

# Eletricidade e Magnetismo em Sistemas Biológicos Parte 3



**Ignez Caracelli**  
*ignez@df.ufscar.br*



*São Carlos, 28 de outubro de 2019.*



096059-A-FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 1

*Ignez  
Caracelli*

1



096059-A-FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 1

*Ignez  
Caracelli*

2

## O Campo Magnético ... um pouco do passado

Na Grécia antiga, se conheciam as propriedades de um minério de ferro encontrado na região da Magnésia, a *magnetita*, ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

Um pedaço de *magnetita* é um ímã permanente, que atrai pequenos fragmentos de ferro.



## O Campo Magnético ... um pouco do passado

Ano: 1.100 a.C.

Os chineses já haviam descoberto que uma agulha de magnetita (em forma de colher) capaz de orientar-se livremente em um plano horizontal, alinha-se aproximadamente na direção norte-sul, e usavam este aparato, a bússola, na navegação.



## Bussola Chinesa

Mas, ao que tudo indica, os chineses também já conheciam e utilizavam o magnetismo há tempos, inclusive na navegação.



Nos primeiros séculos da Era Cristã, adivinhos chineses utilizavam “a colher que aponta para o sul”. Era uma colher construída de magnetita.



Han Dynasty (202 BC – 220 AD).

<http://www.ancientpages.com/2016/03/18/magnetic-compass-was-invented-in-ancient-china/>



096059-A-FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 1

Ignês  
Caracelli

## Eletricidade e Magnetismo

Cristais de magnetita são encontrados em certos tipos de bactérias (por exemplo, na *Aquaspirillum magnetotacticum*), em cérebros de abelhas, cupins, peixes, ursos, alguns pássaros (por exemplo, em pombos) e em seres humanos.

Acredita-se que estes cristais estão envolvidos no processo de magnetorecepção (capacidade de perceber a polaridade ou a inclinação do campo magnético da Terra) e na navegação animal por orientação magnética.

O estudo de biomagnetismo começou com as descobertas do paleontologista Heinz Lowenstam na década de 1960.

[Nature. 1983 Jan 6;301\(5895\):79-80.](https://doi.org/10.1038/22579a)

6



096059-A-FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 1

Ignês  
Caracelli

## Magnetismo

Tales de Mileto observou que certas pedras encontradas na cidade denominada magnésia apresentavam a propriedade de atrair pedaços de ferro e elas foram denominadas de magnetita.



O magnetismo na Antiguidade era conhecido por meio do mineral **magnetita**. Suas propriedades e seu uso eram envolvidos por muito **misticismo**.

### O Campo Magnético ... um pouco do passado

Ano: 1269

Pierre de Maricourt → pólos do imã:

- Todo imã tem dois pólos, o pólo norte e o pólo sul.
- Os pólos iguais se repelem; os pólos opostos se atraem



(a)



(b)



(c)

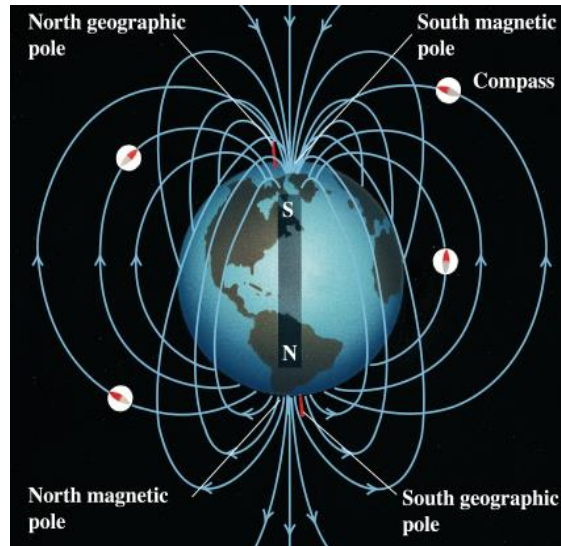


(d)

## O Campo Magnético ... um pouco do passado

Ano: 1600

William Gilbert sugeriu que a própria Terra fosse um ímã permanente.

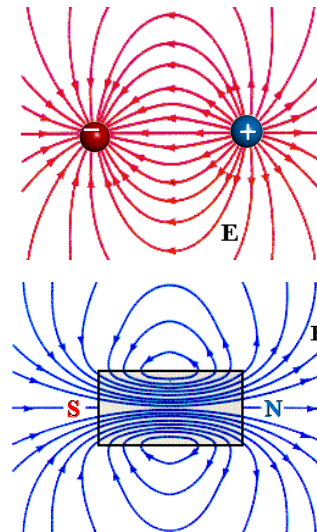


## O Campo Magnético ... um pouco do passado

Ano: 1750

John Michell: os pólos magnéticos exercem forças atrativas ou repulsivas, uns sobre os outros, e tais forças variam com o inverso do quadrado da respectiva separação.

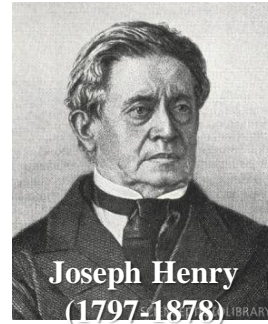
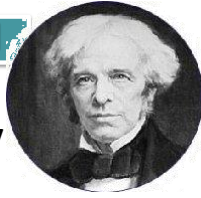
**Fato experimental:** os pólos magnéticos não existem como “monopolos magnéticos”



## O Campo Magnético ... um pouco do passado

Ano: 1831

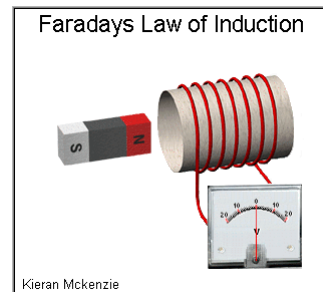
Michael Faraday



- **Michael Faraday e Joseph Henry:** uma corrente elétrica pode ser induzida num circuito, seja pelo movimento de um ímã perto do circuito, seja pela alteração duma corrente num outro circuito, vizinho ao primeiro. Um campo magnético variável cria um campo elétrico.

## O Campo Magnético ... um pouco do passado

Ano: 1831



- **Michael Faraday e Joseph Henry:** uma corrente elétrica pode ser induzida num circuito, seja pelo movimento de um ímã perto do circuito, seja pela alteração de uma corrente num outro circuito, vizinho ao primeiro. Um campo magnético variável cria um campo elétrico.

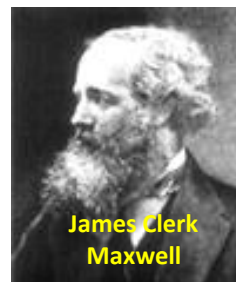
## O Campo Magnético ... um pouco do passado

Ano: 1873

*And God said*

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$
$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$
$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$
$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

*and there was light.*

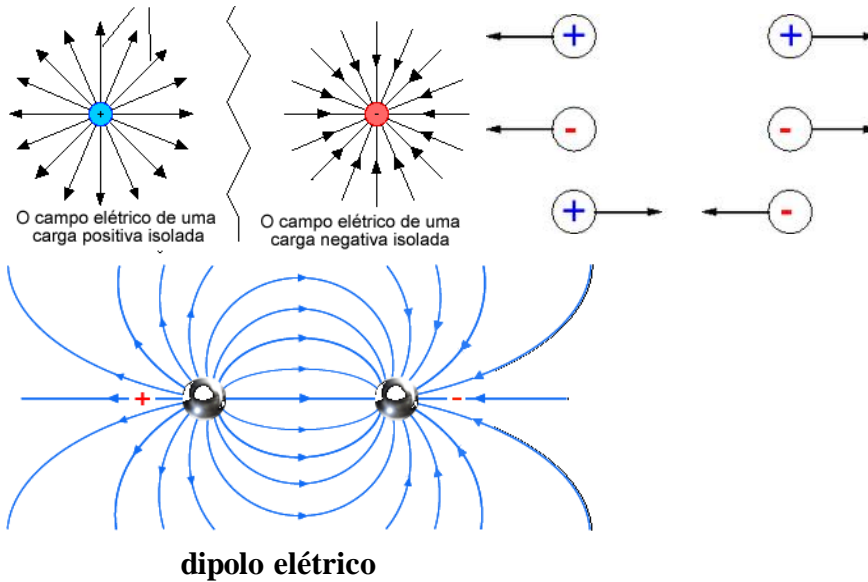


## O Campo Magnético ... um pouco do passado

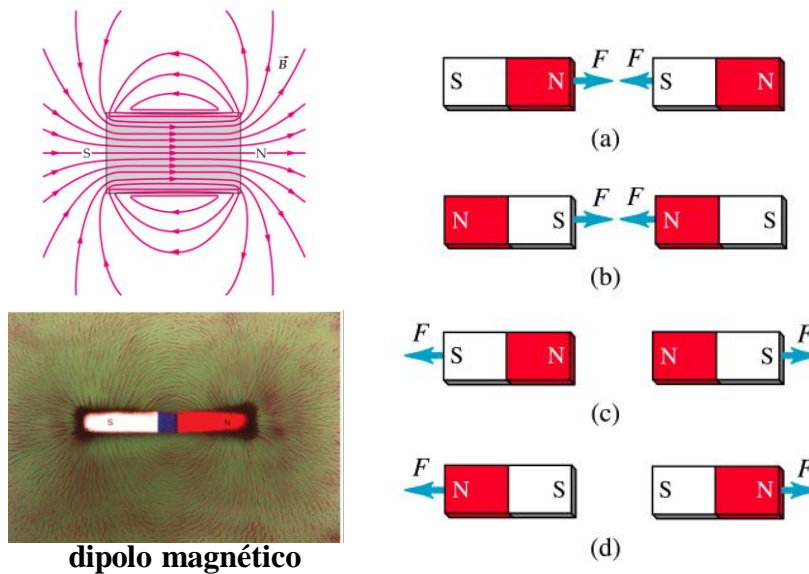
Ano: 1888

- Heinrich Hertz: ondas eletromagnéticas no laboratório. Verificação das previsões de Maxwell.
- Aplicações tecnológicas do magnetismo: medidores elétricos, transformadores, motores, aceleradores de partículas, alto-falantes. Registro de som, registro de imagens de TV, memórias de computadores...

