



Universidade Federal do ABC

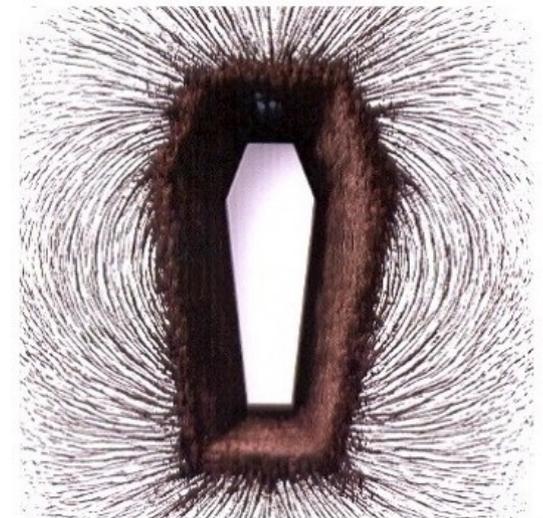
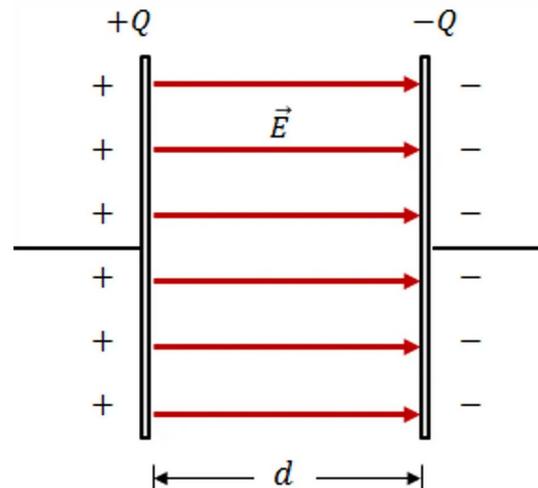
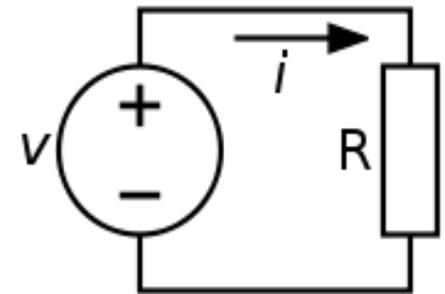
# Fenômenos Eletromagnéticos

11. Síntese histórica, O campo magnético, Movimento de uma partícula carregada em um campo magnético uniforme, Aplicações envolvendo estas

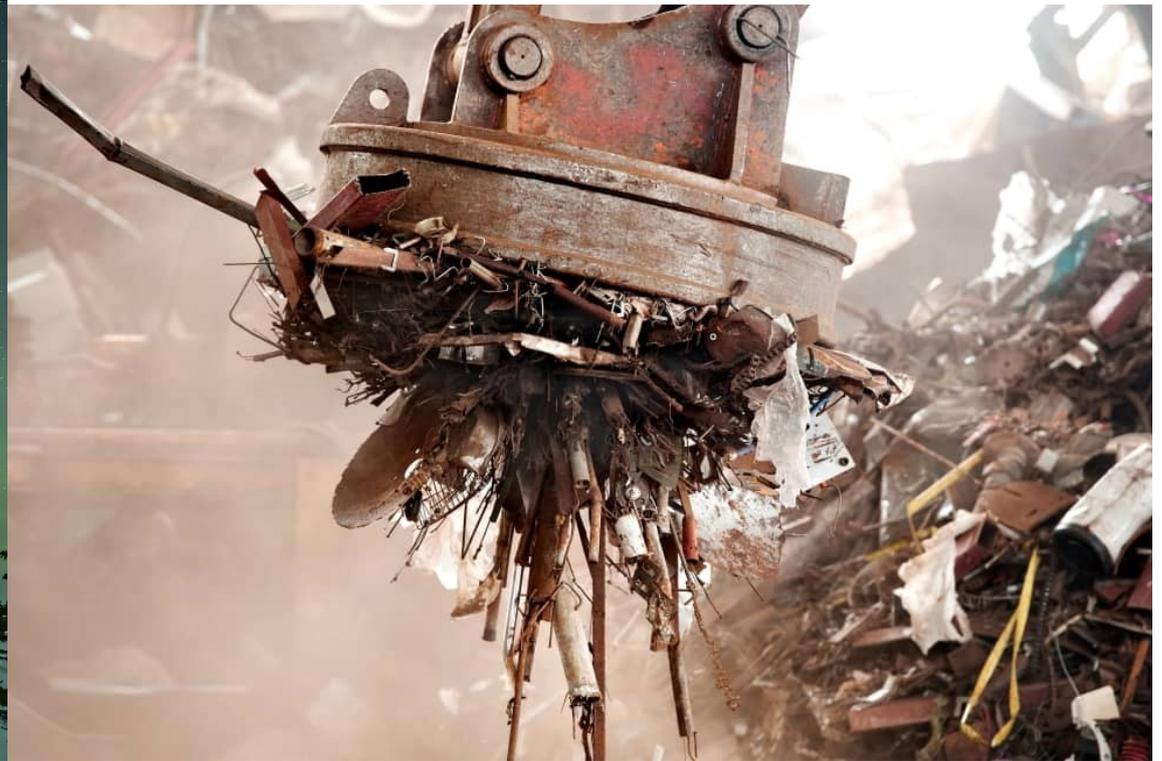
Prof. Pieter Westera

[pieter.westera@ufabc.edu.br](mailto:pieter.westera@ufabc.edu.br)

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/EM.html>



# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos



**Forças e Campos Magnéticos** têm muitas **manifestações e aplicações** no nosso mundo, como **auroras, atração e repulsão de materiais magnéticos; (eletro)ímãs, motores, alto-falantes, fitas magnéticas, veículos de levitação...** Veremos também que **fenômenos magnéticos e elétricos são inseparáveis**, eles são dois lados da mesma moeda.

# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Revisão Histórica

século XII a. C., **China**: utilização da **bússola**, que tinha sido **inventada** pelos **árabes** ou **indianos**.



Si Nan - bússola chinesa, a mais antiga do mundo. Século I d.C.

Em **~800 a. C.**, o **magnetismo** já era conhecido pelos **gregos**.

Um **mineral** que eles acharam na região **Magnésia** que eles chamaram **magnetita**, se **atraía** ou **repelia** “magicamente”.



Magnetita

# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Revisão Histórica

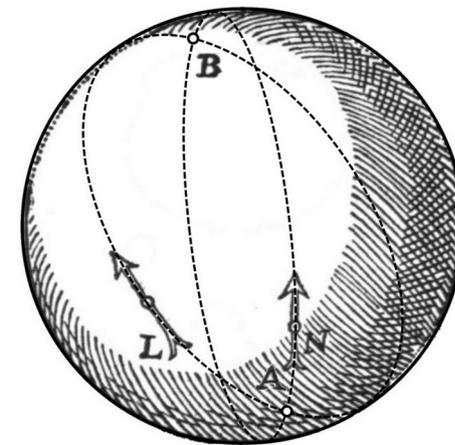
**1269:** Pierre de Maricourt descobriu que um ímã tem polos que atraem ou repelem a agulha de uma bússola.



Pierre de Maricourt (1240-?)

Mais tarde, estes polos foram chamados de norte e sul. Similar a cargas elétricas, polos iguais se repelem e polos opostos se atraem.

!!! O polo magnético da Terra perto do polo geográfico sul é um polo magnético norte, e vice-versa.



# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Revisão Histórica

**1600:** William Gilbert estendeu os estudos sobre magnetismo a outros materiais.

**1750:** John Michell demonstrou as forças entre polos de ímãs usando uma balança de torção

(o mesmo aparelho que o Coulomb usou).

=> A força magnética cai com o quadrado da distância (igual como a eletrostática).

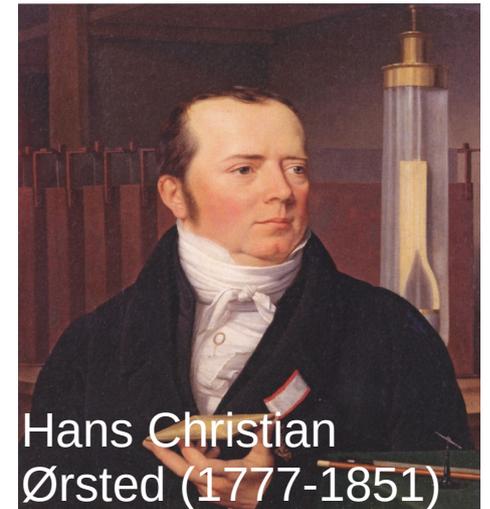
Há muitas semelhanças entre as forças entre cargas elétricas e entre polos magnéticos, mas também diferenças: Polos magnéticos nunca aparecem sozinhos (cada polo sul é acompanhado por um polo norte).



# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

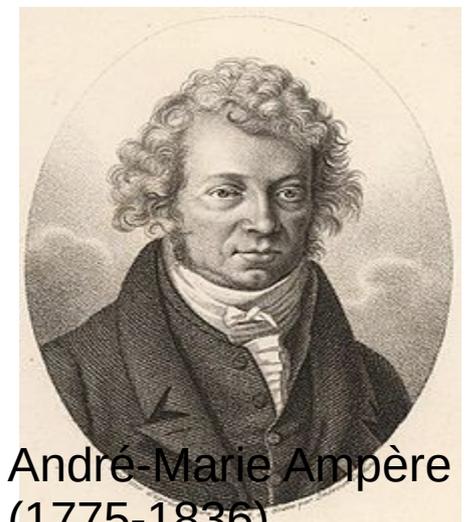
## Revisão Histórica

**1819:** **Ørsted** descobriu por acaso, que **correntes elétricas** geram **campos magnéticos**.



Hans Christian  
Ørsted (1777-1851)

Logo depois, **Ampère** conseguiu **quantificar** as **forças** entre **condutores** conduzindo **corrente**, e sugeriu que **correntes elétricas** **circulares** de **dimensões moleculares** são **responsáveis** por **todos** os **fenômenos** **magnéticos**.

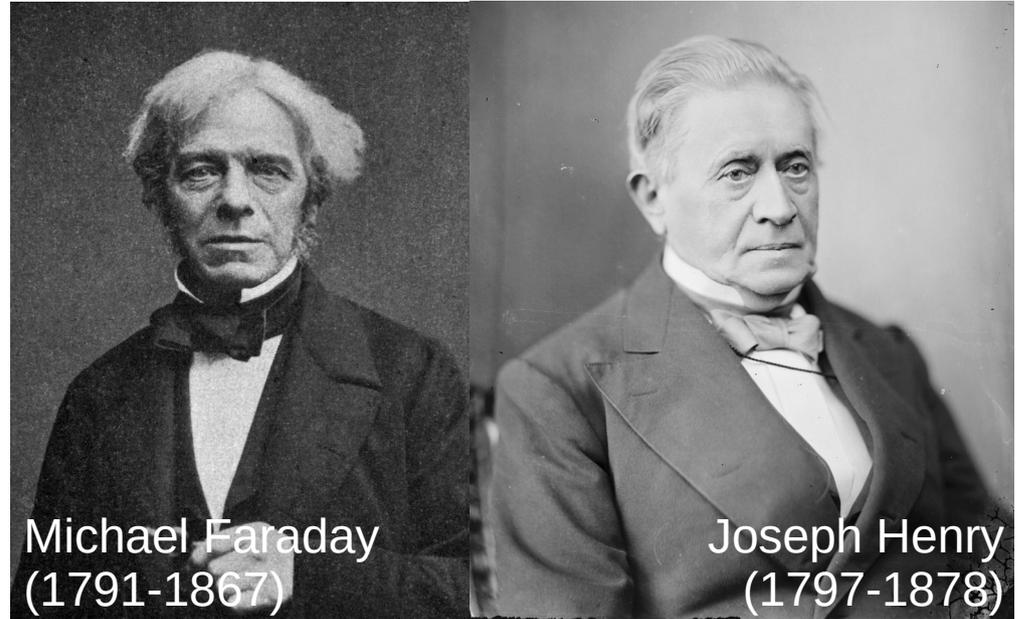


André-Marie Ampère  
(1775-1836)

# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Revisão Histórica

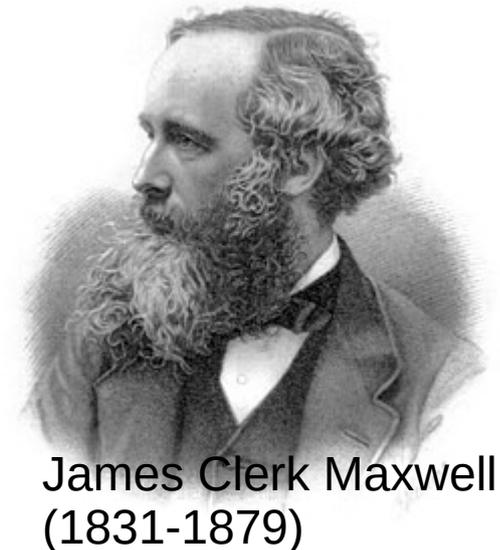
década 1820: **Faraday** e **Henry** identificaram mais **conexões** entre a **eletricidade** e o **magnetismo**:  
Um **campo magnético variável produz** um **campo elétrico**.



Michael Faraday  
(1791-1867)

Joseph Henry  
(1797-1878)

**1873**: **Maxwell** descobre que um **campo elétrico variável produz** um **campo magnético** e compila as **Leis de Maxwell**.



James Clerk Maxwell  
(1831-1879)

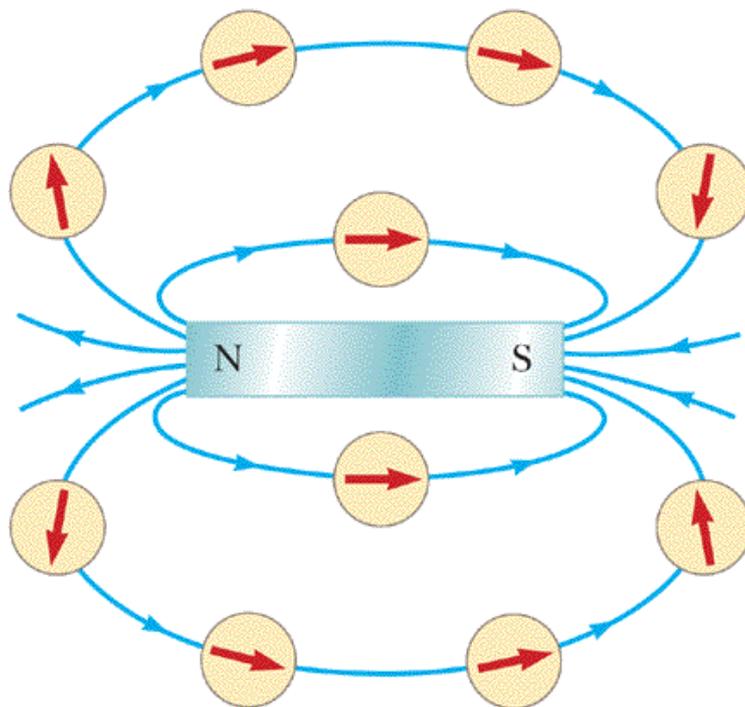
# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## O Campo Magnético

ou indução magnética, gerado por cargas elétricas em movimento e por materiais com magnetismo permanente.

Um campo vetorial  $\mathbf{B}$ , apontando na direção, naquela o polo norte de uma agulha de bússola aponta.

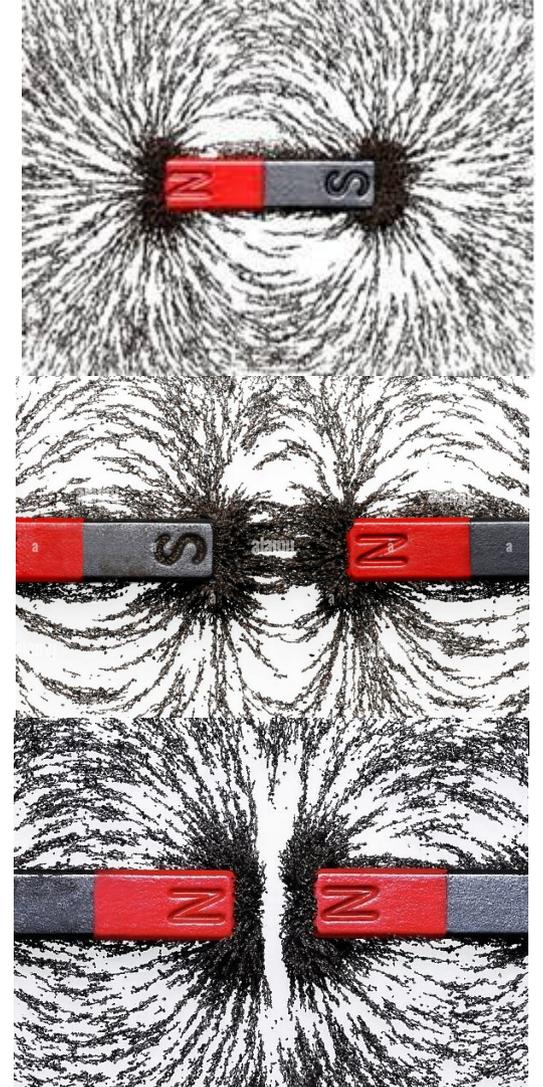
O campo magnético gerado por um ímã vai do seu polo norte pro seu polo sul, similar ao campo elétrico de um dipolo elétrico.



# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## O Campo Magnético

**Padrões de campo magnético** ao redor de **barras imantadas** evidenciados por **limalha de ferro**.



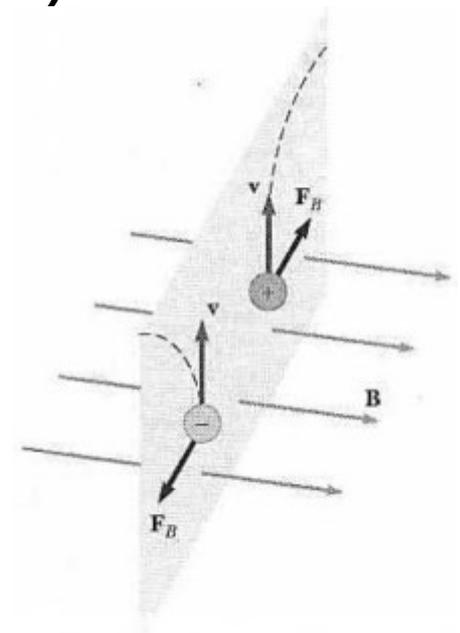
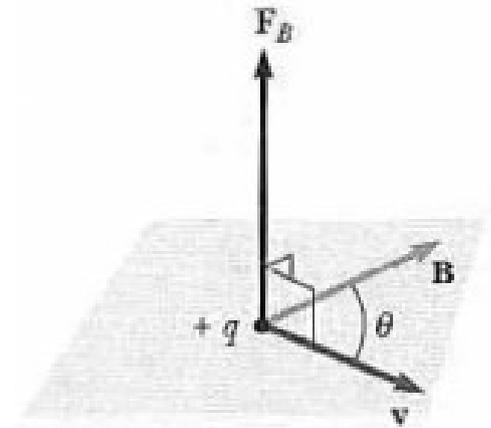
# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

Um **campo magnético**  $\mathbf{B}$  exerce uma **força** sobre uma **carga elétrica**  $q$  em **movimento** com **velocidade**  $\mathbf{v}$ , a **força magnética**  $\mathbf{F}_B$ :

- $\mathbf{F}_B \propto q$  (incl. muda de sentido quando  $q$  muda de sinal)
- $\mathbf{F}_B \perp \mathbf{B}$  e  $\perp \mathbf{v}$  ( $\perp$  ao plano formado por  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{v}$ )
- Se o ângulo entre  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{v}$  é  $\theta$ ,  $F_B \propto \sin \theta$   
 $\Rightarrow$  Se  $\mathbf{v} \parallel \mathbf{B} \Rightarrow F_B = 0$  e  
 $F_B$  tem seu valor máximo, se  $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$

$$\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

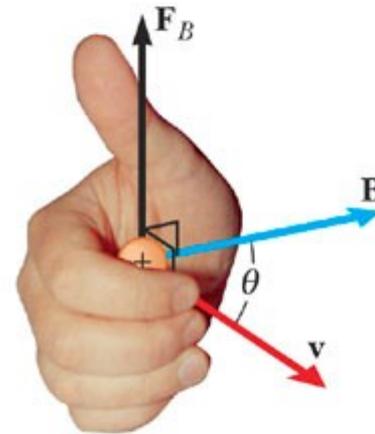
$$\Rightarrow [B] = \text{N/C(m/s)} = \text{Ns/Cm} = \text{T (tesla)}$$



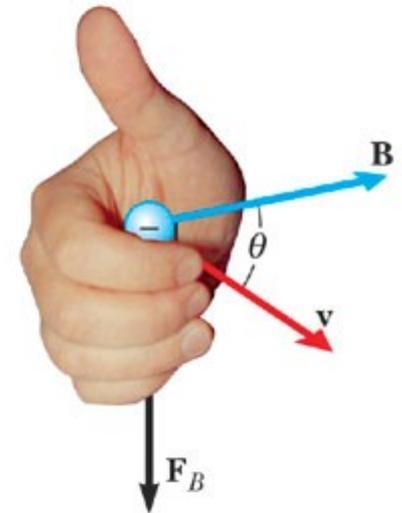
# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

$$\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

**Regra da mão direita**  
para determinar a direção  
da força magnética.



(a)



(b)

# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Enigma Rápido 22.1

Se uma **partícula carregada** se **desloca** em **linha reta** em alguma região do espaço, você pode dizer que o **campo magnético** nessa região é **nulo**?

# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Enigma Rápido 22.1

Se uma **partícula carregada** se **desloca** em **linha reta** em alguma região do espaço, você pode dizer que o **campo magnético** nessa região é **nulo**?

**Resposta:**

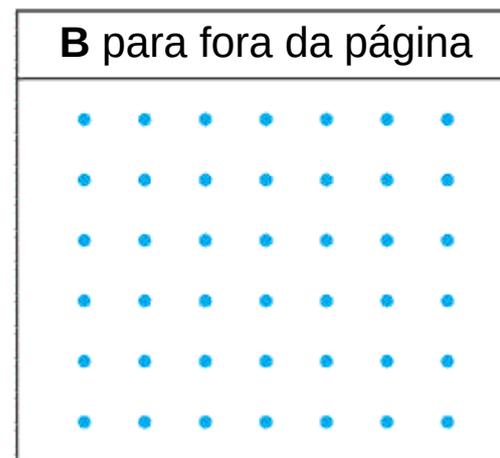
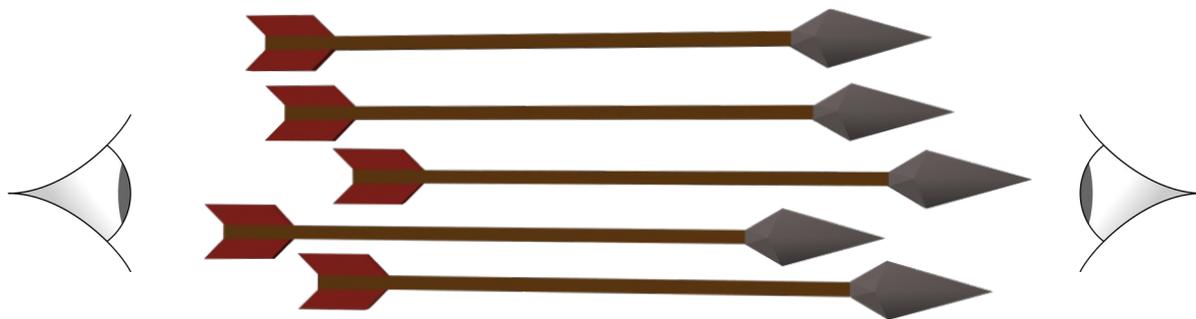
**Não**, ele também **pode** ser **(anti)paralelo** à **velocidade** da **partícula**.

(ou pode haver uma outra força cancelando a magnética)

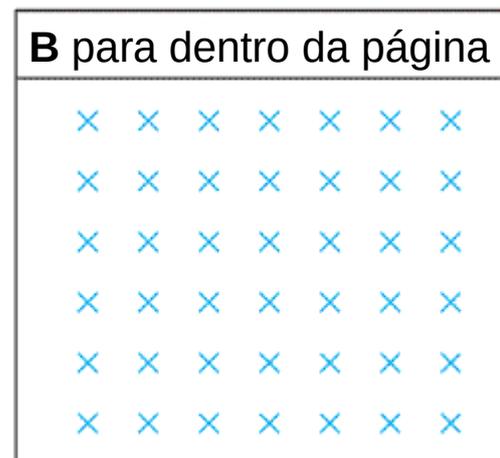
# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

Maneira de desenhar vetores perpendiculares ao plano "de desenho" (papel, tela, ...), isto é, na direção da linha de visada.

