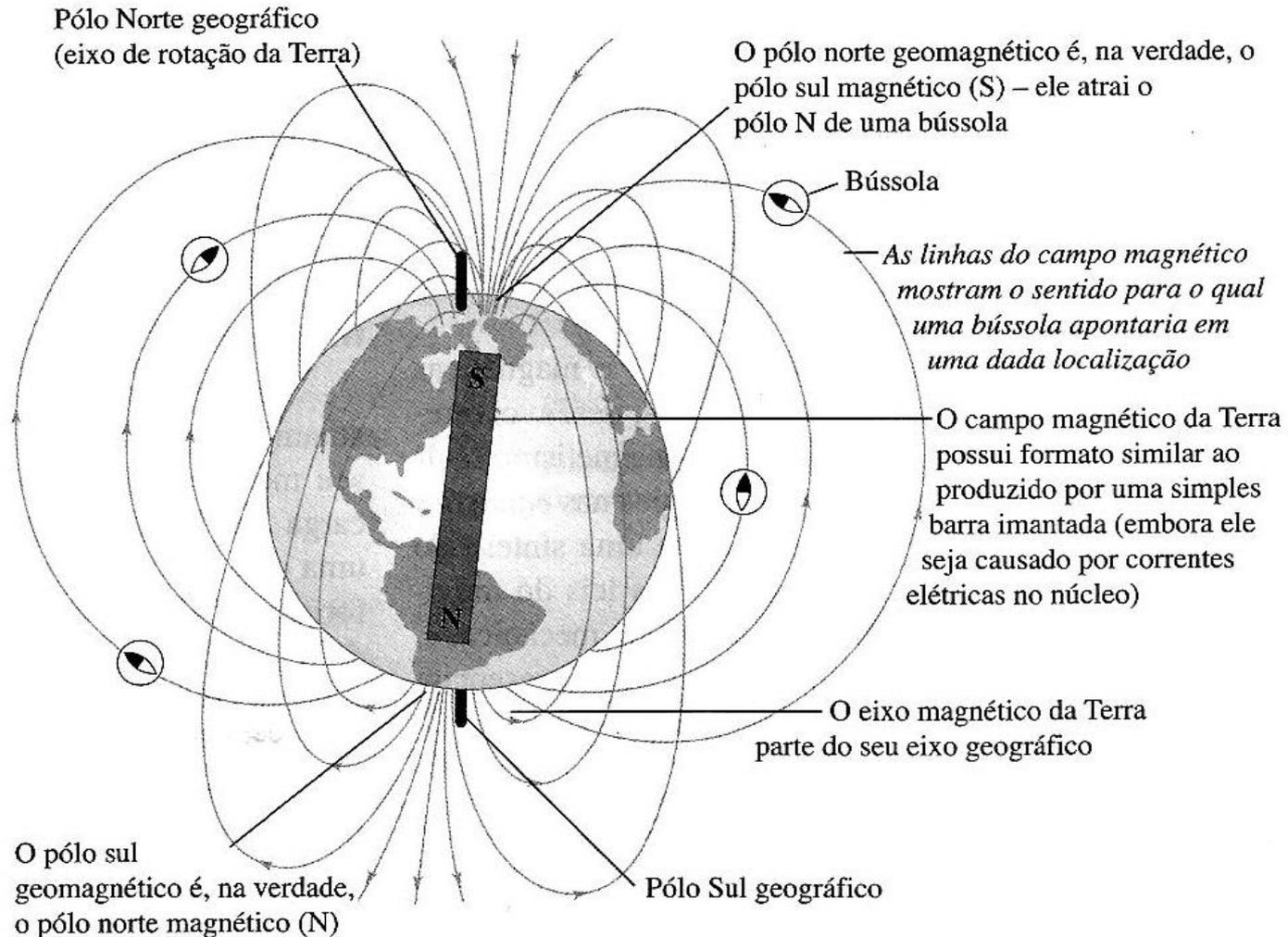


(b) Pólos iguais se repelem



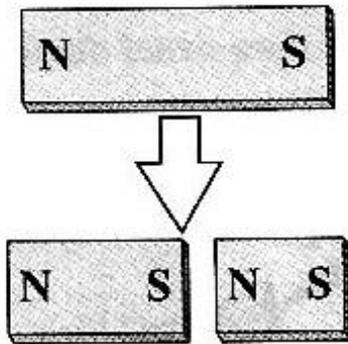


Alinhamento de bússolas ao campo magnético terrestre





Quebrar um ímã em duas partes...

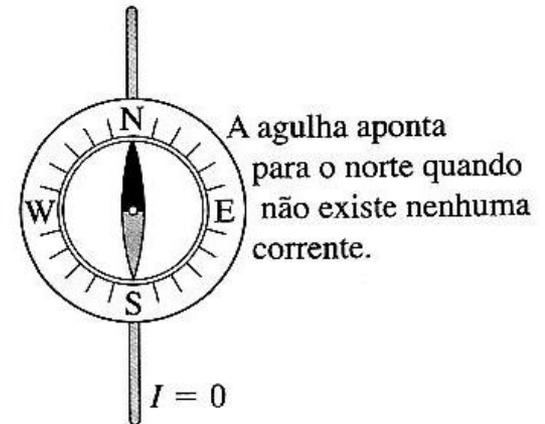


... produz dois ímãs,
não dois pólos isolados.

Não existe monopolos magnéticos!

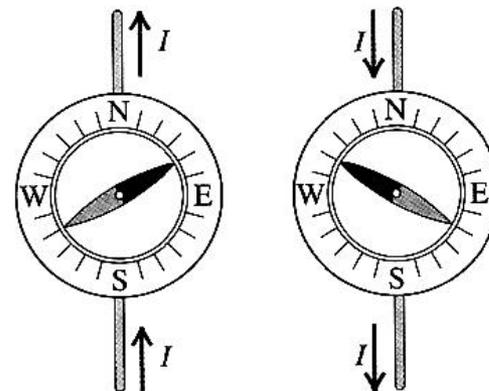
Experiência de Oersted

(a)



(b)

A agulha oscila quando existe uma corrente.
O sentido da oscilação depende do sentido da corrente.





IF – 4300270– Eletricidade e Magnetismo I

As forças magnéticas: (1) Uma carga em movimento ou um conjunto de cargas em movimento (corrente elétrica) produz um campo magnético. A seguir, uma outra carga em movimento ou outro conjunto de cargas em movimento reage a este campo magnético e sofre a ação de uma força magnética.