## Unidade Fundamental Eletricidade: Carga Elétrica



## Unidade Fundamental Magnetismo: Dipolos Magnéticos







## Campos Magnéticos



(a)



(c)

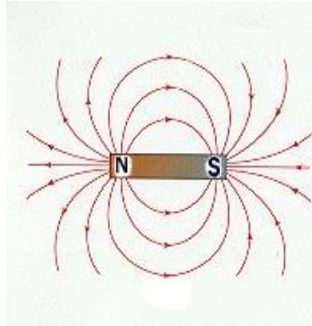


(b)

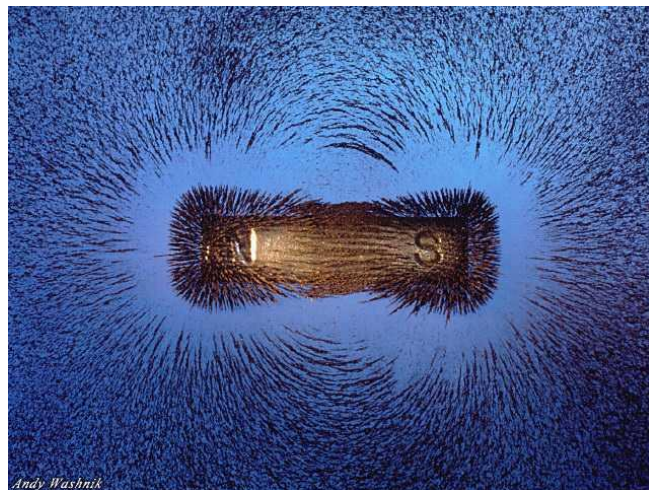


(d)

## Campos Magnéticos

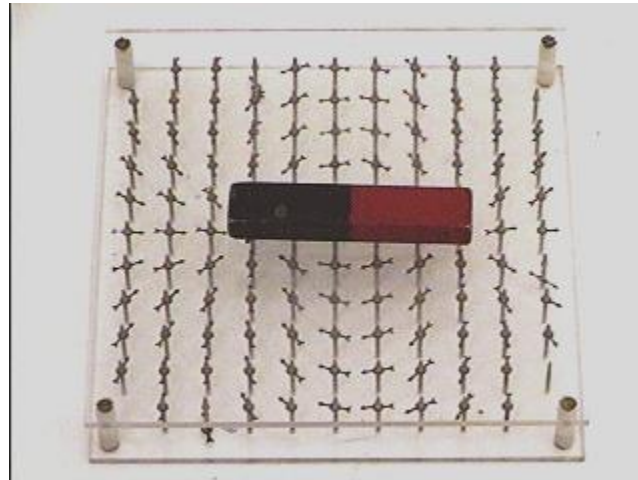


## Linhas de campo magnético

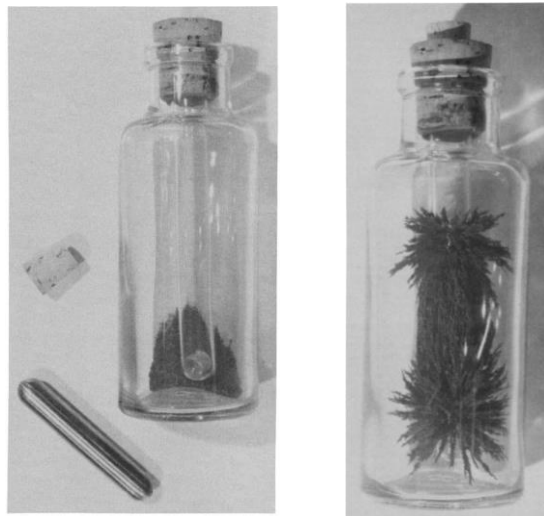


Andy Washnik

## Linhas de campo magnético



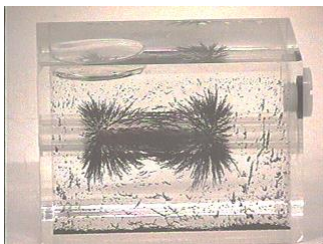
## Linhas de campo magnético



## Linhas de campo magnético



[www.xump.com/Images/P](http://www.xump.com/Images/P)



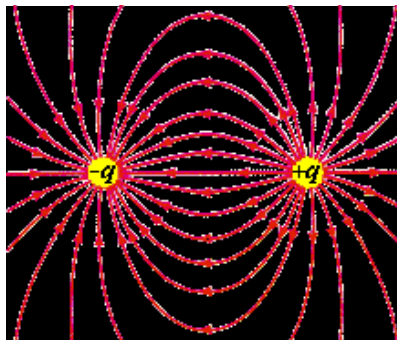
## Linhas de campo magnético



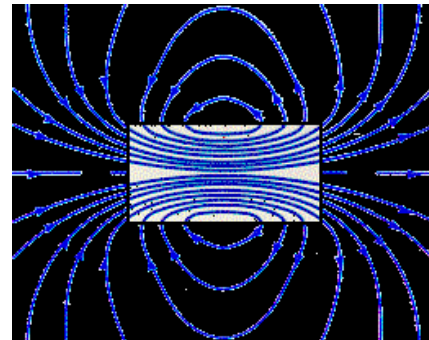
# Linhas de campo magnético



# Linhas de campo elétrico e de campo magnético



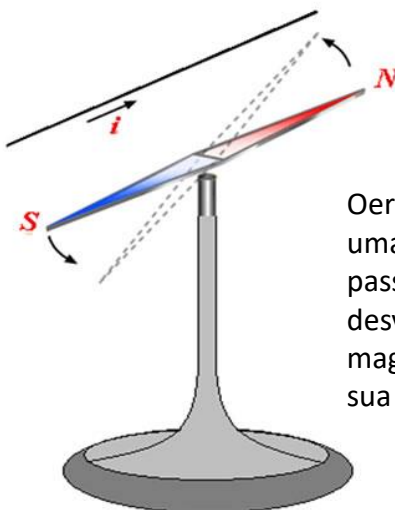
campo elétrico E



campo magnético B

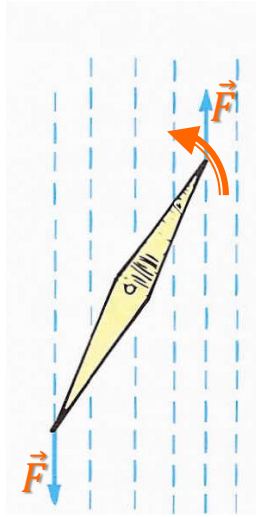


## Agulha Magnética



Oersted observou que uma corrente elétrica, ao passar por um condutor, desviava uma agulha magnética colocada na sua vizinhança.

## Agulha Magnética

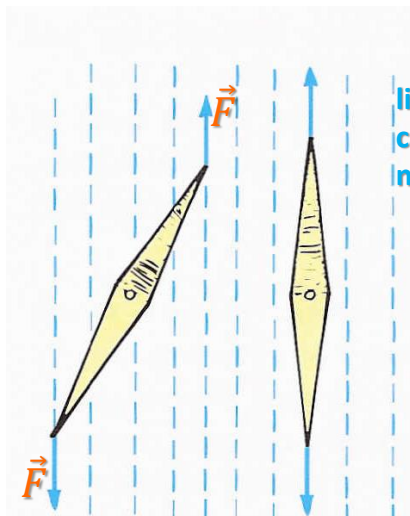


torque

linhas do  
campo  
magnético

Quando a agulha magnética não está alinhada com o campo magnético (esquerda), forças opostas  $\vec{F}$  que atuam na agulha produzem um torque, que rodará a agulha até que ela se alinhe com o campo (direita).

## Agulha Magnética



torque

sem torque

linhas do  
campo  
magnético

Quando a agulha magnética não está alinhada com o campo magnético (esquerda), forças opostas  $\vec{F}$  que atuam na agulha produzem um torque, que rodará a agulha até que ela se alinhe com o campo (direita).

## Magnetismo & Magnetização

Os processos de imantação também são diferentes dos processos de eletrização. A primeira diferença reside no material.

Só é possível imantar alguns poucos materiais, chamados de **ferromagnéticos**: o ferro, o níquel e o cobalto.

Esses elementos também entram em algumas ligas metálicas que são magnéticas, como o aço, por exemplo.



ímã  
temporário

## Magnetismo & Magnetização

Qualquer corpo de material ferromagnético – um prego, por exemplo - colocado junto a um ímã também se torna um ímã temporário.

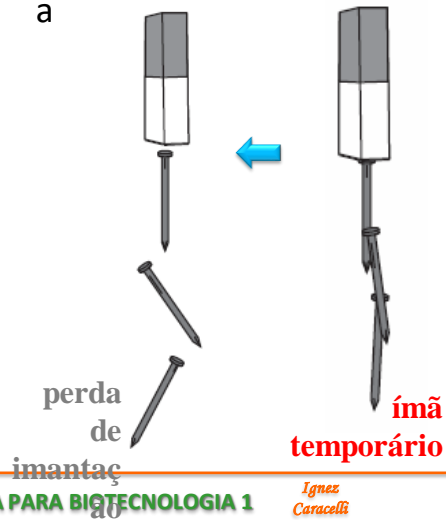


ímã  
temporário



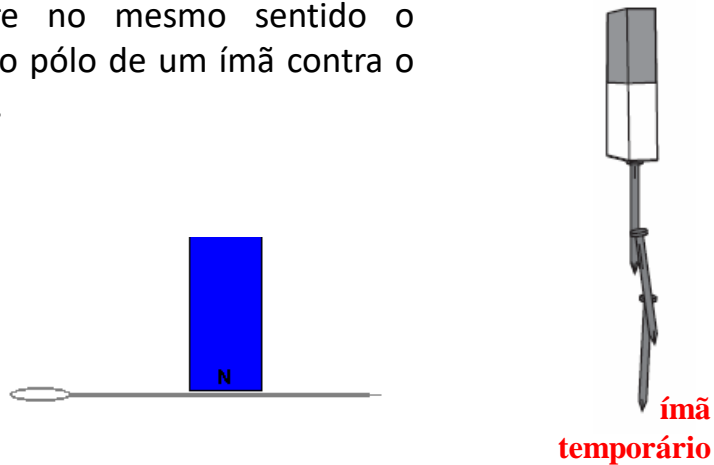
## Magnetismo & Magnetização

Se o prego for afastado do ímã, ele perde a imantação.



## Magnetismo & Magnetização

Podemos tornar o prego um ímã permanente ao esfregarmos sempre no mesmo sentido o mesmo pólo de um ímã contra o prego.



## Magnetismo & Magnetização

Outra ação que pode tornar um prego em um **ímã permanente** é aquecê-lo ou provocar um choque mecânico mantendo-o próximo do ímã.

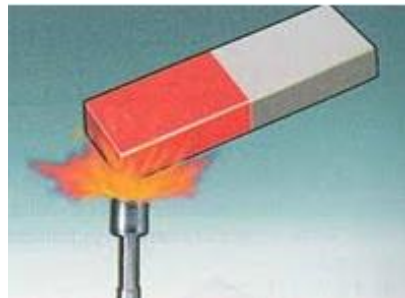
É interessante notar que essas mesmas ações também podem **desfazer o magnetismo** de um corpo.



## Magnetismo & Magnetização

Um ímã de ferro perde a imantação quando aquecido a 1043 K.

Essa temperatura recebe o nome de **temperatura de Curie**, em homenagem a Pierre Curie, físico francês que descobriu essa propriedade, em 1895.



## Temperatura de Curie

- Os materiais magnéticos mais evidentes são os ferromagnéticos, constituídos pelo ferro (Fe), cobalto (Co) e níquel (Ni).
- Em temperatura ambiente, eles exibem uma **imantação natural**, ou magnetização espontânea, e por isso são utilizados **como ímãs permanentes**.
- Se aquecidos, entretanto, esses materiais perdem a imantação natural em uma determinada temperatura, denominada **temperatura crítica  $T_c$** , ou **temperatura de Curie**, tornando-se paramagnéticos.
- O ferro perde a imantação natural a  $770^{\circ}\text{C}$ , o cobalto, a  $1122^{\circ}\text{C}$  e o níquel, a  $358^{\circ}\text{C}$ .