Como olhar de frente ou de trás para flechas



ou  $\odot$



ou  $\otimes$

# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Resumo: Comparação entre as Forças Elétrica e Magnética

Força Elétrica	Força Magnética
$\propto q$	$\propto q$
$\propto r^{-2}$	$\propto r^{-2}$
(anti)paralelo ao campo	perpendicular ao campo
Não depende da velocidade da partícula	Depende da velocidade da partícula
Realiza trabalho sobre a partícula	Não realiza trabalho sobre a partícula (já que é $\perp \mathbf{v}$ )
pode alterar $v =  \mathbf{v} $	Não altera $v$ (mas, sim a direção de $\mathbf{v}$ )

# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Enigma Rápido 22.2

As **linhas** de **campo elétrico** algumas vezes são denominadas "**linhas de força**".

Esse é um nome **adequado** para as **linhas** de **campo magnético**?

# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Enigma Rápido 22.2

As **linhas** de **campo elétrico** algumas vezes são denominadas "**linhas de força**".

Esse é um nome **adequado** para as **linhas** de **campo magnético**?

**Resposta:**

**Não**, por que a **força magnética não** é na **direção** do **campo** (mas perpendicular a este).

# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Pensando a Física 22.1

Em uma viagem de negócios à **Austrália**, você leva a **bússola feita** nos **Estados Unidos** que usou em seu tempo de escoteiro.

Essa bússola **funciona corretamente** na **Austrália**?

# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Pensando a Física 22.1

Em uma viagem de negócios à **Austrália**, você leva a **bússola feita** nos **Estados Unidos** que usou em seu tempo de escoteiro.

Essa bússola **funciona corretamente** na **Austrália**?

Resposta:

**Sim.**

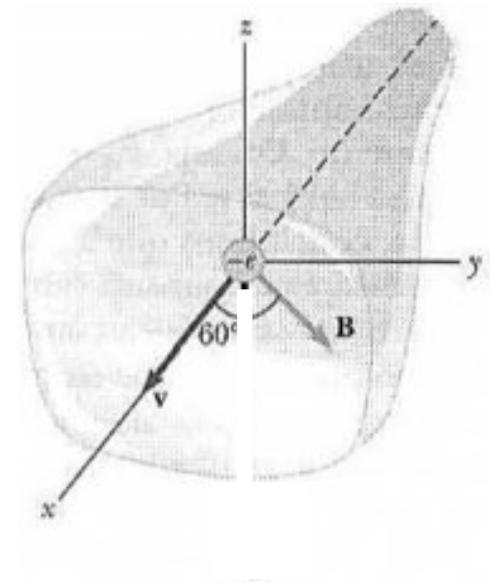
No **hemisfério sul**, a agulha **também aponta** pro **norte** por estar **repelido** pelo **polo magnético** (norte) que se encontra perto do **polo sul geográfico**.

# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Exemplo 22.1 Um Elétron em Movimento em um Campo Magnético

Um **elétron** em um **tubo** de **imagem** de um **aparelho** de **televisão** **desloca-se** para a **frente** do tubo com uma **velocidade** de  $8.0 \cdot 10^6$  m/s ao longo do **eixo x** (vide figura). O tubo é **envolvido** por uma **bobina** de fios que cria um **campo magnético** de magnitude 0.025 T, direcionado a um **ângulo** de  $60^\circ$  em relação ao eixo x, estando no **plano xy**.

Calcule a **força magnética** sobre o **elétron** e sua **aceleração**.



# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

Exemplo 22.1 Um Elétron em Movimento em um Campo Magnético

Solução:

Utilizando  $\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , encontramos

a **magnitude** da **força magnética**:

$$F_B = |q|vB \sin \theta = 2.8 \cdot 10^{-11} \text{ N}$$

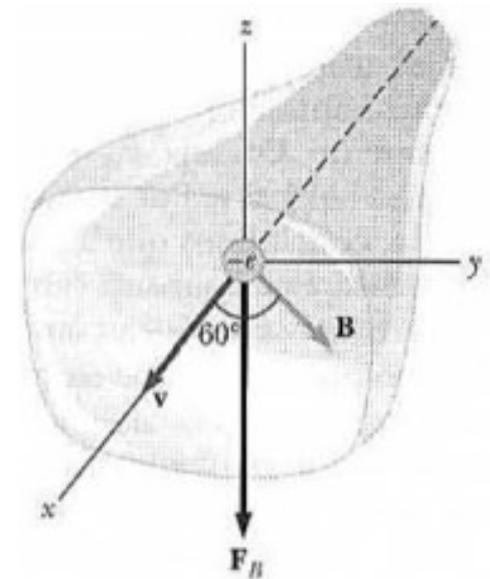
Regra da **mão direita**:

$\mathbf{F}_B$  é na direção **z negativa**:

$$\mathbf{F}_B = (0, 0, -2.8 \cdot 10^{-11}) \text{ N}$$

$\mathbf{a} = \mathbf{F}_B / m_e = 3.1 \cdot 10^{16} \text{ m/s}^2$  na direção **z negativa**

$$((0, 0, -3.1 \cdot 10^{16}) \text{ m/s}^2)$$



# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Exercício

Calcule a **magnitude** da **aceleração** de um **próton** que se desloca através do **mesmo campo magnético** com a **mesma velocidade** do **elétron**.

# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Exercício

Calcule a **magnitude** da **aceleração** de um **próton** que se desloca através do **mesmo campo magnético** com a **mesma velocidade** do **elétron**.

**Solução:**

$$F_B = |q|vB \sin \theta = 2.8 \cdot 10^{-11} \text{ N}$$

Regra da mão direita:  $\mathbf{F}_B$  é na direção z positiva:

$$\mathbf{F}_B = (0, 0, +2.8 \cdot 10^{-11}) \text{ N}$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{F}_B / m_p = 1.7 \cdot 10^{13} \text{ m/s}^2 \text{ na direção z positiva}$$

$$((0, 0, +1.7 \cdot 10^{13}) \text{ m/s}^2)$$

ou

$$\mathbf{a}_p = -m_e / m_p \cdot \mathbf{a}_e = (0, 0, +1.7 \cdot 10^{13}) \text{ m/s}^2$$

# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Exercício

Um **próton** se **desloca horizontalmente** com uma **velocidade** de  $2.5 \cdot 10^6$  m/s, fazendo um **ângulo reto** com o **campo magnético**.

Qual **campo magnético** é necessário para **equilibrar** o **peso** do **próton** e mantê-lo em movimento horizontal?

# Forças Magnéticas e Campos Magnéticos

## Exercício

Um **próton** se **desloca horizontalmente** com uma **velocidade** de  $2.5 \cdot 10^6$  m/s, fazendo um **ângulo reto** com o **campo magnético**.

Qual **campo magnético** é necessário para **equilibrar** o **peso** do **próton** e mantê-lo em movimento horizontal?

**Solução:**

$$F_B = m_p g = |e\mathbf{v} \times \mathbf{B}| = evB$$

$$\Rightarrow \mathbf{B} = m_p g / ev = 4.1 \cdot 10^{-14} \text{ T}$$

Regra da mão direita: Olhando na direção  $\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{B}$  será na direção esquerda (horizontal).

# Movimento de uma Partícula Carregada em um Campo Magnético

Campo Uniforme, Partícula se Movimentando no Plano Perpendicular ao Campo

- Movimento **confinado** ao **plano**  $\perp \mathbf{B}$ , já que  $\mathbf{F}_B \perp \mathbf{B}$ .