Nesta aula, vamos considerar que existe um campo magnético e observar o segundo efeito.

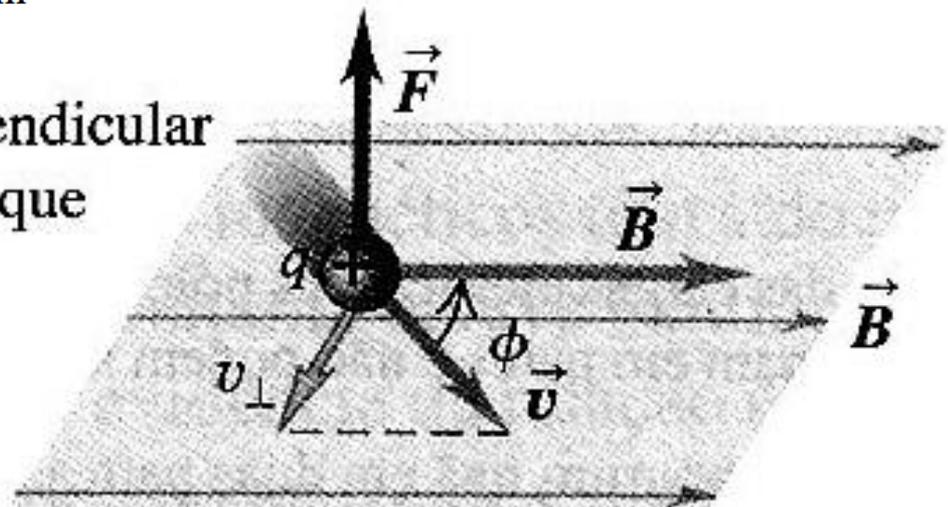
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$[B] = \frac{\text{N.s}}{\text{C.m}} = \frac{\text{N}}{\text{A.m}} = \text{T} \quad (\text{Tesla})$$

$$F = |q|v_{\perp}B = |q|vB\sin\phi$$

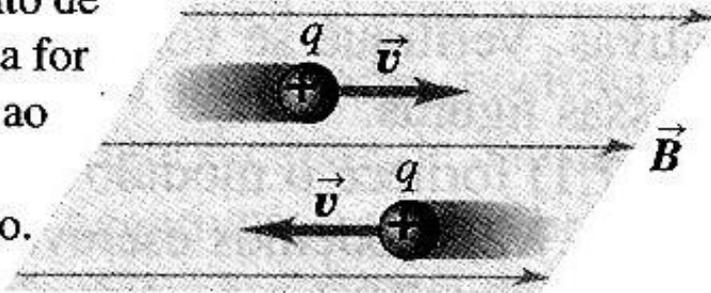
$$F = |q|vB_{\perp}$$

\vec{F} é perpendicular ao plano que contém \vec{v} e \vec{B} .



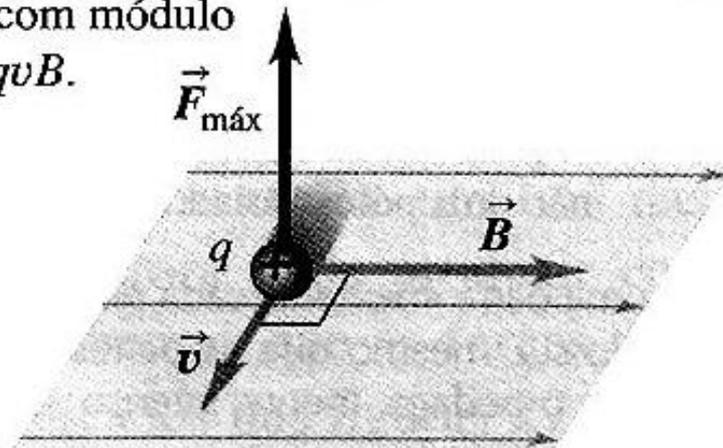


A **força magnética** será igual a **zero** quando o movimento de uma carga for **paralelo** ao campo magnético.



Quando o movimento da carga for **perpendicular** ao campo magnético, a carga sofrerá uma força magnética máxima com módulo

$$F_{\text{máx}} = qvB.$$



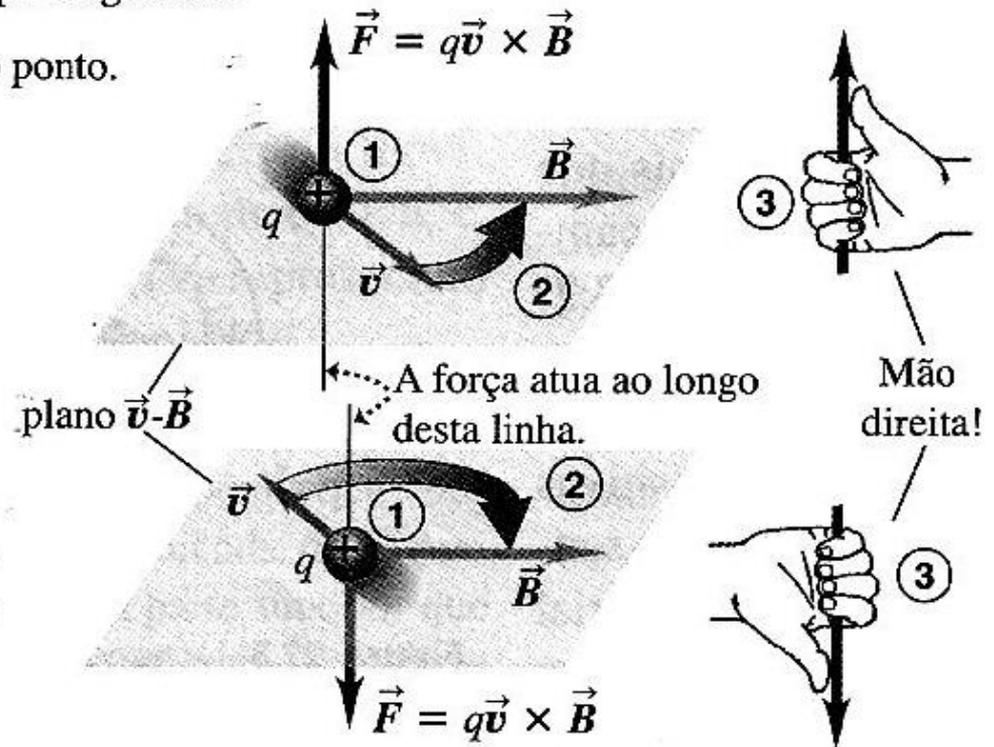


Regra da mão direita para determinar a direção e o sentido da força magnética que atua sobre uma carga **positiva** que se move em um campo magnético:

① Coloque \vec{v} e \vec{B} com as origens no mesmo ponto.