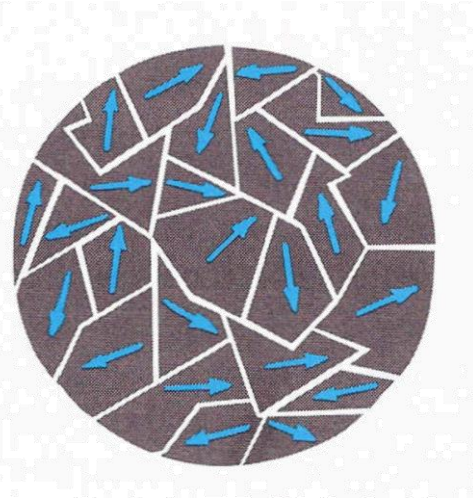
## Domínios magnéticos

O campo magnético gerado por um átomo é tão intenso que a interação entre átomos vizinhos pode dar origem a grandes aglomerados desses átomos, alinhados uns com os outros.

Esses aglomerados de átomos são chamados de **domínios magnéticos**.

Cada domínio é formado por bilhões de átomos alinhados.

## Domínios magnéticos

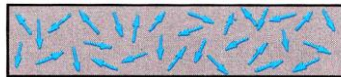


Uma visão microscópica dos domínios magnéticos em um cristal de ferro.

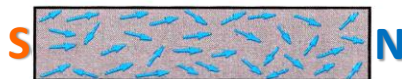
Cada domínio consiste de bilhões de átomos de ferro alinhados.

As setas azuis, que apontam nas mais diversas direções, revelam que os domínios não estão alinhados entre si.

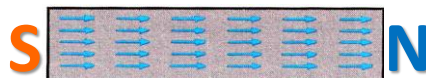
## Magnetismo & Magnetização



← ferro desmagnetizado



← ferro fracamente magnetizado



← ferro fortemente magnetizado

## Magnetismo & Magnetização



quando um ímã é partido em 2, cada pedaço é um ímã igualmente magnetizado.



## Experimento de Oersted

Em 1820, Oersted estava fazendo uma demonstração para alguns estudantes de ciência.

Ele pretendia mostrar-lhes que eletricidade e magnetismo não estão relacionados.



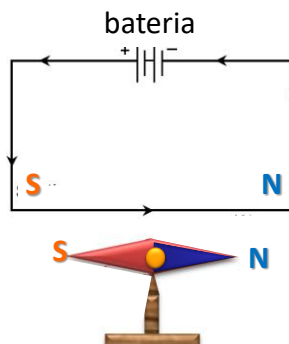
Hans Oersted

Oersted colocou um fio com corrente elétrica ao lado de uma bússola, que tem uma agulha magnética.

Como ele esperava, a agulha da bússola não se mexeu.

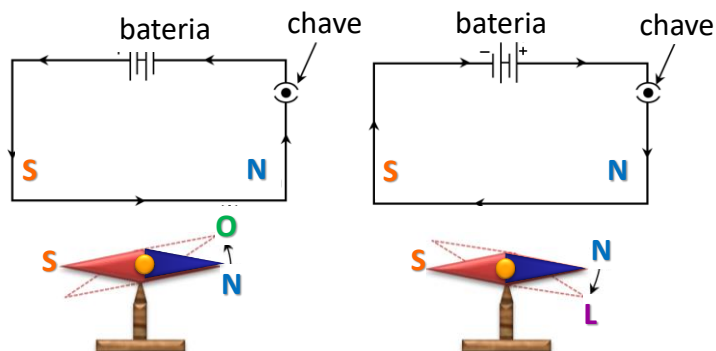
Ela só ficava apontando na direção do polo magnético norte da terra.

## Experimento de Oersted



## Experimento de Oersted

Após a demonstração, um estudante curioso colocou o fio perto da bússola novamente, mas em uma direção diferente. Para surpresa do Oersted, a agulha da bússola balançou em direção do fio. Oersted ficou intrigado.



## Experimento de Oersted

Ele desligou a corrente no fio para ver o que aconteceria com a agulha da bússola. A agulha balançou volta para sua posição original, apontando norte mais uma vez.



Hans Oersted

## Experimento de Oersted

Oersted descobriu que uma **corrente elétrica cria um campo magnético**.

O campo magnético criado pela corrente era forte o suficiente para atrair a agulha da bússola nas proximidades.

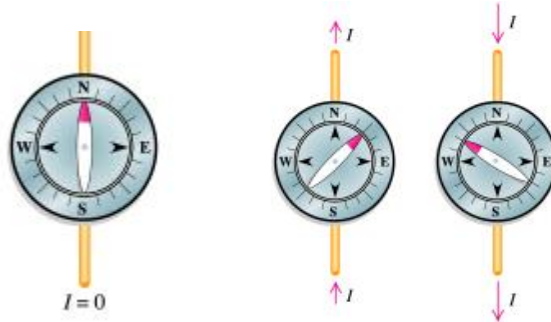


Hans Oersted

## Experimento de Oersted

Ano: 1819

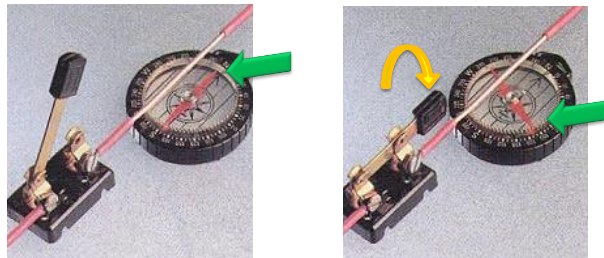
**Hans Oersted:** uma corrente elétrica em um condutor desviava uma agulha imantada: relação entre o magnetismo e a eletricidade.



## O Campo Magnético ... um pouco do passado

Ano: 1819

**Hans Oersted:** uma corrente elétrica em um condutor desviava uma agulha imantada: **relação entre o magnetismo e a eletricidade.**

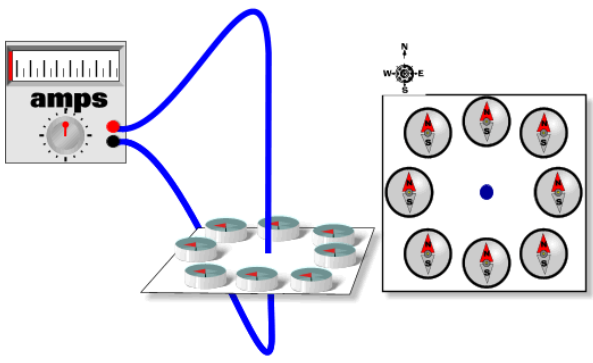




Ano: 1819

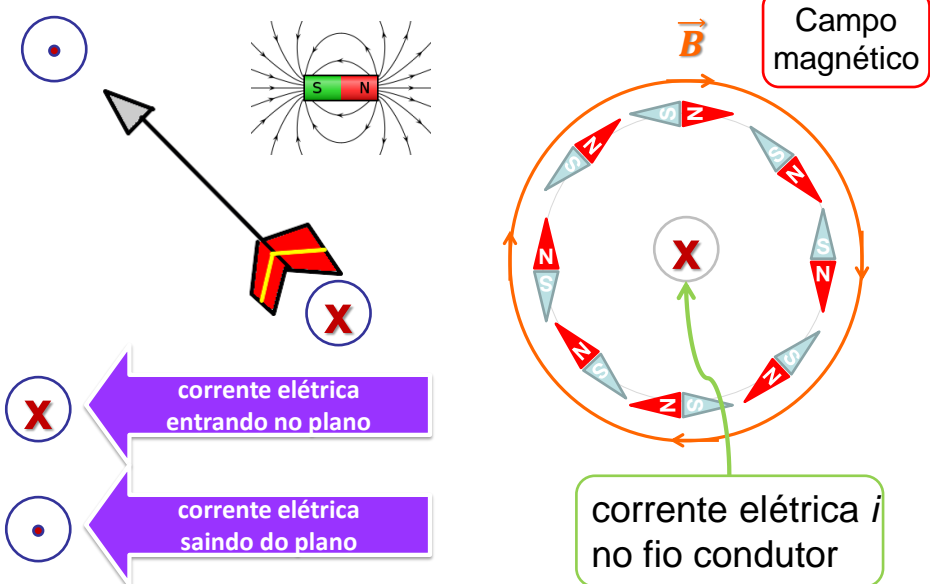
# Experimento de Oersted

**Hans Oersted:** queria saber mais sobre o campo magnético criado por uma corrente. Ele colocou bússolas em diferentes locais ao redor de um fio pelo qual fluía uma corrente.

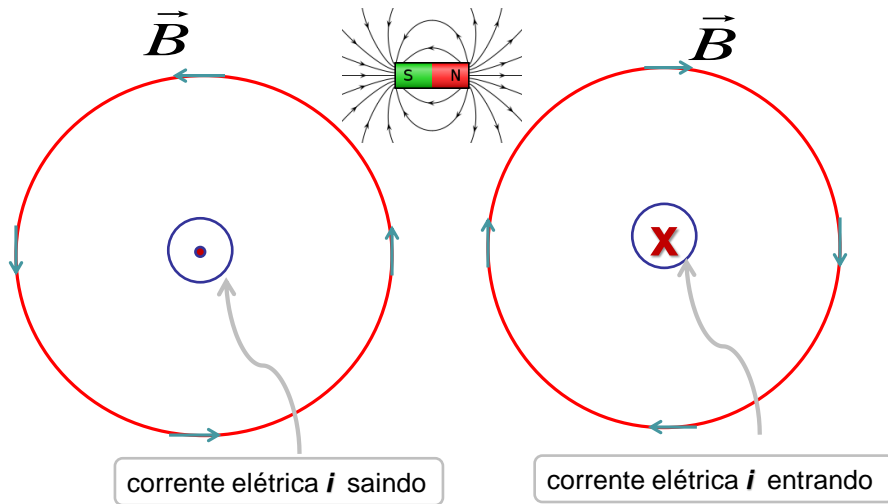


<http://blogdefisica-2016.blogspot.com/2016/11/campo-magnetico-de-uma-corrente-eletrica.html>