-  $\mathbf{F}_B \perp \mathbf{v}$

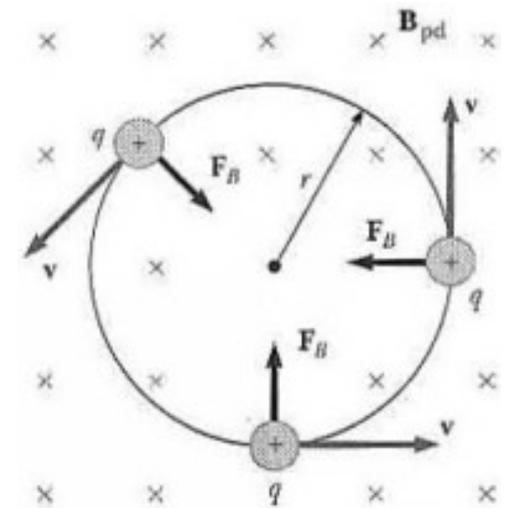
$\Rightarrow \mathbf{v}$  **muda** de **direção**, mas **não** de **módulo**,  $v = \text{const.}$

-  $\mathbf{B} \perp \mathbf{v} \Rightarrow \mathbf{F}_B = |q\mathbf{v} \times \mathbf{B}| = |q|vB = \text{const.}$

$\Rightarrow$  exatamente as propriedades de uma **força centrípeta**

$\Rightarrow$  **Movimento circular uniforme** com  $\mathbf{F}_{\text{centrípeta}} = \mathbf{F}_B$ ,

isto é,  $mv^2/r = qvB$



# Movimento de uma Partícula Carregada em um Campo Magnético

Campo Uniforme, Partícula se Movimentando no Plano Perpendicular ao Campo

Movimento circular uniforme

com  $\mathbf{F}_{\text{centrípeta}} = \mathbf{F}_B$ ,  $mv^2/r = qvB$

=> Raio da trajetória:  $r = mv/qB$ ,

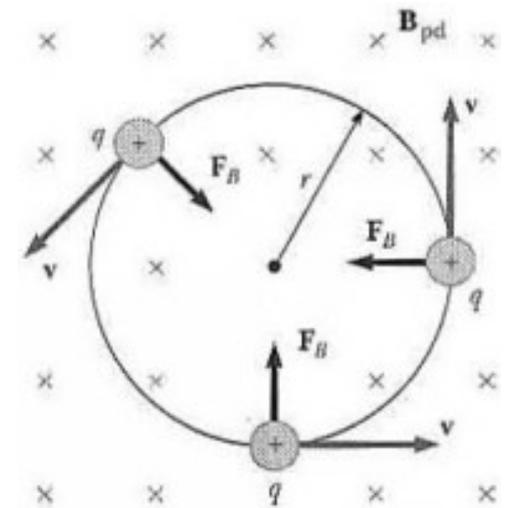
Frequência angular:  $\omega = v/r = qB/m$

frequência de cíclotron

Período:  $T = 2\pi r/v = 2\pi/\omega = 2\pi m/qB$

$\omega$  e  $T$  não dependem da velocidade da partícula ou do raio da trajetória.

Uma partícula mais rápida fará um círculo maior, no mesmo tempo que o círculo menor que ela faria se fosse mais lenta.



# Movimento de uma Partícula Carregada em um Campo Magnético

Campo Uniforme, Partícula se Movimentando a um Ângulo em Relação ao Plano Perpendicular ao Campo

- Os **componentes  $\perp \mathbf{B}$**  (no caso da figura, os componentes  $y$  e  $z$ ) fazem o **movimento circular uniforme** descrito no slide anterior.

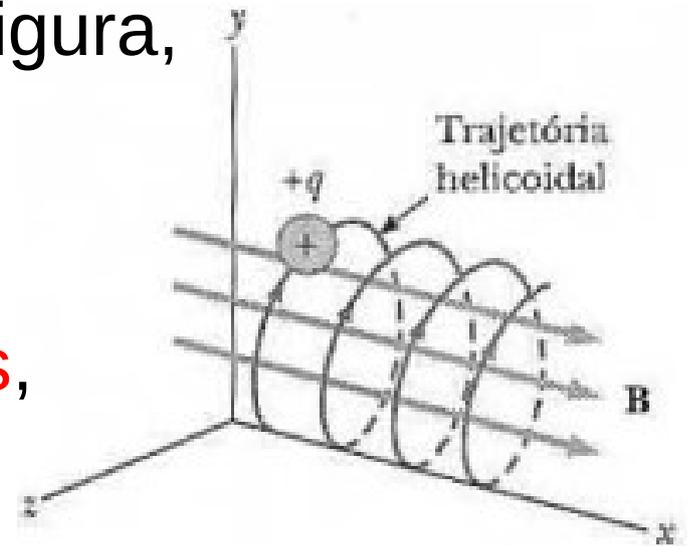
Podemos usar as **mesmas fórmulas**, substituindo  $\mathbf{v}$  por  $\mathbf{v}_{\perp}$

(neste caso  $v_{\perp} = \sqrt{v_y^2 + v_z^2}$ :

$$r = mv_{\perp}/qB, \omega = qB/m, T = 2\pi m/qB$$

- O **componente  $\parallel \mathbf{B}$**  (aqui, o componente  $x$ ) é **constante**, já que  $F_{B,x} = 0$

=> **Movimento helicoidal** como na figura



# Movimento de uma Partícula Carregada em um Campo Magnético

## Enigma Rápido 22.3

Uma **partícula carregada desloca-se** ao longo de uma **trajetória circular** na presença de um **campo magnético constante** aplicado **perpendicularmente** à **velocidade** da partícula.

A **partícula ganha energia** do **campo magnético**?

# Movimento de uma Partícula Carregada em um Campo Magnético

## Enigma Rápido 22.3

Uma **partícula carregada desloca**-se ao longo de uma **trajetória circular** na presença de um **campo magnético constante** aplicado **perpendicularmente** à **velocidade** da partícula.

A **partícula ganha energia** do **campo magnético**?

Resposta:

**Não.**

Já que a **força magnética** é **perpendicular** ao **deslocamento** da partícula, ela **não** realiza **trabalho** sobre esta.

Maneira alternativa de argumentar: O **módulo** da **velocidade** da partícula **não muda**, e com isto a sua **energia cinética** **tampouco**.

# Movimento de uma Partícula Carregada em um Campo Magnético

## Enigma Rápido 22.4

Como o movimento de uma partícula carregada pode ser usado para se distinguir entre um campo magnético e um campo elétrico em uma determinada região?

# Movimento de uma Partícula Carregada em um Campo Magnético

## Enigma Rápido 22.4

Como o **movimento** de uma **partícula carregada** pode ser **usado** para se **distinguir** entre um **campo magnético** e um **campo elétrico** em uma determinada região?

**Resposta:**

**Lançando** a partícula em **direções diferentes**.

Se o **campo** for **magnético**, a partícula **sempre** será **acelerada** em uma direção **perpendicular** ao seu **movimento** (ou não acelerada, caso  $v \parallel B$ ) e o **módulo** da sua **velocidade nunca mudará**.

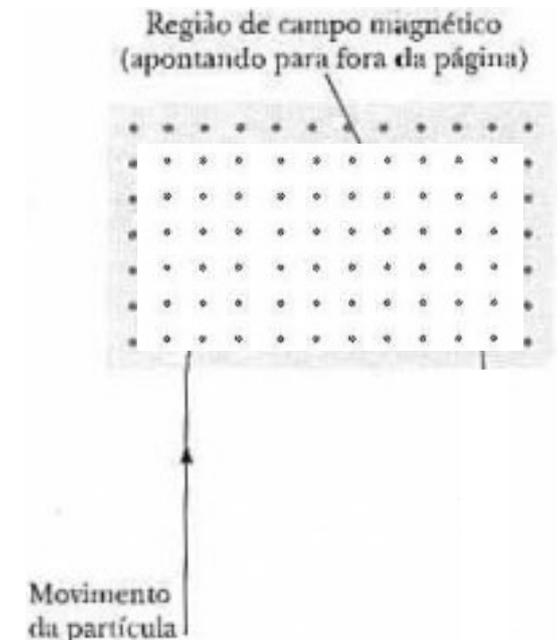
Se o campo for **elétrico**, a **aceleração sempre** será a **mesma** ( $qE/m$ ), e dependendo da direção inicial da partícula, ela **poderá ganhar** ou **perder energia cinética**.

# Movimento de uma Partícula Carregada em um Campo Magnético

## Pensando a Física 22.2

Suponha que um **campo magnético uniforme** exista em uma **região finita** do espaço como na figura.

Você pode **injetar** uma **partícula carregada** nessa região e fazer que ela **permanece presa** na região pela **força magnética**?

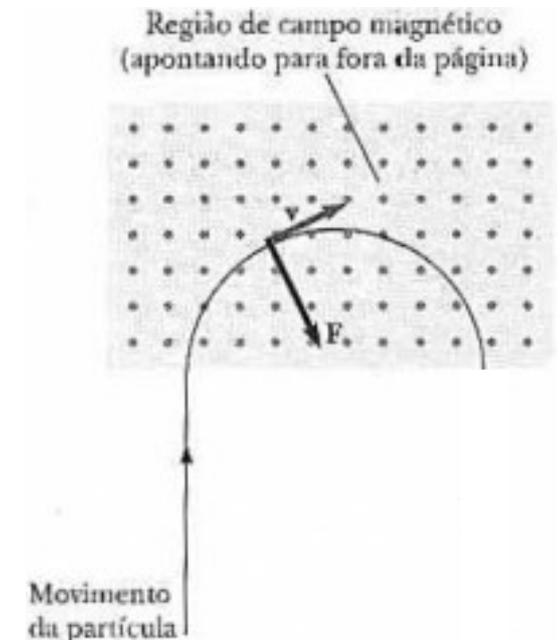


# Movimento de uma Partícula Carregada em um Campo Magnético

## Pensando a Física 22.2

Suponha que um **campo magnético uniforme** exista em uma **região finita** do espaço como na figura.