② Imagine a rotação de \vec{v} para \vec{B} no plano $\vec{v}-\vec{B}$ (através do ângulo menor).

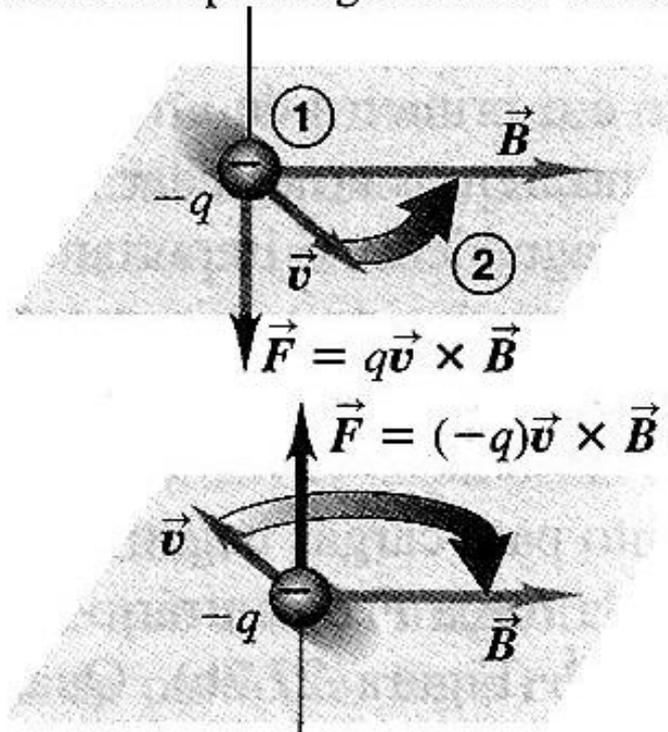
③ A força atua ao longo de uma linha perpendicular ao plano $\vec{v}-\vec{B}$. Feche os dedos da sua *mão direita* em torno dessa linha, na mesma direção e sentido da rotação de \vec{v} . Seu polegar apontará na direção e no sentido em que a força atua.





(b)

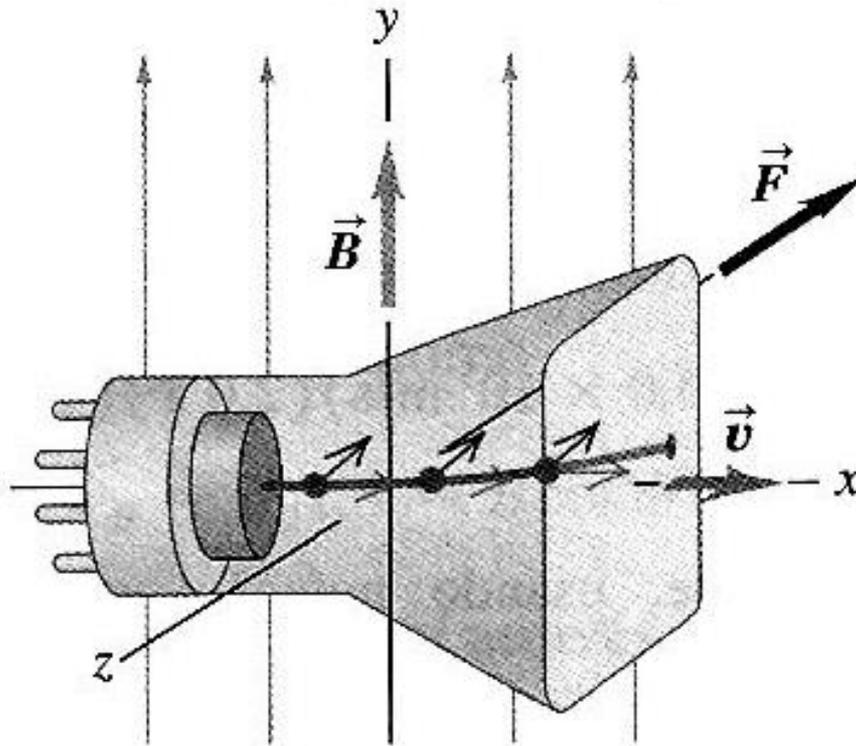
Se a carga for negativa,
a direção e o sentido da força serão *opostas*
aos dados pela regra da mão direita.





Deflexão de um feixe de elétrons num tubo de raios catódicos

(b) Se o feixe sofre uma deflexão no sentido negativo do eixo Oz quando o eixo do tubo é paralelo ao eixo Ox , então o vetor \vec{B} aponta de baixo para cima.





IF – 4300270– Eletricidade e Magnetismo I

Quando uma partícula carregada se move numa região do espaço onde existem, simultaneamente, um campo elétrico e um campo magnético, ambos os campos exercem forças sobre a partícula.

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

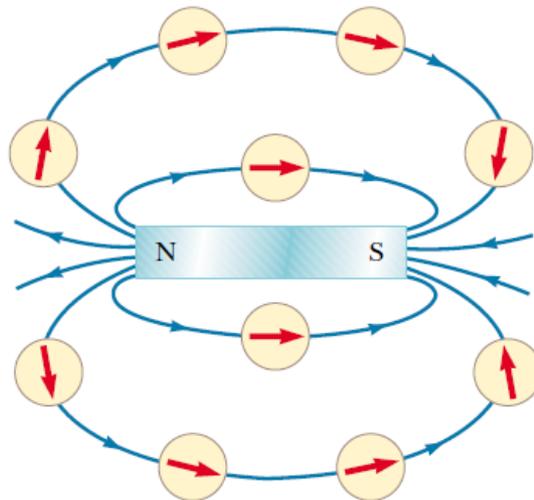


Linhas de campo magnético

Linhas de campo magnético não se cruzam.

Podem ser mapeadas através de agulhas de uma bússola ou por limalhas de ferro colocadas em um líquido viscoso.