## Agulha Magnética e Corrente Elétrica

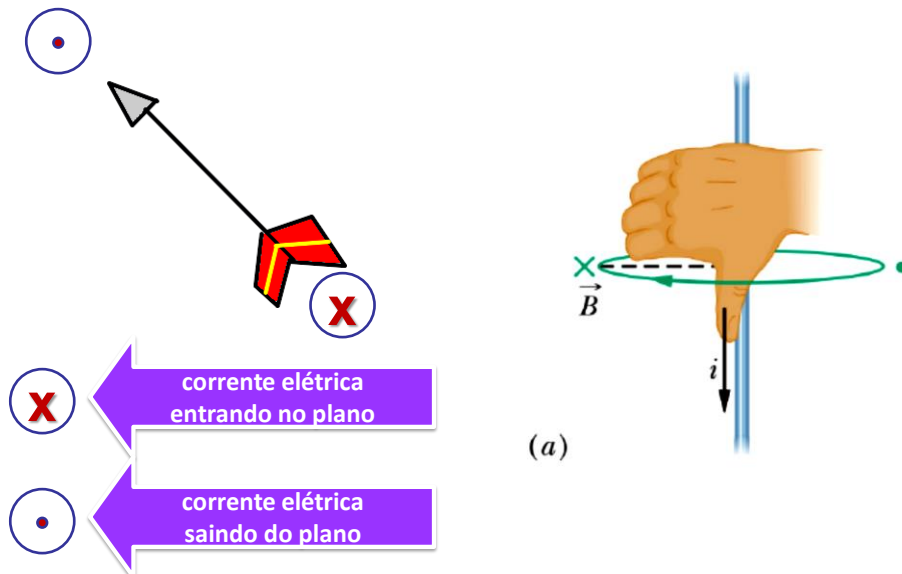


## Agulha Magnética e Corrente Elétrica

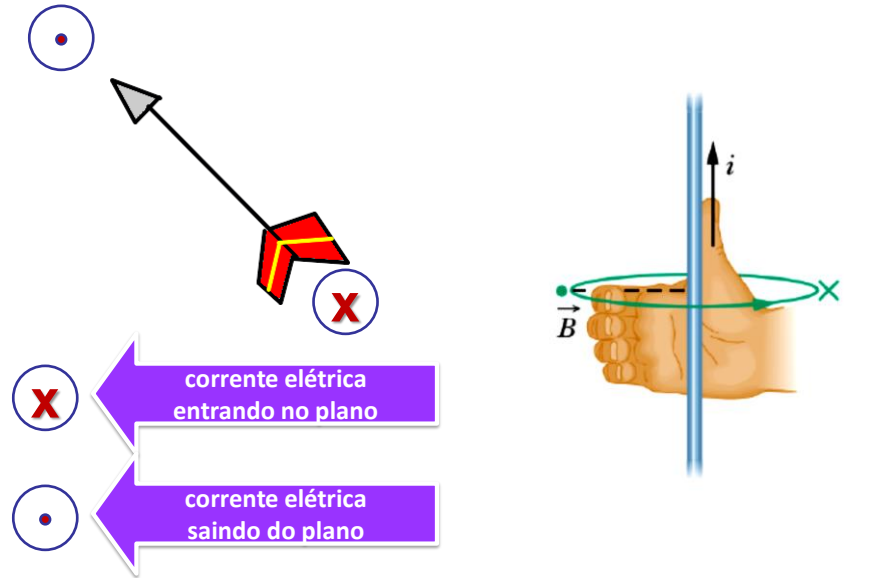


Oersted → *conectando eletricidade e magnetismo*

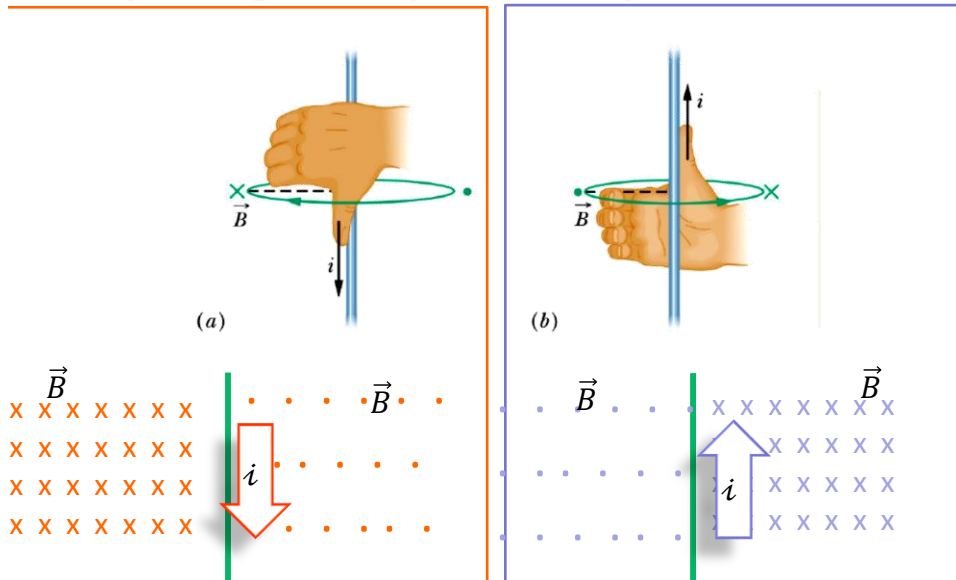
## Campo magnético produzido por fio condutor



## Campo magnético produzido por fio condutor



## Campo magnético produzido por fio condutor



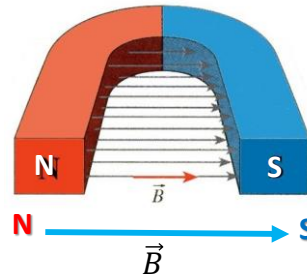
## Força Magnética sobre partículas carregadas

Uma partícula carregada (uma carga) em repouso não interage com campo magnético  $\vec{B}$  estático.

$$\vec{v} = 0$$

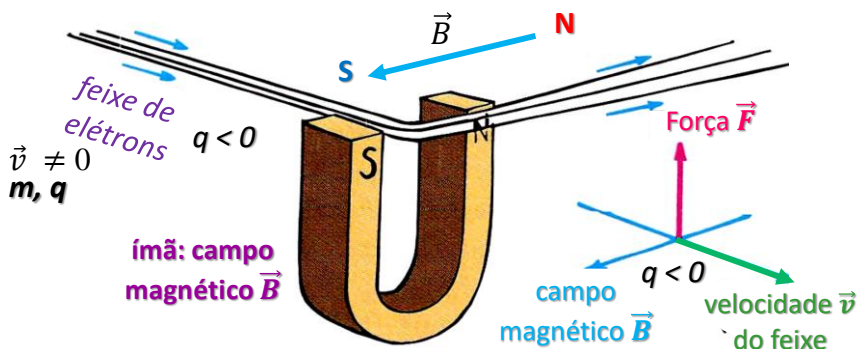


partícula carregada  
(uma carga)  
em repouso



## Força Magnética sobre partículas carregadas

Se a partícula se move ( $\vec{v} \neq 0$ ) em um campo magnético  $\vec{B}$  o caráter magnético de uma carga em movimento se manifesta.



## Força Eletromagnética

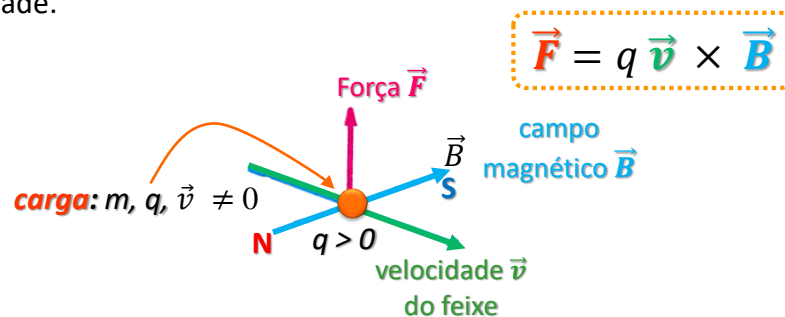
A força **eletromagnética** sobre uma carga depende não somente de onde esta se encontra, mas também da velocidade com que se desloca. Todo ponto do espaço está caracterizado por duas quantidades vetoriais que determinam a força sobre cada carga.

A primeira é a **força elétrica**: é independente do movimento da carga. Esta força é descrita por meio do campo elétrico  $E$ .

A segunda é uma componente adicional da força, que se denomina **força magnética** e que depende da velocidade da carga.

## Força Magnética sobre carga elétrica

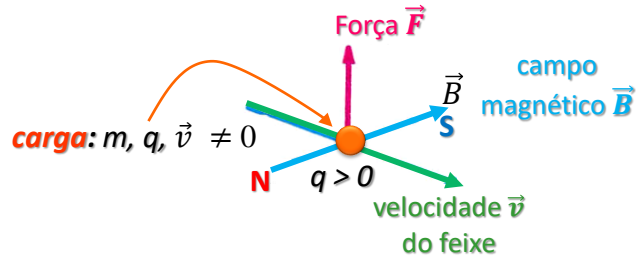
É possível descrever todo este comportamento definindo o vetor campo magnético  $\vec{B}$ , que especifica simultaneamente a direção privilegiada no espaço e a constante de proporcionalidade com a velocidade.



## Força Magnética sobre carga elétrica

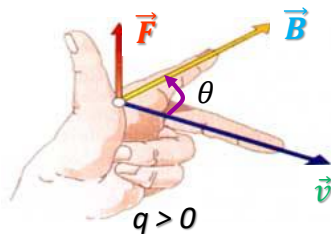
$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad \longrightarrow \quad \vec{F} = qvB \text{ sen } \theta$$

produto vetorial
se  $\vec{v}$  for perpendicular a  $\vec{B}$ ,  $\text{sen } \theta = 1$

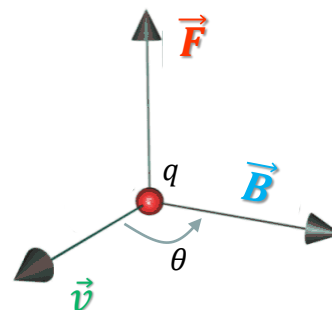


## Força Magnética sobre carga elétrica

A **regra da mão esquerda** ou **regra de Fleming** é utilizada para força magnética  $\vec{F}$  que atua sobre uma carga elétrica  $q$  lançada ( $\vec{v} \neq 0$ ) em um campo magnético  $\vec{B}$ .



$$\vec{F} = qvB \text{ sen } \theta$$



## Força Magnética sobre carga elétrica

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad \longrightarrow \quad \vec{F} = qvB \text{ sen } \theta$$

produto  
vetorial

se  $\vec{v}$  for perpendicular a  $\vec{B}$ ,  
 $\text{sen } \theta = \text{sen } 90^\circ = 1$   $\longrightarrow \vec{F} = qvB$

se  $\vec{v}$  for paralelo a  $\vec{B}$ ,  
 $\text{sen } \theta = \text{sen } 0^\circ = 0$   $\longrightarrow \vec{F} = 0$

## Unidade de Campo Magnético

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad \longrightarrow \quad \vec{F} = qvB \text{ sen } \theta$$

produto  
vetorial

para  $v = 1 \text{ m/s}$   
 $q = 1 \text{ C}$   
 $F = 1 \text{ N}$   $\longrightarrow [1 \text{ N}] = [1 \text{ C}][1 \text{ m/s}] [B]$

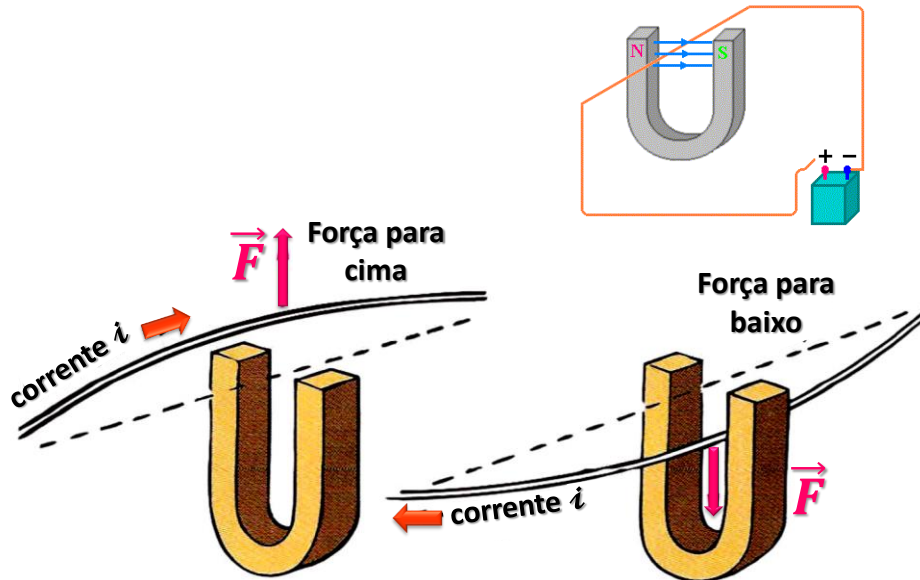
$$[B] = \frac{[1 \text{ N}]}{[1 \text{ C}][1 \text{ m/s}]}$$

$$[B] = \frac{[1 \text{ N/C}]}{[1 \text{ m/s}]}$$

No SI, a unidade de campo magnético é o Tesla (T)