Você pode **injetar** uma **partícula carregada** nessa região e fazer que ela **permanece presa** na região pela **força magnética**?



**Resposta:**

**Não**, ou ela **sai** da região após uma **meia-volta** como no desenho, **ou** (se ela tiver um **componente paralelo** ao **campo**) talvez **pela "frente"** ou por **"trás"**.

# Movimento de uma Partícula Carregada em um Campo Magnético

## Exemplo 22.2 Um Próton Deslocando-se Perpendicularmente a um Campo Magnético Uniforme

Um **próton** está deslocando-se em uma **órbita circular** de **raio** 14.0 cm em um **campo magnético uniforme** de 0.350 T dirigido **perpendicularmente** em relação à **velocidade** do próton.

Encontre a **velocidade translacional** do próton.

**Exercício:** Se um **elétron** desloca-se perpendicularmente ao mesmo campo magnético com a **mesma velocidade** translacional, qual é o **raio** de sua **órbita circular**?

# Movimento de uma Partícula Carregada em um Campo Magnético

## Exemplo 22.2 Um Próton Deslocando-se Perpendicularmente a um Campo Magnético Uniforme

Um **próton** está deslocando-se em uma **órbita circular** de **raio** 14.0 cm em um **campo magnético uniforme** de 0.350 T dirigido **perpendicularmente** em relação à **velocidade** do próton.

Encontre a **velocidade translacional** do próton.

**Exercício:** Se um **elétron** desloca-se perpendicularmente ao mesmo campo magnético com a **mesma velocidade** translacional, qual é o **raio** de sua **órbita circular**?

**Solução:**

$$v = qBr/m = eBr_p/m_p = 4.69 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

**Exercício:**  $r_e = vm_e/eB = m_e/m_p \cdot r_p = 7.63 \cdot 10^{-5} \text{ m}$

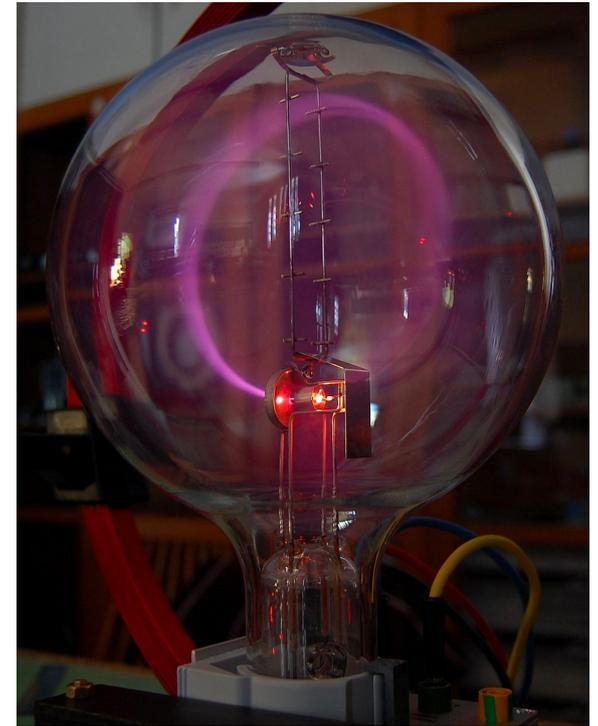
# Movimento de uma Partícula Carregada em um Campo Magnético

## Exemplo 22.3 Curvando um Feixe de Elétrons

Em um **experimento** projetado para **medir** a **intensidade** de um **campo magnético uniforme**, **elétrons** são **acelerados** a partir do **repouso** (por meio de um campo elétrico) através de uma **diferença** de **potencial** de 350 V.

Após **deixar** a região do **campo elétrico**, os elétrons **entram** em um **campo magnético** e percorrem uma **trajetória curva** por causa da **força magnética** exercida sobre eles.

O **raio** da trajetória é medida como sendo 7.50 cm.



# Movimento de uma Partícula Carregada em um Campo Magnético

## Exemplo 22.3 Curvando um Feixe de Elétrons

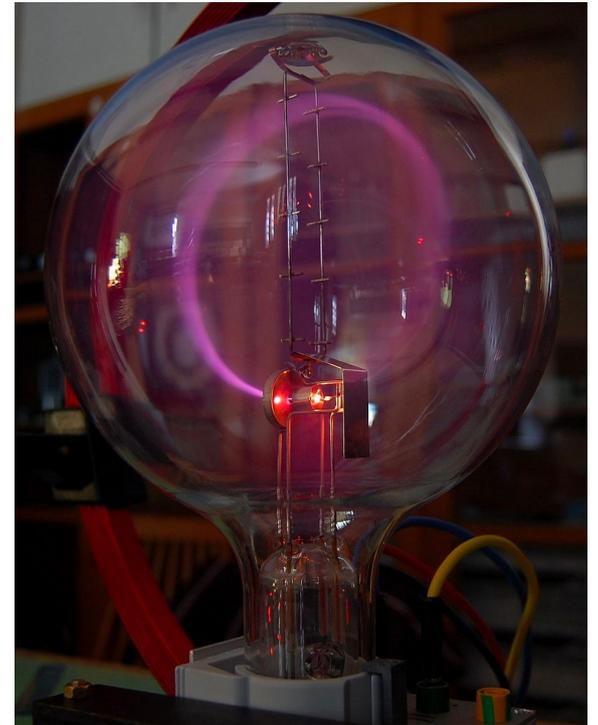
Supondo que o **campo magnético** é **perpendicular** ao **feixe**,

(a) qual é a **magnitude** do **campo**?

(b) qual é a **frequência angular** dos elétrons?

**Exercício:**

Qual é o **período** de **revolução** dos elétrons?



# Movimento de uma Partícula Carregada em um Campo Magnético

## Exemplo 22.3 Curvando um Feixe de Elétrons

Solução:

Dados:  $\Delta V = 350 \text{ V}$ ,

$r = 7.50 \text{ cm} = 0.075 \text{ m}$ ,  $q = -e$ ,  $m = m_e$

(a) **Conservação da energia** durante a **aceleração** pelo **campo elétrico**

( $v =$  velocidade final):

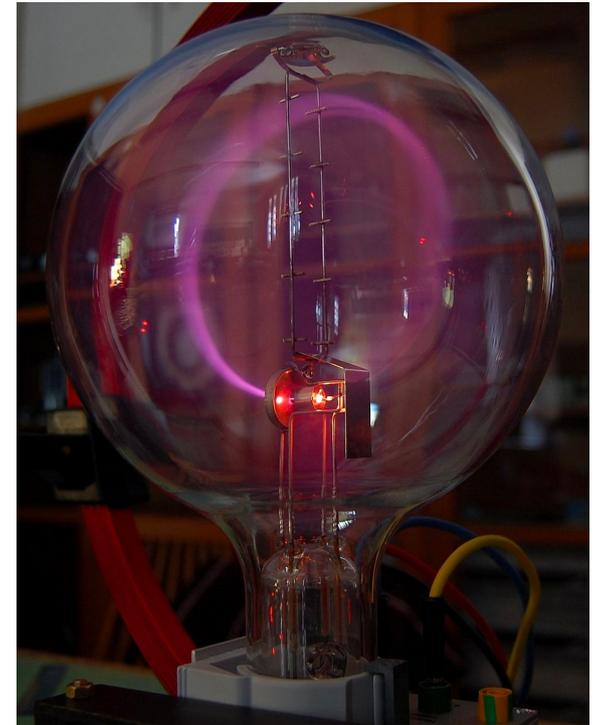
$$\begin{aligned}\Delta K + \Delta U &= \frac{1}{2}mv^2 + q\Delta V \\ &= \frac{1}{2}m_e v^2 - e\Delta V = 0\end{aligned}$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{2e\Delta V/m_e} = 1.11 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

$$B = mv/|q|r = m_e v/er = 8.43 \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

(b)  $\omega = v/r = eB/m_e = 1.48 \cdot 10^8 \text{ rad/s}$

**Exercício:**  $T = 2\pi/\omega = 2\pi m_e/eB = 42.5 \text{ ns}$



# Aplicações do Movimento de Partículas Carregadas em um Campo Magnético

## Força de Lorentz

No caso mais geral, sobre uma **partícula carregada** podem agir uma **força elétrica** e uma **magnética** ao **mesmo tempo**, caso ela **passa** por uma **região** com ambos um **campo elétrico** e **magnético**.