Linhas de campo magnético não tem extremos, mas são sempre linhas fechadas. Elas também, ao contrário do campo elétrico que tem a mesma direção da força elétrica, não tem a mesma direção da força magnética.

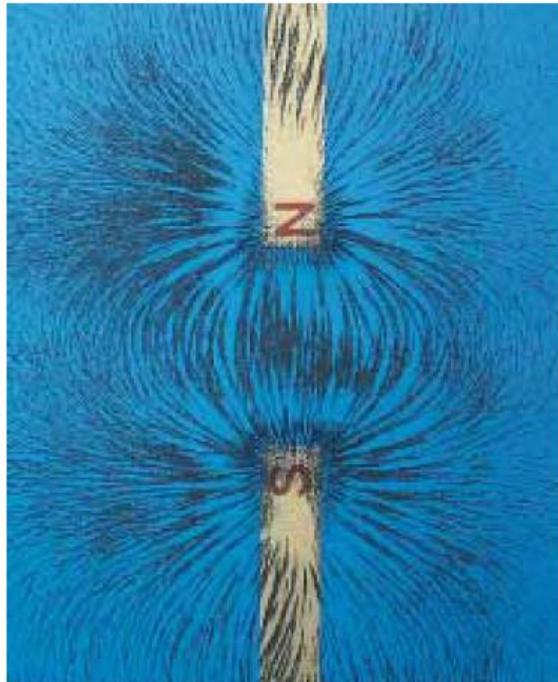




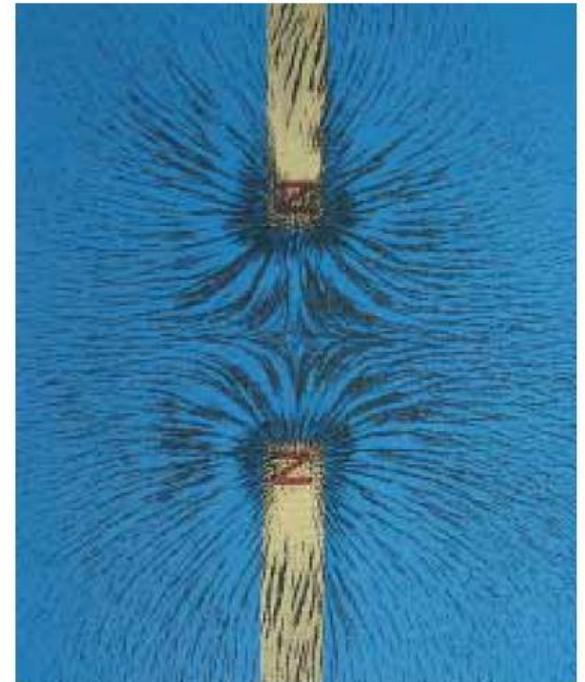
Linhas de campo magnético em diferentes configurações de ímãs



(a)



(b)



(c)

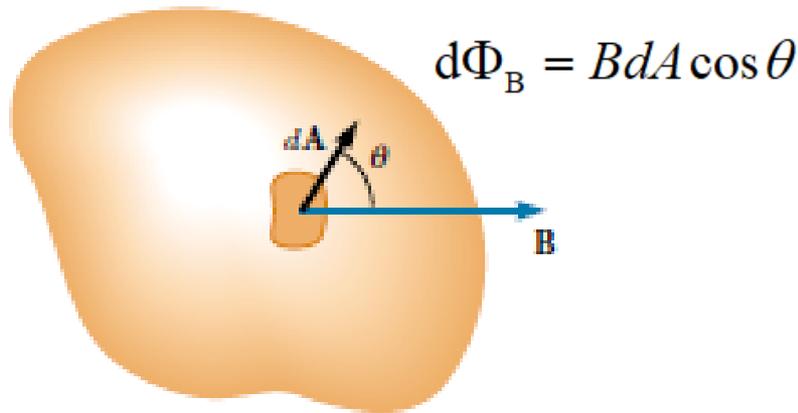


Alguns valores de campos magnéticos típicos

Source of Field	Field Magnitude (T)
Strong superconducting laboratory magnet	30
Strong conventional laboratory magnet	2
Medical MRI unit	1.5
Bar magnet	10^{-2}
Surface of the Sun	10^{-2}
Surface of the Earth	0.5×10^{-4}
Inside human brain (due to nerve impulses)	10^{-13}

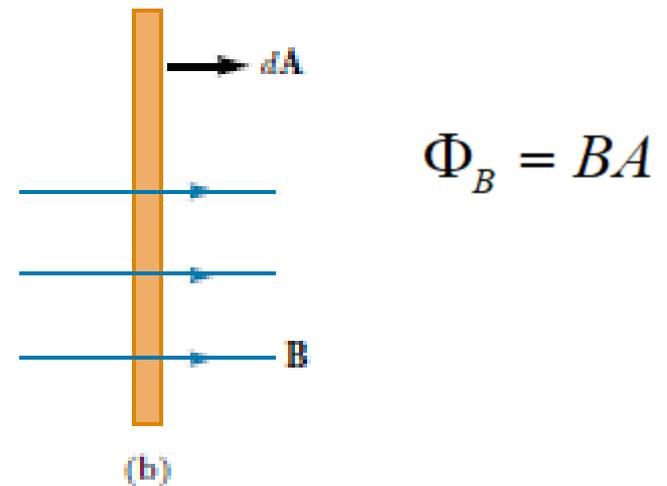
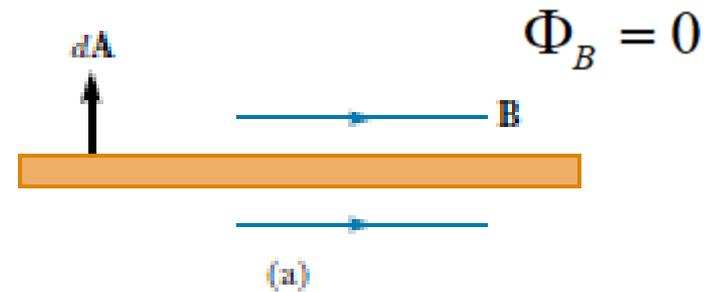


Fluxo magnético e Lei de Gauss para o magnetismo



Como no magnetismo só existem dipolos magnéticos (polo norte, polo sul), as linhas de campo magnético são sempre fechadas, resultando num fluxo nulo em qualquer superfície fechada envolvendo os dipolos magnéticos

Fluxo em uma placa de área A .