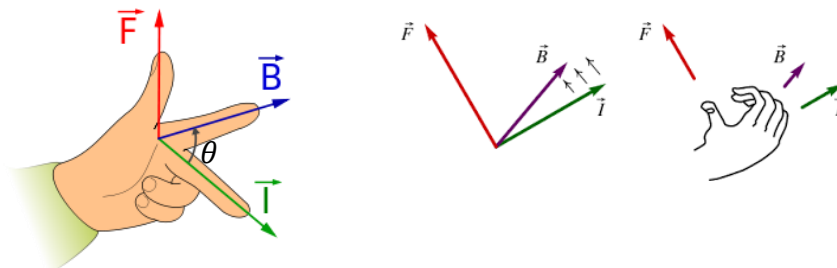
$$[B] = [1 \text{ T}]$$

## Força Magnética sobre um fio percorrido por corrente



## Força Magnética sobre um fio percorrido por corrente

A *regra da mão esquerda* ou *regra de Fleming* é utilizada para força magnética  $\vec{F}$  que atua sobre um fio percorrido por uma corrente elétrica  $i$  quando ele é mergulhado em um campo magnético  $\vec{B}$ .





## Força Magnética sobre carga elétrica

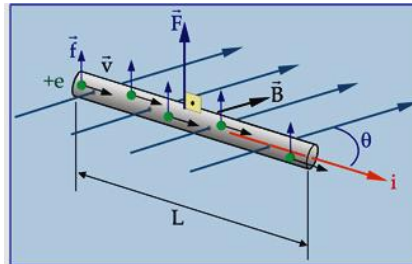
$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad \longrightarrow \quad \vec{F} = qvB \text{ sen } \theta$$

produto  
vetorial

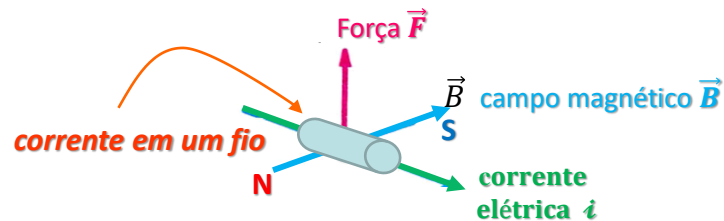
## Força Magnética sobre um fio percorrido por corrente

$$\vec{F} = i \vec{L} \times \vec{B} \quad \longrightarrow \quad \vec{F} = iLB \text{ sen } \theta$$

produto  
vetorial

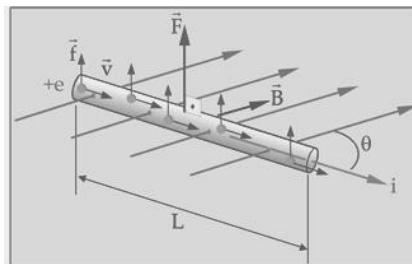


## Força Magnética sobre um fio percorrido por corrente

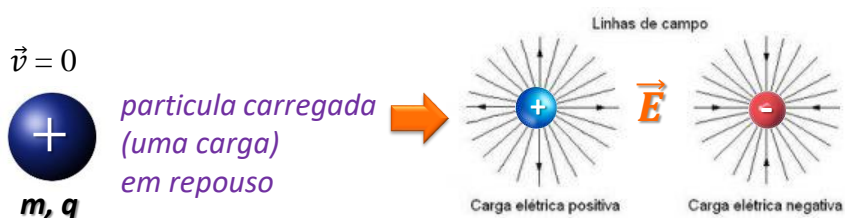


$$\vec{F} = i \vec{L} \times \vec{B} \quad \longrightarrow \quad \vec{F} = iLB \text{ sen } \theta$$

produto  
vetorial



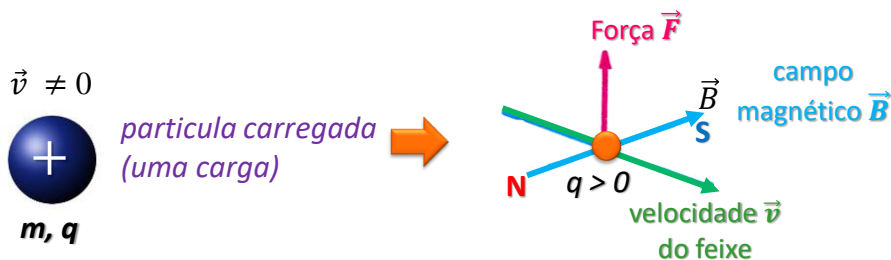
## O Campo Elétrico $E$ e Campo Magnético $B$



A presença de uma carga elétrica gera um campo elétrico  $\vec{E}$

$$\vec{F}_{elétrica} = q\vec{E}$$

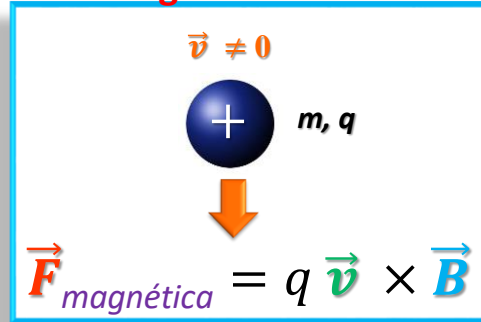
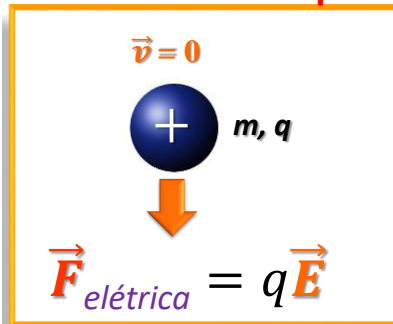
## O Campo Elétrico $E$ e Campo Magnético $B$



A presença de uma carga elétrica em movimento gera um campo magnético  $\vec{B}$

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

## O Campo Elétrico e Magnético B



Força total sobre uma partícula em movimento

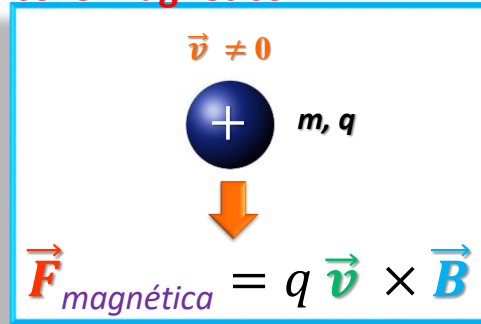
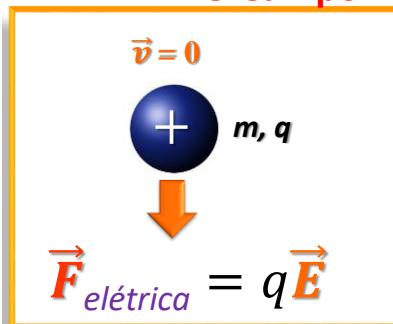


$$\vec{F}_{total} = \vec{F}_{elétrica} + \vec{F}_{magnética}$$

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

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

## O Campo Elétrico e Magnético B



Força elétrica  
→ realiza W

Força magnética  
→ **não** realiza W

Força de Lorentz

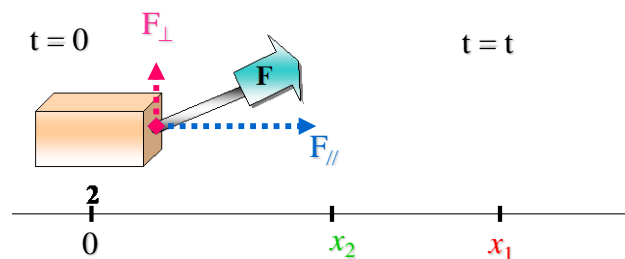
$$\vec{F}_{total} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

abre parênteses:

**Por que o campo magnético  $\vec{B}$   
não realiza trabalho  $W$ ?**

## Trabalho

a mesma  $\vec{F}$  → deslocamento  $x_2$



## Trabalho

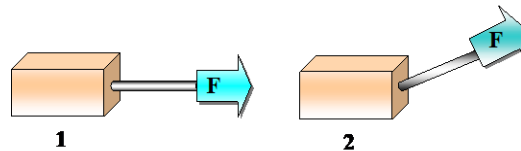
$$x_2 < x_1,$$

somente uma parte da força  $\vec{F}$  será aproveitada

$$\vec{F} = \text{componente } // + \text{componente } \perp = F_{//} + F_{\perp}$$

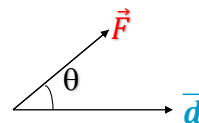
somente  $F_{//}$  será útil para provocar o  $x_2$ .

➔ somente  $F_{//}$  será útil para realizar W



## Trabalho

$$W = \vec{F} \cdot \vec{d} \quad (\text{produto escalar})$$



produto escalar = **vetor** × **vetor** × cos  $\theta$

$\theta$  (ângulo entre os vetores)

**trabalho** → grandeza escalar

**força** e **deslocamento** → grandezas vetoriais

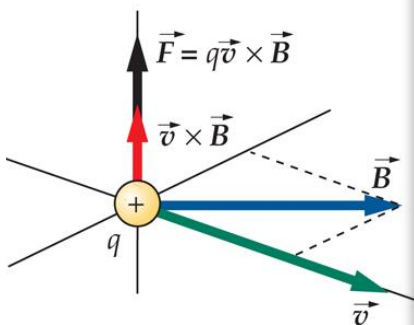
$$W = F \times d \times \cos \theta$$

fecha parênteses.