A **soma** das duas chamamos **força de Lorentz**

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

Agora veremos **três aplicações** envolvendo a força de Lorentz.

# Aplicações do Movimento de Partículas Carregadas em um Campo Magnético

## Filtro de Velocidades

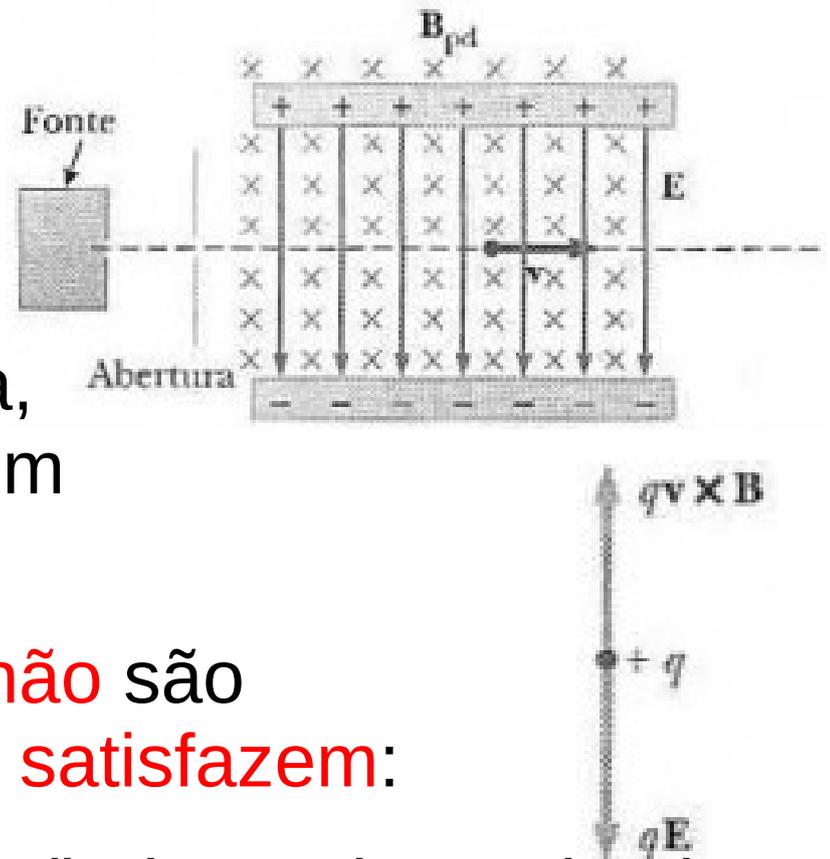
Em muitas **aplicações**, é preciso que **todas** as **partículas** têm a **mesma velocidade**.

Com um arranjo como neste figura, as **forças elétrica** e **magnética** agem em **direções opostas**.

Elas se **cancelam** e as partículas **não** são **defletidas**, se as suas **velocidades satisfazem**:

$$|\mathbf{F}_E| = |\mathbf{F}_B|, \text{ i.e. } qE = qvB \Rightarrow v = E/B \text{ (independente de } q)$$

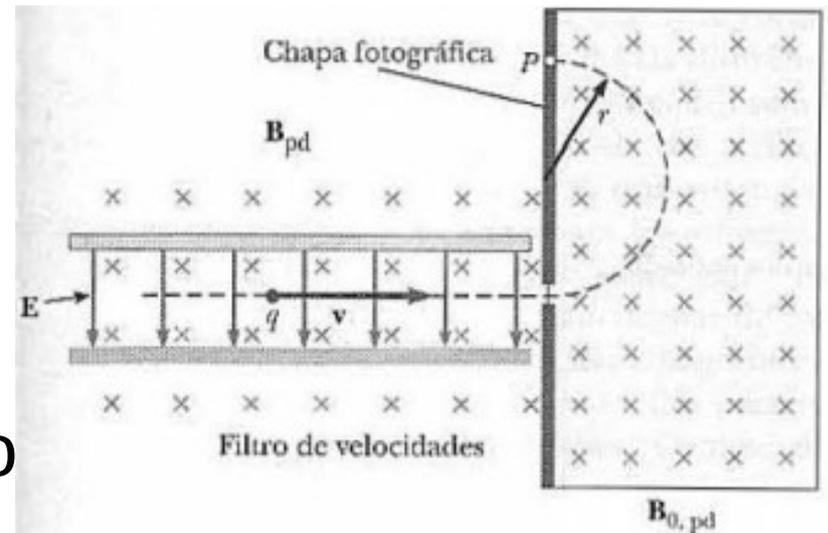
Para uma partícula com  $v \neq E/B$ , uma das duas forças será maior, e a partícula será defletida para cima ou baixo.



# Aplicações do Movimento de Partículas Carregadas em um Campo Magnético

## O Espectrômetro de Massa

- **separa íons** de acordo com a **razão  $m:q$** , já que a **aceleração** devida à **força de Lorentz** (para **partículas com a mesma velocidade**) e, portanto, a **trajetória**, depende desta razão

$$\mathbf{a} = \mathbf{F}_L/m = q/m \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$


O **espectrômetro de massa de Bainbridge** se aproveita deste fato:

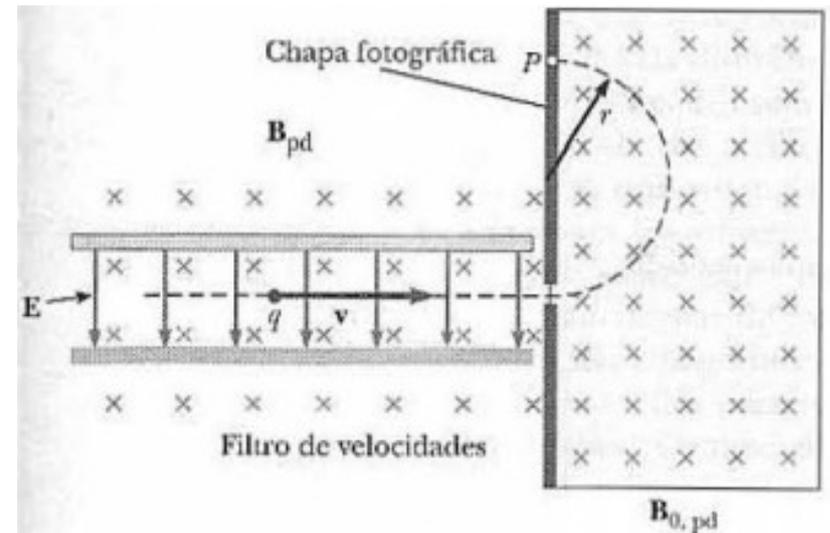
- Primeiro, os **íons** passam por um **filtro de velocidades**  
=> Todos que **chegam** na região com **apenas um campo magnético** terão a **mesma velocidade**  $v = E/B$ .

# Aplicações do Movimento de Partículas Carregadas em um Campo Magnético

## O Espectrômetro de Massa

Na **região** com **apenas** um **campo magnético**, eles percorrem um **semicírculo** com **raio**  $r = mv/qB$  e **batem** na **tela fosforescente** a  $2r = m/q \cdot v/B$  do **ponto**, onde tinham **entrado** na região.

Assim, dá para **separar**, por exemplo, **isótopos** do **mesmo íon**, que têm a **mesma carga** mas **não a mesma massa**.