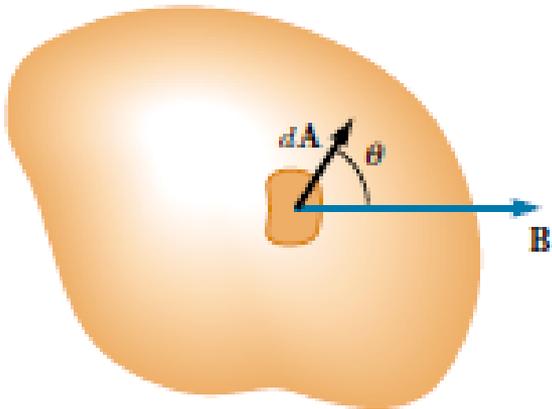


IF – 4300270– Eletricidade e Magnetismo I

Unidades do fluxo magnético= $T.m^2=$ Wb (Weber)

$$Wb=T.m^2=N.A^{-1}m^{-1}.m^2=(N.m)/A$$

Lei de Gauss para o magnetismo



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

Uma das equações de Maxwell do eletromagnetismo



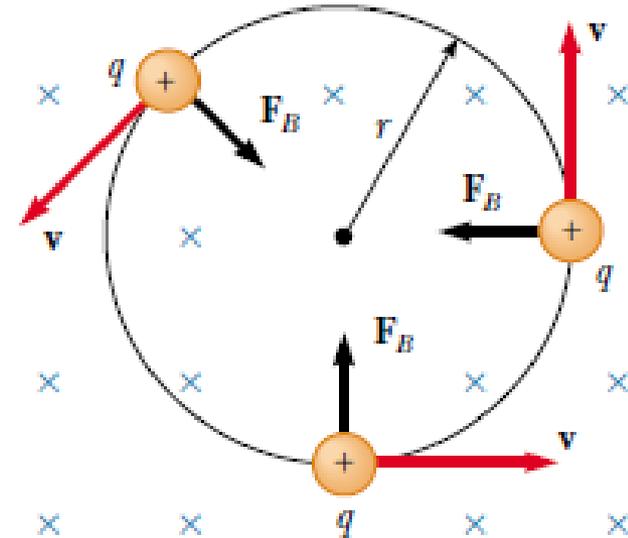
Movimento de partículas carregadas em um campo magnético

Como a força magnética é sempre perpendicular à velocidade, ela não realiza trabalho. Como consequência, o módulo da velocidade não muda mas muda a direção. Se uma carga entra com velocidade v em uma região de campo constante (ortogonal a v), a partícula realiza um movimento circular uniforme.

$$F = |q|vB = \frac{mv^2}{R}$$

$$R = \frac{mv^2}{|q|vB}$$

$$R = \frac{mv}{|q|B} \quad (1)$$



A velocidade angular da partícula é:

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{v|q|B}{mv} = \frac{|q|B}{m}$$



O período para completar uma volta é:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{|q|B} \quad (2)$$

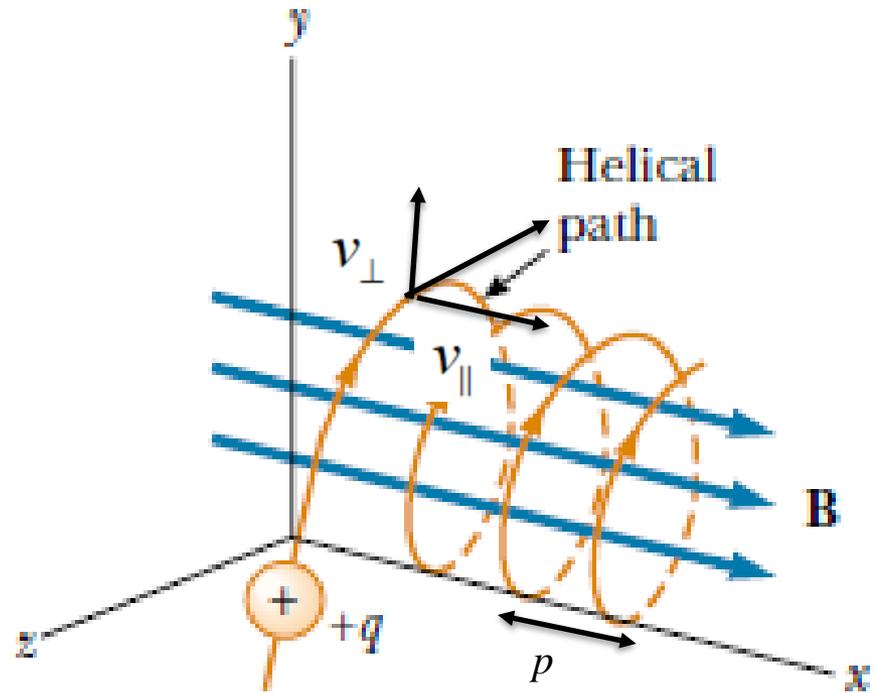


Quando a velocidade não é perpendicular ao campo magnético, a componente da velocidade paralela ao campo permanece constante e a força magnética muda a direção da componente da velocidade v perpendicular ao campo. O movimento resultante é helicoidal.

$$R = \frac{mv_{\perp}}{|q|B}$$

Da eq. (2):