## Movimento de uma Carga Puntiforme em um Campo $\vec{B}$

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

$$\vec{F}_B \perp \vec{v}$$



$$\vec{F}_B \perp \vec{v}$$

$\vec{B} \rightarrow$  muda a direção de  $\vec{v}$  mas não o módulo

$\vec{F}_B \rightarrow$  não efetua trabalho sobre a partícula ( $\vec{v} \times \vec{B} \parallel \vec{F}_B$ )

$\vec{F}_B \rightarrow$  não altera energia cinética K

## Movimento de uma Carga Puntiforme em um Campo $\vec{B}$

**Caso especial:**  $\vec{v} \perp \vec{B} \Rightarrow \theta = 90^\circ$

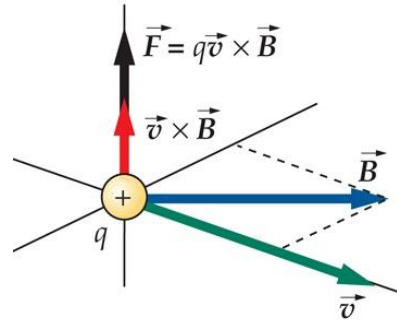
$$\vec{F}_{\text{magnética}} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = qvB \text{ sen } \theta$$

$$\vec{F} = qvB \text{ sen } 90^\circ$$

$$\vec{F}_B \perp \vec{v}$$

trajetória da partícula é uma orbita circular



## Movimento de uma Carga Puntiforme em um Campo $\vec{B}$

**Caso especial:**  $\vec{v} \perp \vec{B} \Rightarrow \theta = 90^\circ$

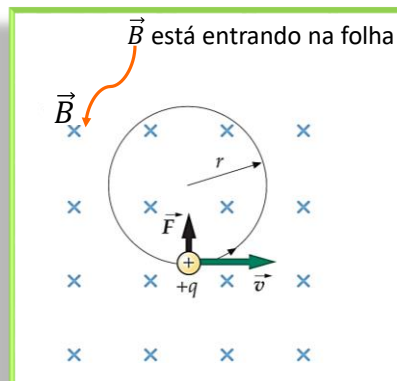
$$\vec{F}_{\text{magnética}} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = qvB \text{ sen } \theta$$

$$\vec{F} = qvB \text{ sen } 90^\circ$$

$$\vec{F}_B \perp \vec{v}$$

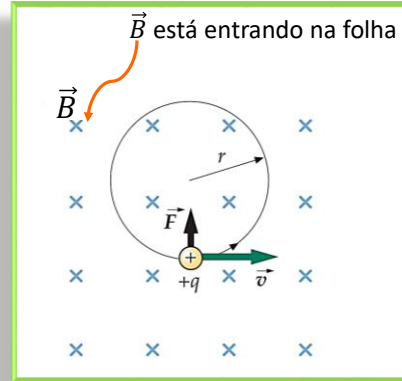
trajetória da partícula é uma orbita circular



## Movimento de uma Carga Puntiforme em um Campo $\vec{B}$

**Caso especial:**  $\vec{v} \perp \vec{B} \Rightarrow \theta = 90^\circ$

$$\begin{aligned} \vec{F} &= m a \\ \vec{F} &= m \frac{v^2}{r} \\ q v B \sin \theta &= m \frac{v^2}{r} \\ q v B \sin 90^\circ &= m \frac{v^2}{r} \end{aligned}$$



trajetória da partícula é uma órbita circular

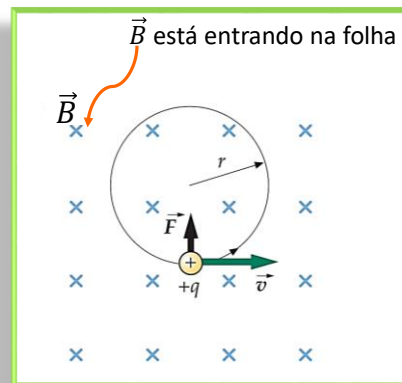
## Movimento de uma Carga Puntiforme em um Campo $\vec{B}$

raio da órbita circular

$$r = \frac{m v}{q B}$$

$$\begin{aligned} q B &= m \frac{v}{r} \\ q v B &= m \frac{v^2}{r} \\ q v B \sin 90^\circ &= m \frac{v^2}{r} \end{aligned}$$

$\vec{v} \perp \vec{B} \Rightarrow \theta = 90^\circ$



trajetória da partícula é uma órbita circular



## Movimento de uma Carga Puntiforme em um Campo $\vec{B}$

raio da  
órbita circular

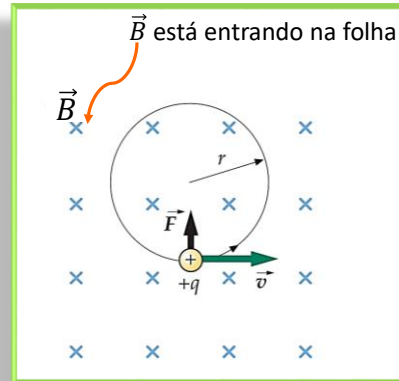
$$r = \frac{m v}{q B}$$

qual o tempo  
necessário  
para percorrer a  
circunferência de raio  $r$ ?



$T$ , período

$$\vec{v} \perp \vec{B} \rightarrow \theta = 90^\circ$$



trajetória da partícula é  
uma órbita circular

## Movimento de uma Carga Puntiforme em um Campo $\vec{B}$

raio da  
órbita circular

$$r = \frac{m v}{q B}$$

$T$ , período

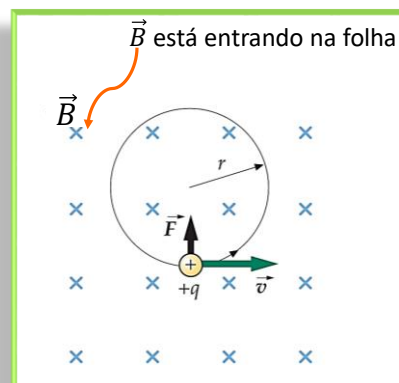
$$T = \frac{2\pi r}{v}$$

comprimento da  
circunferência

velocidade

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

$$\vec{v} \perp \vec{B} \rightarrow \theta = 90^\circ$$



trajetória da partícula é  
uma órbita circular

## Movimento de uma Carga Puntiforme em um Campo $\vec{B}$

raio da  
órbita circular

$$r = \frac{m v}{q B}$$

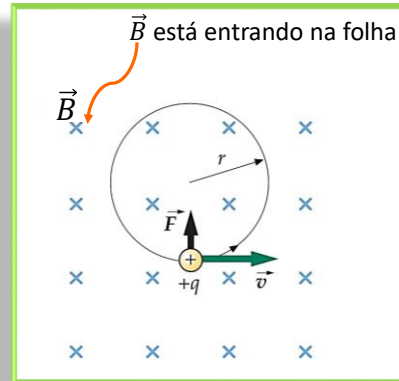
$$\vec{v} \perp \vec{B} \Rightarrow \theta = 90^\circ$$

$T$ , período

não depende  
de  $r$  nem de  $v$

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

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



trajetória da partícula é  
uma órbita circular

## Movimento de uma Carga Puntiforme em um Campo $\vec{B}$

raio da  
órbita circular

$$r = \frac{m v}{q B}$$

$$\vec{v} \perp \vec{B} \Rightarrow \theta = 90^\circ$$

período

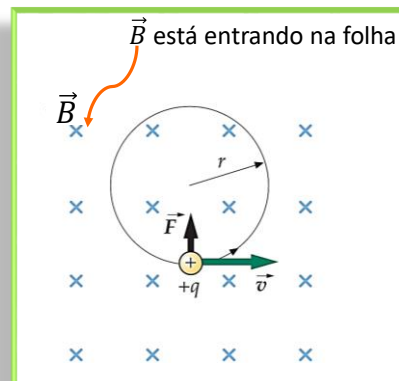
$$T = \frac{2\pi m}{q B}$$

frequência

$$f = \frac{1}{T}$$

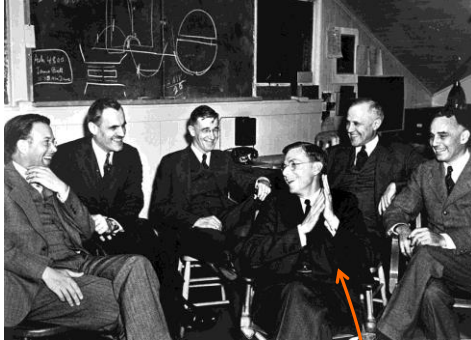
frequência  
do ciclotron

$$f = \frac{q B}{2\pi m}$$



trajetória da partícula é  
uma órbita circular

## Cíclotron (de Lawrence)



Ernest Lawrence em 1939

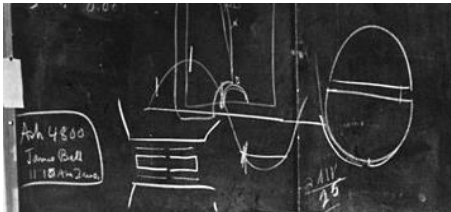
*Ernest Lawrence*

Nobel Prize in Physics (1939)



Ernest Orlando Lawrence  
(1901-1958)

***Cíclotron é um acelerador de partículas***



## Cíclotron (de Lawrence)

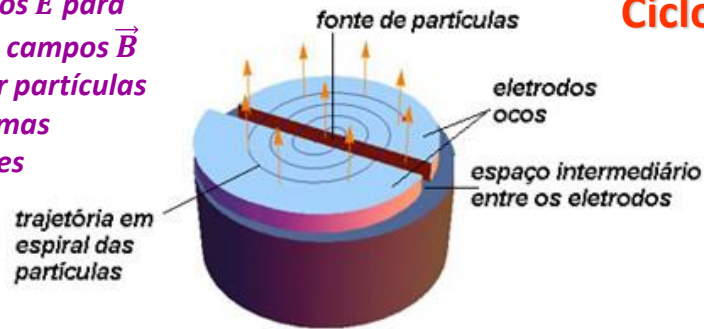


E.O. Lawrence

*Cíclotron é um “canhão circular”, formado por duas partes na forma de D, que são eletrodos ocos, separados por um espaço intermediário. Dessa forma, juntos parecem uma circunferência.*

Usa campos  $\vec{E}$  para acelerar e campos  $\vec{B}$  para guiar partículas em altíssimas velocidades

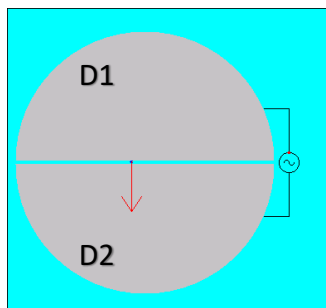
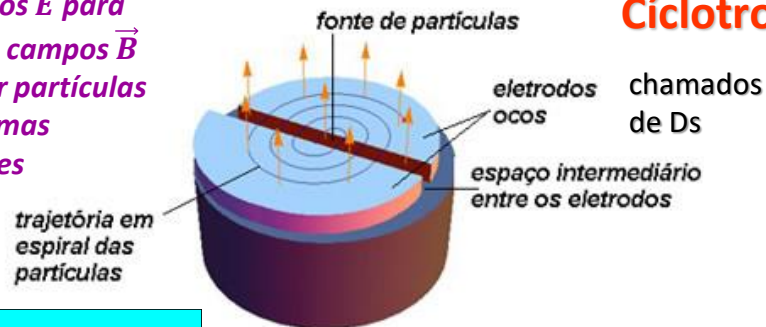
## Cíclotron



Uma partícula é lançada no espaço entre os eletrodos e é alternadamente atraída por um e repelida pelo outro, pois eles são alimentados por uma corrente alternada de alta frequência que faz com que eles fiquem ora carregados positivamente ora negativamente.

Usa campos  $\vec{E}$  para acelerar e campos  $\vec{B}$  para guiar partículas em altíssimas velocidades

## Cíclotron



Com isso, a trajetória circular da partícula é acelerada cada vez mais, transformando-se em trajetória em espiral, até que ela é lançada por uma fenda em direção ao núcleo-alvo.