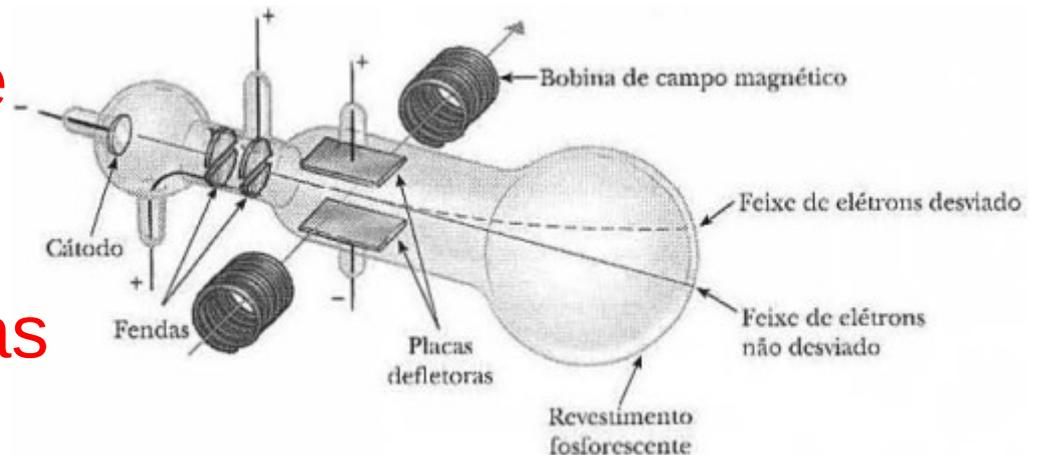
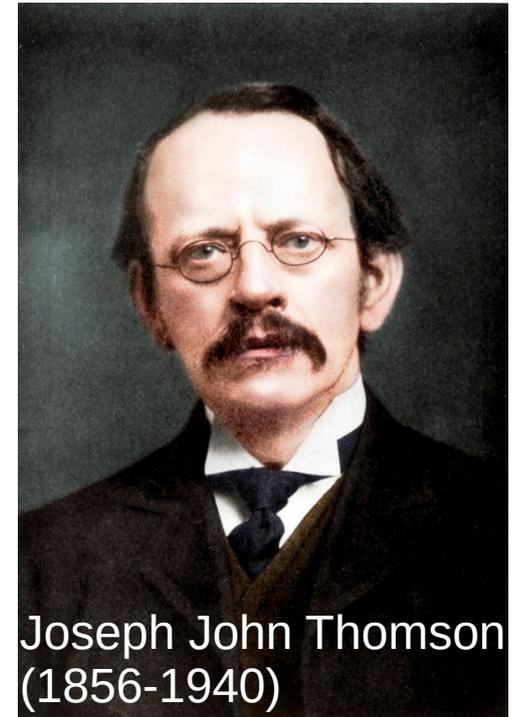


# Aplicações do Movimento de Partículas Carregadas em um Campo Magnético

## O Espectrômetro de Massa

Com uma variação desta técnica, **J. J. Thomson** conseguiu **determinar** a **razão carga:massa** das **partículas** compondo os "**raios catódicos**" em 1897, assim **descobrimo** o **elétron**, com razão  $q:m$  de  $-e/m_e$ .  
(=> Estrutura da Matéria)

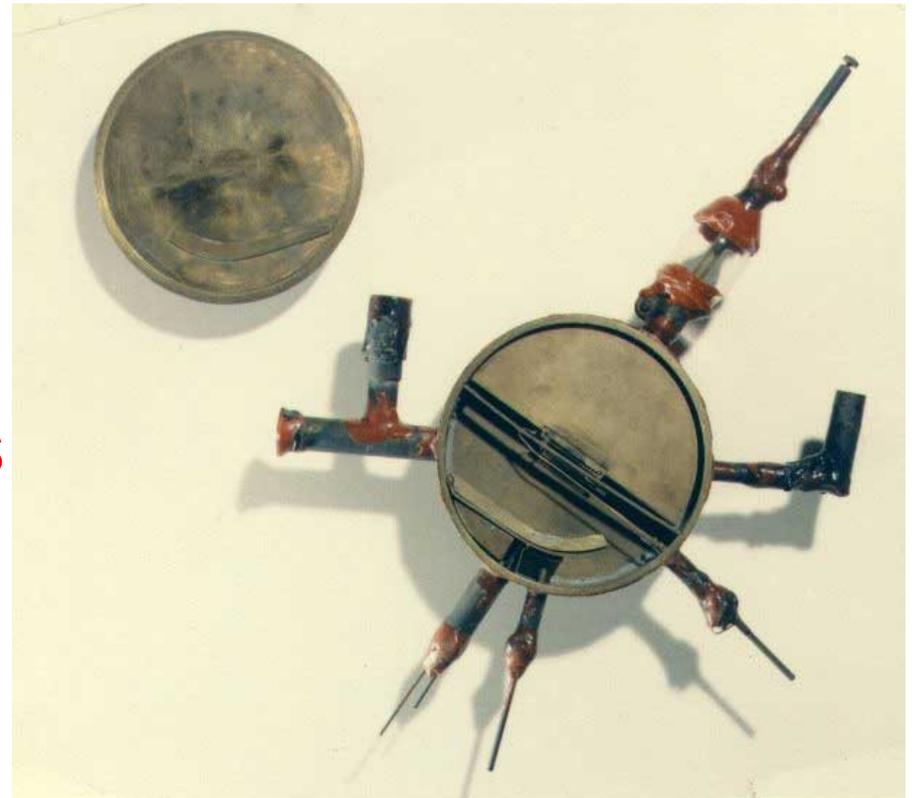
A **posição**, naquela o **feixe** **bate** na **tela fosforescente** depende da **razão carga:massa** das **partículas** compondo este.



# Aplicações do Movimento de Partículas Carregadas em um Campo Magnético

## O Cíclotron

**Aparelho** para **acelerar** partículas carregadas (normalmente **íons**) a **velocidades muito altas**. Estas partículas podem ser usadas para provocar **reações nucleares** ao **colidirem** com **núcleos atômicos**, produzindo **substâncias radioativas** que podem ser usadas em **hospitais** para **diagnóstico** e **tratamento**.



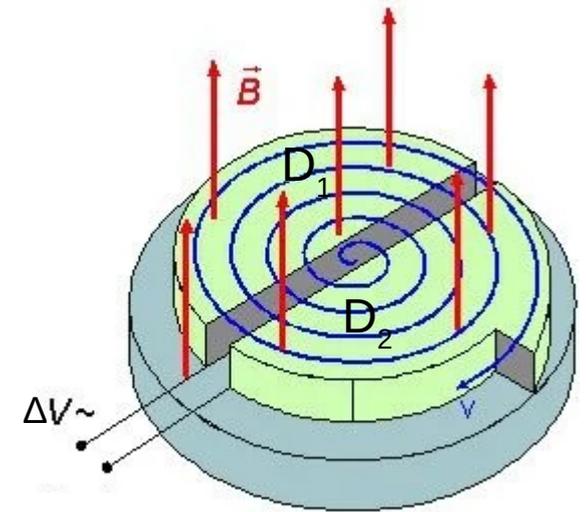
# Aplicações do Movimento de Partículas Carregadas em um Campo Magnético

## O Cíclotron

As partes  $D_1$  e  $D_2$  são chamados os "dês" por causa da forma de letra D.

Os íons são injetados perto do meio e farão caminhos em espiral de dentro para fora:

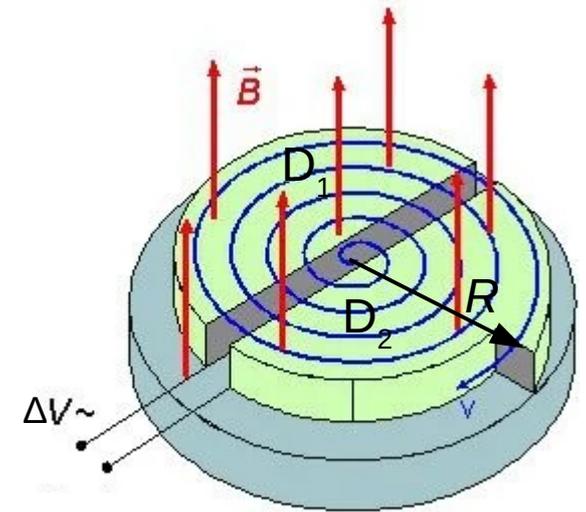
- nos dês fazem semi-círculos que duram  $T/2 = \pi m/qB$ , tempo que independe da velocidade e do raio do semi-círculo, e pode ser calculado para os íons que estão sendo usados, já que  $m$  e  $q$  são conhecidos. (Para velocidades próximas da da luz, esta independência não vale mais; Em cíclotrons, naqueles as partículas chegam a estas velocidades, isto tem que ser levado em conta.)



# Aplicações do Movimento de Partículas Carregadas em um Campo Magnético

## O Cíclotron

- Nas partes **entre os dês**, eles são **acelerados** por uma **diferença de potencial  $\Delta V$** , que é **invertido** com **periodicidade de  $T/2$** , tal que causa uma **aceleração positiva cada vez**.



- Quando chegam na **saída** que fica a uma **distância  $R$**  do **centro**, eles terão **velocidade  $v = qBR/m$**  e **energia cinética  $K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m}$** , o suficiente para **causar as reações nucleares** requeridas.



Universidade Federal do ABC

# Fenômenos Eletromagnéticos

## FIM PRA HOJE