$$T = \frac{2\pi m}{|q|B}$$



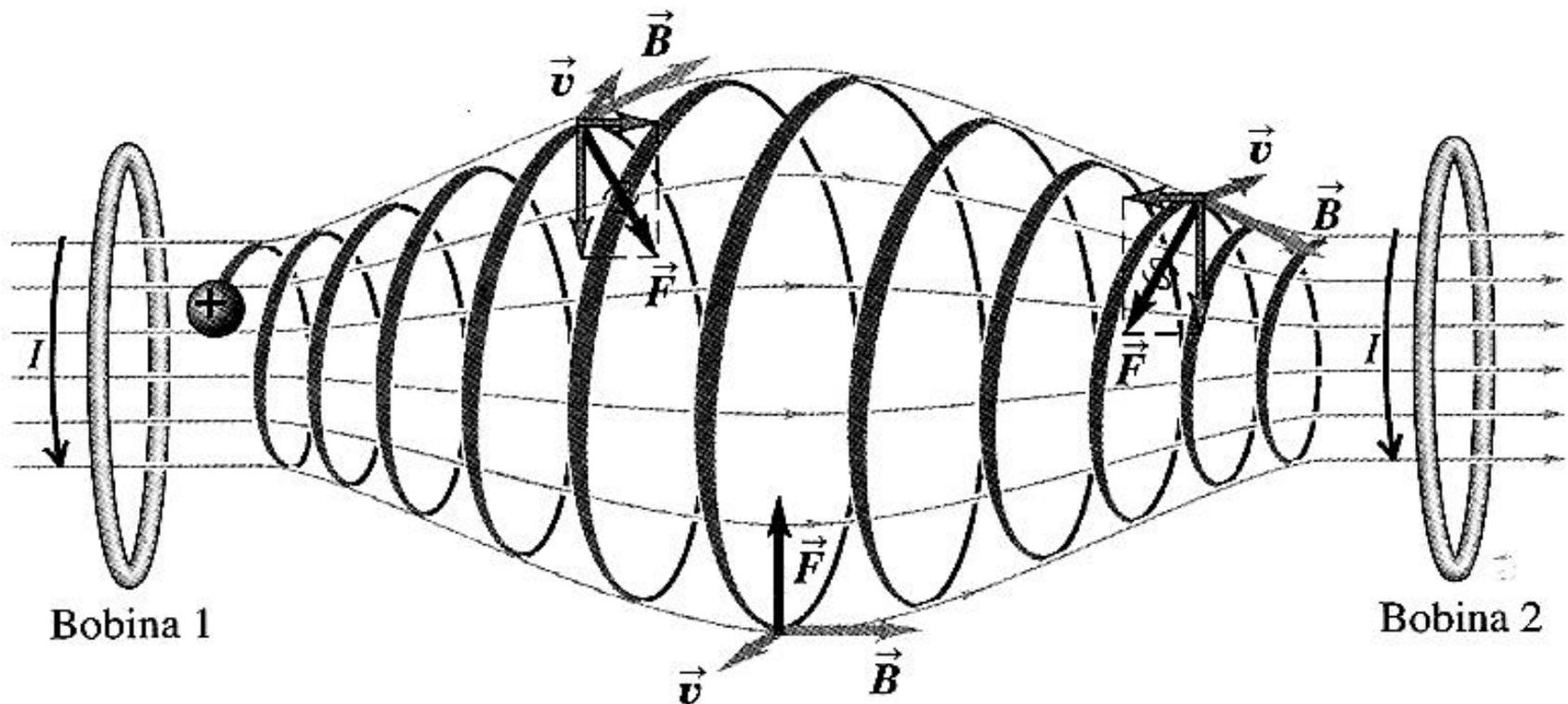
O passo da hélice, isto é, distância percorrida em x a cada volta da hélice percorrida é:

$$p = v_{\parallel}T = v_{\parallel} \frac{2\pi m}{|q|B}$$



Partículas carregadas em campos magnéticos não uniformes

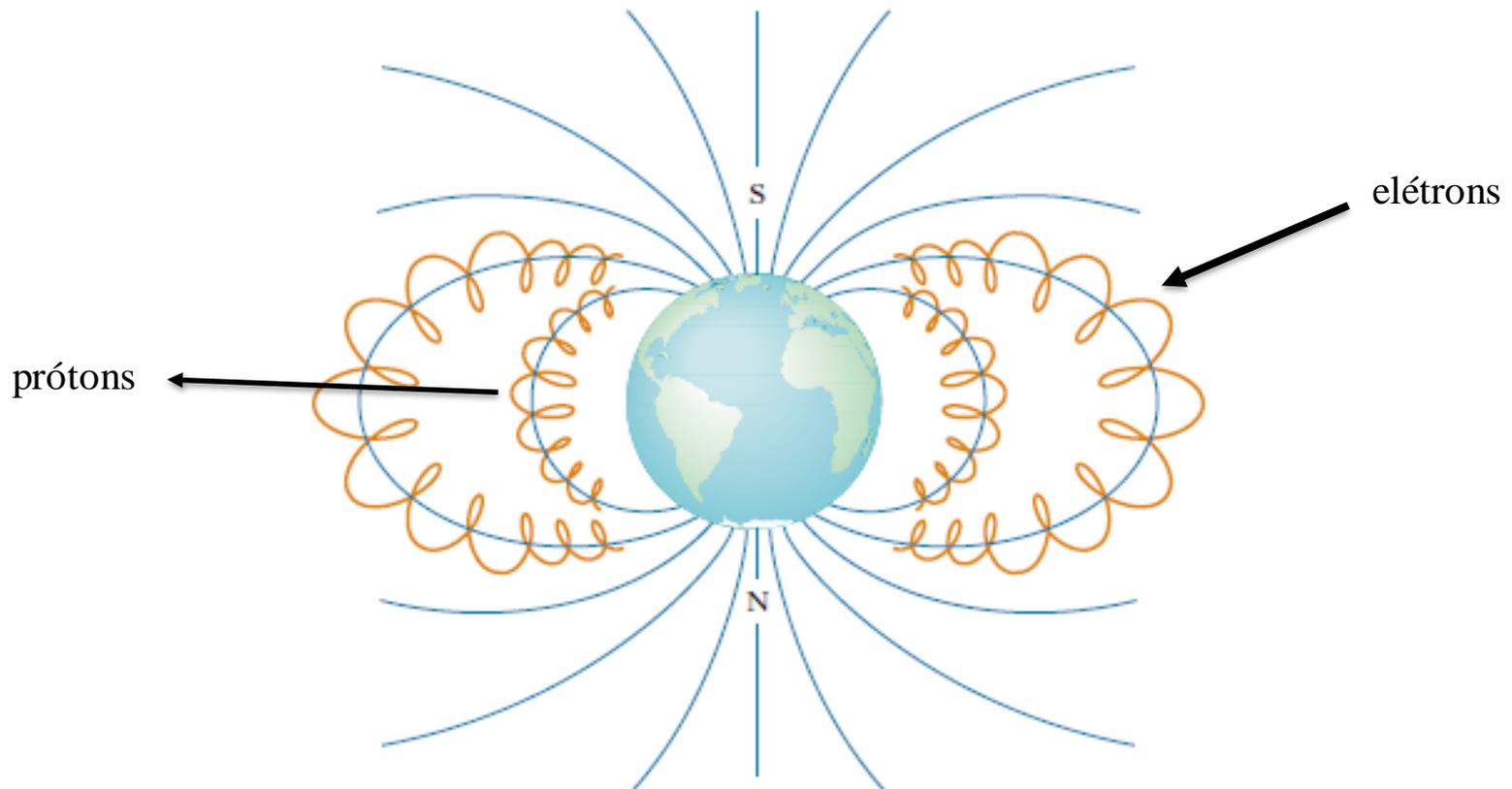
Garrafa magnética. As partículas carregadas próximas da extremidade da região sofrem a ação de força magnética orientada para o centro da região.