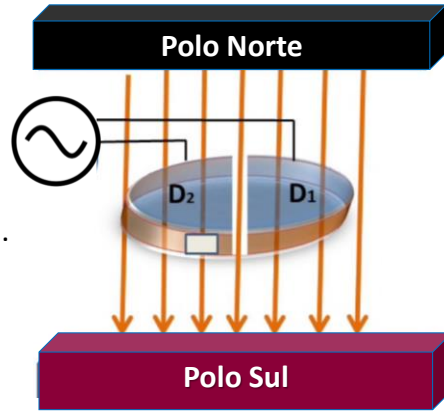
<https://plus.google.com/+LarryPhillipsTutor/posts/iBt7roqp6f>

## Cíclotron

Usa campos  $\vec{E}$  para acelerar e campos  $\vec{B}$  para guiar partículas em altíssimas velocidades

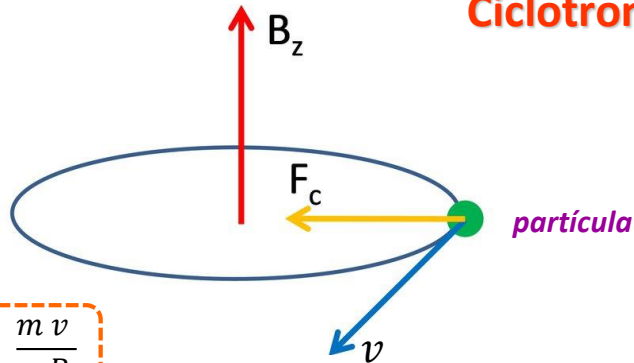
O acelerador de partículas é um instrumento essencialmente construído utilizando uma fonte de partículas carregadas expostas a campos elétricos  $\vec{E}$  que as aceleram.

Após a aceleração passam em seguida por um campo magnético  $\vec{B}$  que as desvia de suas trajetórias focalizando-as e controlando as direções (defletindo-as).



Usa campos  $\vec{E}$  para acelerar e campos  $\vec{B}$  para guiar partículas em altíssimas velocidades

## Cíclotron



raio da orbita circular

$$r = \frac{m v}{q B}$$

frequência do cíclotron

$$f = \frac{q B}{2\pi m}$$

frequência angular do cíclotron  $\omega$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{q B}{2\pi m}$$

$$\omega = \frac{q}{m} B$$

Usa campos  $\vec{E}$  para  
acelerar e campos  $\vec{B}$   
para guiar partículas  
em altíssimas  
velocidades

## Aceleradores de partículas

O ciclotron é um acelerador de partículas cíclico. Há também os aceleradores lineares.

Nos aceleradores cíclicos, a energia final das partículas depende da amplitude da diferença de potencial aplicada e do número de voltas que estas dão no dispositivo. Os tipos de aceleradores cíclicos mais utilizados são o ciclotron e o síncrotron.

## Acelerador de partículas - LHC

O LHC Large Hadron Collider - **Grande Colisor de Hádrons** do CERN - *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear, é o maior acelerador de partículas e o de maior energia existente do mundo.

Seu principal objetivo é obter dados sobre colisões de feixes de partículas, tanto de prótons a uma energia de 7 TeV (1,12  $\mu\text{J}$ ) por partícula, ou núcleos de chumbo a energia de 574 TeV (92,0  $\mu\text{J}$ ) por núcleo.

$$1 \text{ TeV} = 1 \text{ tera eV} = 10^{12} \text{ eV}$$

## Acelerador de partículas - LHC

O laboratório localiza-se em um túnel de 27 km de circunferência em profundidade de 50 a 150 m abaixo do nível do solo na fronteira franco-suíça, próximo a Genebra, Suíça.



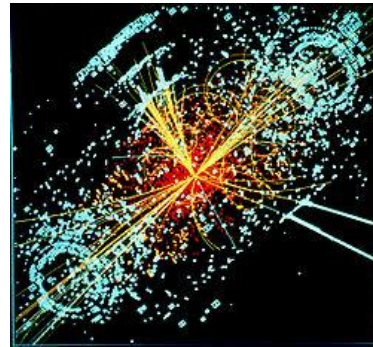
## Acelerador de partículas - LHC

O bóson de Higgs

*É uma partícula subatômica que os físicos acreditam ser responsável por dar massa às demais.*

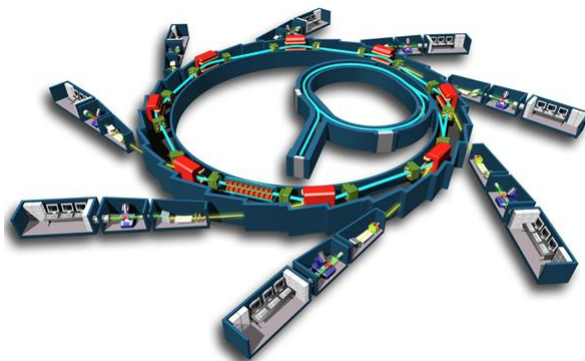
**Prêmio Nobel de**

**Física 2013** ao belga **François Englert** e ao britânico **Peter Higgs** pela descoberta teórica do mecanismo que explicaria a origem da massa das partículas subatômicas, cuja existência foi recentemente confirmada pelas experiências conduzidas no CERN



*Modelo esperado da produção de bósons de Higgs na colisão de dois prótons.*

## Acelerador de partículas



## Síncrotron-Acelerador de partículas

O **Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS)** é uma instituição de pesquisa em física, biologia estrutural e nanotecnologia .

O laboratório projetado em 1983 entrou em funcionamento em 1997 em Campinas, São Paulo.

O LNLS possui um acelerador de partículas (um síncrotron) usado como fonte de luz que é o pioneiro desse gênero no Hemisfério Sul e foi projetado e construído no Brasil.



## Síncrotron-Acelerador de partículas



O Novo laboratório de luz síncrotron 4G, será construído no mesmo local com inauguração prevista para 2019. Nele ficará Sirius, o novo acelerador de partículas com 235 metros de diâmetro.



096059-A-FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 1

Ignês  
Caracelli

97

## Síncrotron-Sirius



[https://www.youtube.com/watch?v=S\\_cx96fFFs](https://www.youtube.com/watch?v=S_cx96fFFs)



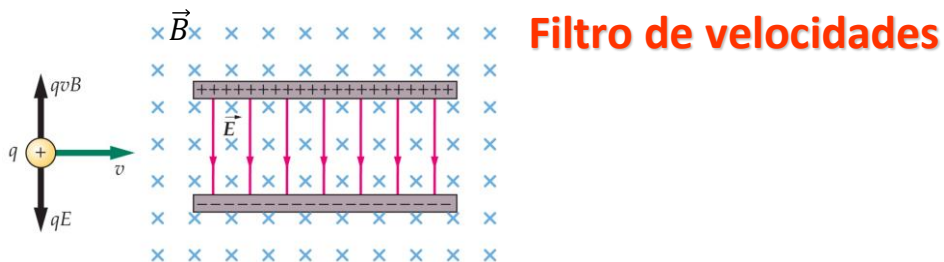
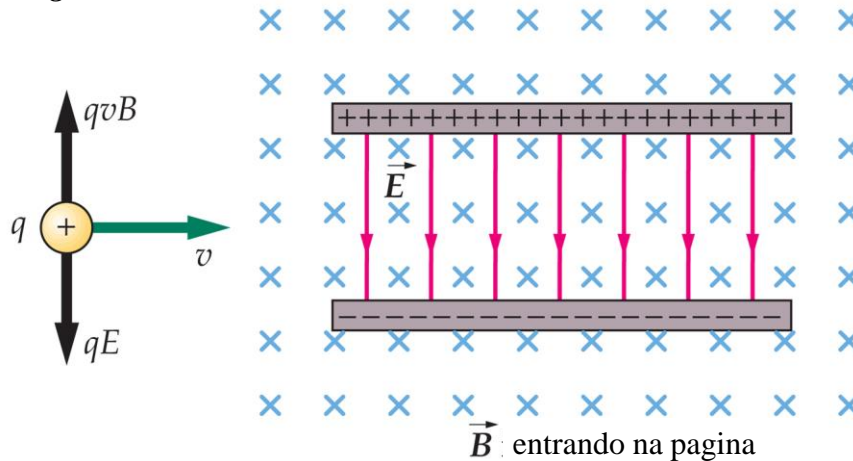
096059-A-FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 1

Ignês  
Caracelli

98

## Filtro de velocidades

É um dispositivo eletromagnético cuja função é separar íons que tenham uma determinada velocidade, qualquer que seja a sua carga e massa

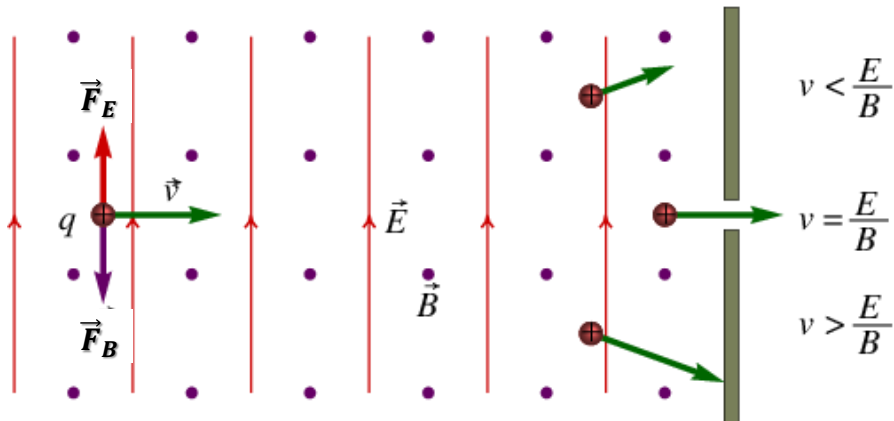


se as partículas descrevem trajetória retilínea → não sofrem deflexão

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

$$qE = qvB \Rightarrow v = \frac{E}{B}$$

## Filtro de velocidades

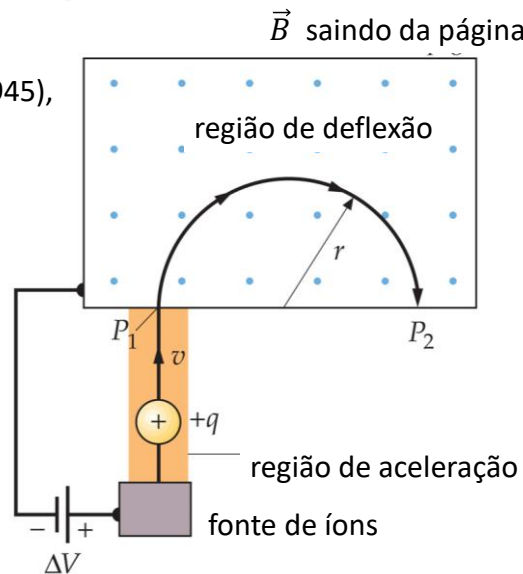


## Espectrômetro de massas

→ inventado em 1919 por Francis William Aston (1877-1945), físico-químico britânico.