IF – 4300270– Eletricidade e Magnetismo I

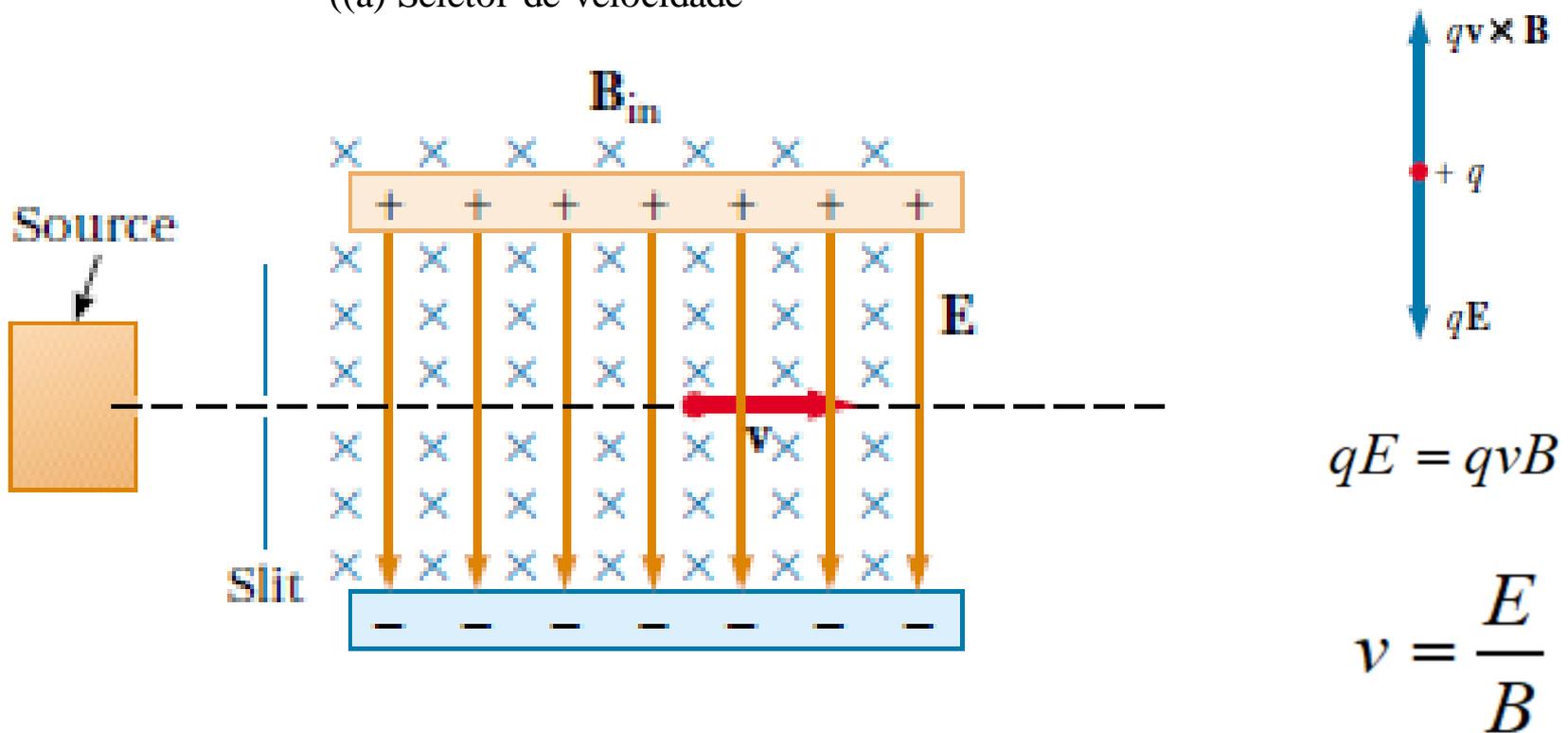
Cinturões de radiação de Van Allen. Nas proximidades dos polos, estas partículas carregadas podem escapar destes cinturões e ingressar na atmosfera, produzindo a Aurora Boreal.





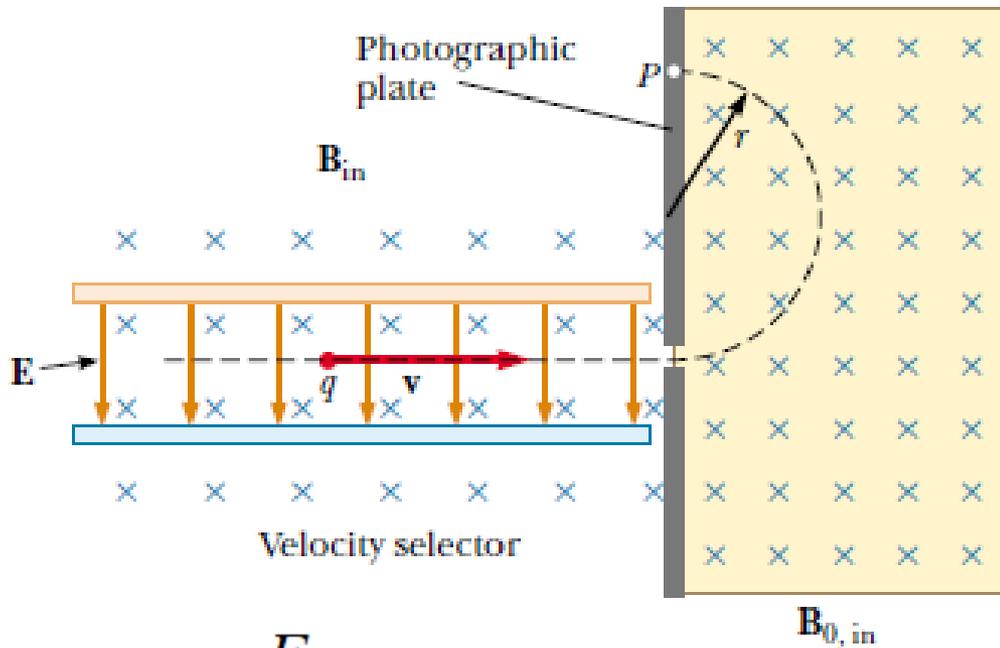
Aplicações envolvendo partículas carregadas em um campo magnético

((a) Seletor de velocidade





(b) Espectrômetro de massa



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

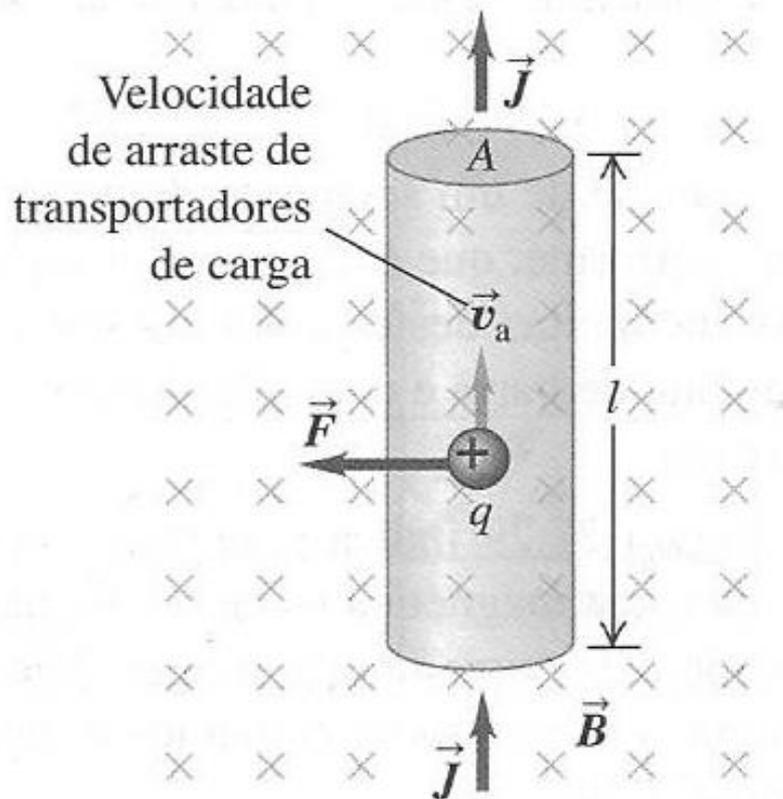
Usando a Eq. (1):

$$\frac{m}{|q|} = \frac{RB_0}{v}$$

Experimento bom para
diferenciar isótopos



Força sobre um condutor transportando uma corrente



$$F = qvB$$

Em um comprimento l do fio, o número de cargas presente é nAl , onde n é a densidade de cargas. A força exercida neste comprimento será:

$$F = (nAl)qv_aB = nqv_aA(Bl)$$

Vimos nas aulas anteriores

$$\frac{I}{A} = J = nqv_a$$

Portanto:

$$F = BIl$$

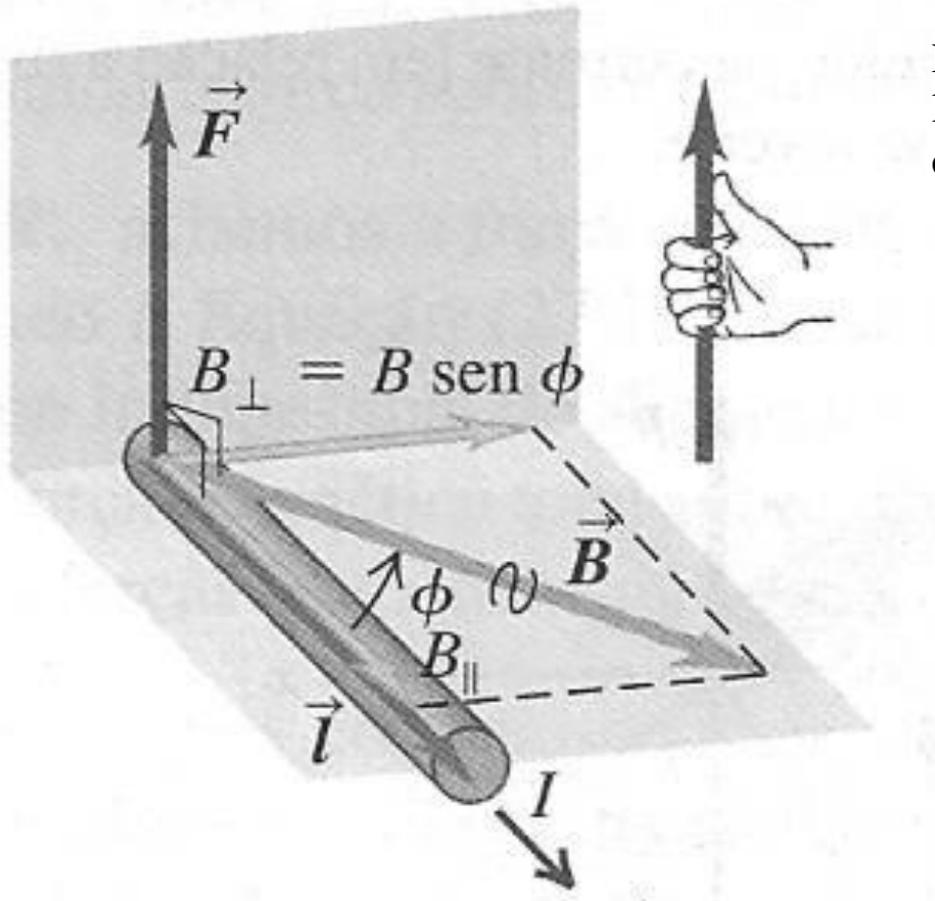


Quando o campo \mathbf{B} não é perpendicular ao fio e forma um ângulo ϕ com ele, temos:

$$F = IlB_{\perp} = IlB \sin \phi$$

Representando o segmento do fio pelo vetor \mathbf{l} ao longo do fio e com sentido idêntico a da corrente, então a força \mathbf{F} que atua sobre o segmento é:

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$$





Efeito do campo magnético sobre fios condutores