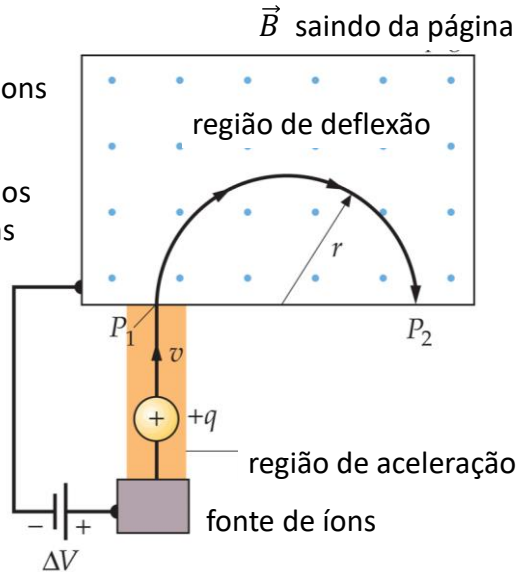
Recebeu o Nobel de Química de 1922, "pela descoberta, utilizando o seu equipamento, de isótopos, em um grande número de elementos não radioativos"



## Espectrômetro de massas

**Objetivo:** determinar a razão massa/carga ( $m/q$ ) de íons de carga conhecida

**Como?** determinação dos raios das órbitas circulares dos íons em  $\vec{B}$  uniforme



## Espectrômetro de massas

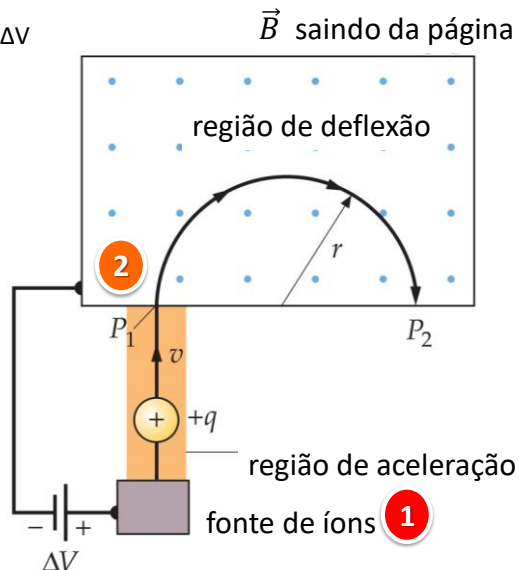
- 1 • íons partem do repouso
- sofrem queda de potencial  $\Delta V$

**conservação de energia:**

$$K = \Delta U$$

$$\frac{1}{2} m v^2 = q \Delta V$$

$$v^2 = \frac{2 q \Delta V}{m}$$



- 2 • íons tem velocidade  $v$
- entram na região de  $\vec{B}$

$$F = m a$$

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

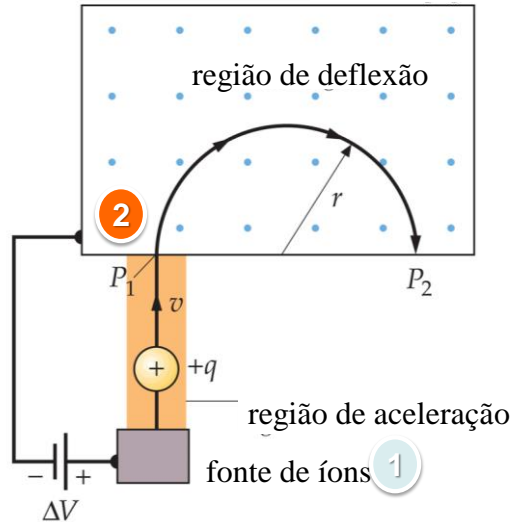
$$q v B = m \frac{v^2}{r}$$

$$v = \frac{q B r}{m}$$

$$v^2 = \frac{q^2 B^2 r^2}{m^2}$$

## Espectrômetro de massas

$\vec{B}$  saindo da página



- 1 • íons partem do repouso
- sofrem queda de potencial  $\Delta V$

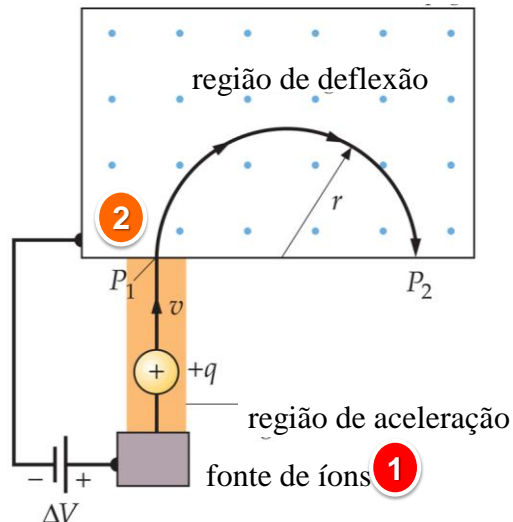
$$v^2 = \frac{2 q \Delta V}{m}$$

- 2 • íons tem velocidade  $v$
- entram na região de  $\vec{B}$

$$v^2 = \frac{q^2 B^2 r^2}{m^2}$$

## Espectrômetro de massas

$\vec{B}$  saindo da página



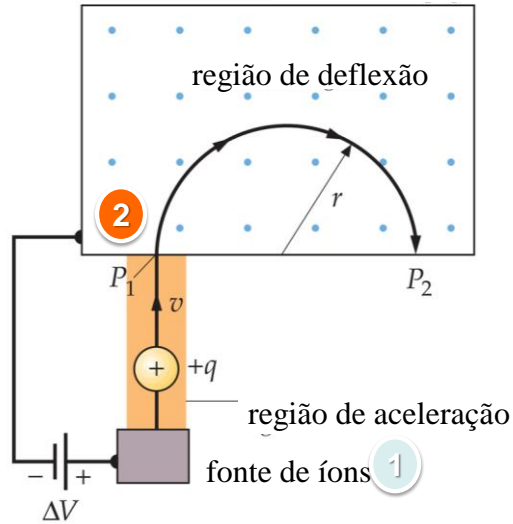
# Espectrômetro de massas

$\vec{B}$  saindo da página

$$\frac{2q \Delta V}{m} = \frac{q^2 B^2 r^2}{m^2}$$

$$\frac{2 \Delta V}{B^2 r^2} = \frac{q}{m}$$

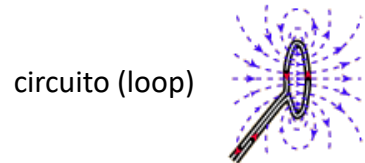
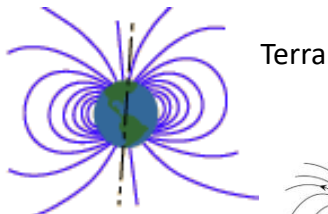
$$\frac{m}{q} = \frac{B^2 r^2}{2 \Delta V}$$



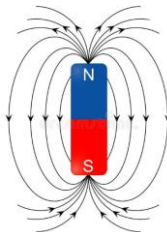
## Fontes de Campo Magnético



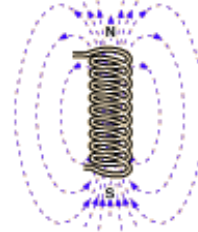
$\vec{v} \neq 0, m, q$   
partícula carregada em movimento



barra magnética



solenóide



## Valores de Campo Magnético $\vec{B}$

unidade de campo magnético SI: Tesla T  
anteriormente: Gauss G

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

campo magnético terrestre:  $\sim 0,6 \text{ G} = 6 \times 10^{-5} \text{ T}$

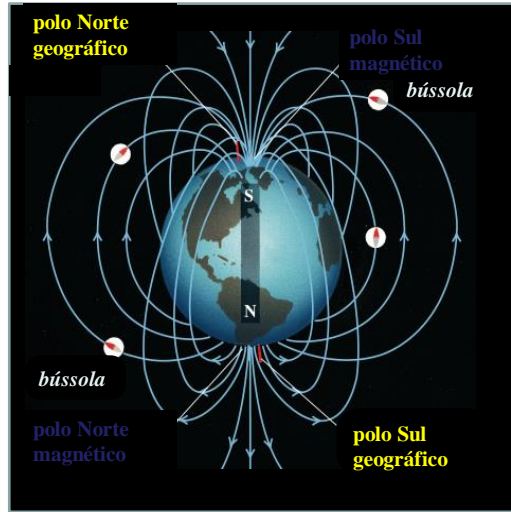
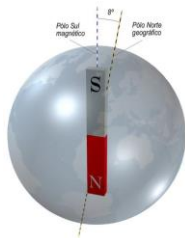
ímãs de laboratório: 25000 G ou 2,5 T

ímãs supercondutores: 250000 G ou 25 T



## O Campo Magnético ... um pouco do passado

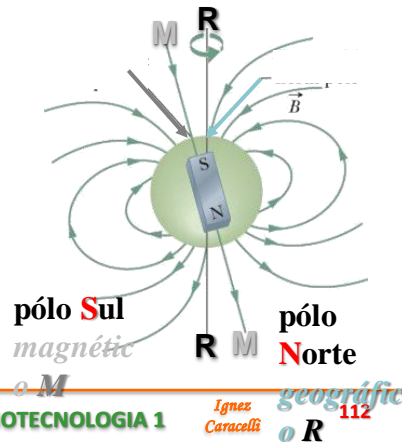
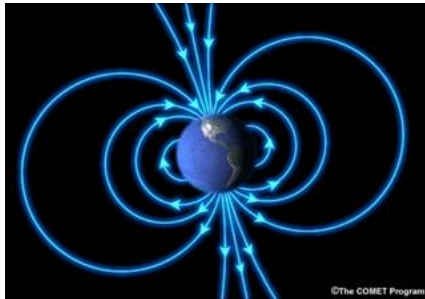
1600,  
William Gilbert  
sugeriu que a  
própria Terra fosse  
um ímã permanente.



## Magnetismo na Terra

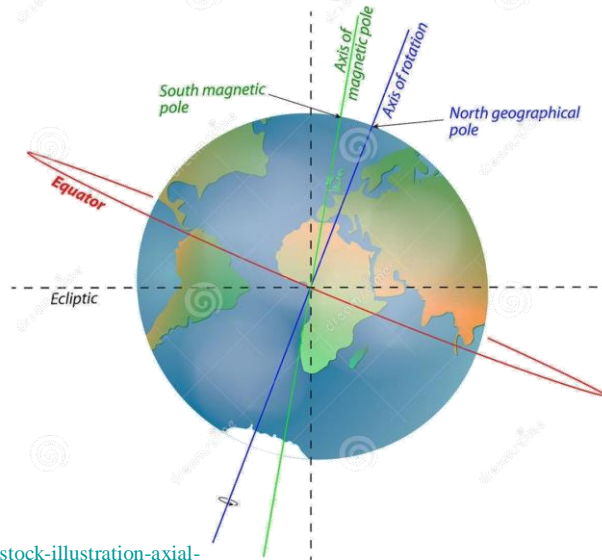
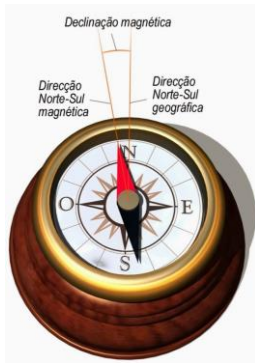
A bússola, por sua vez, nos levou à descoberta de que a própria Terra é um grande ímã.

As regiões de um ímã nas quais o magnetismo é mais intenso, em geral as extremidades, são chamadas de **pólos**.





## Magnetismo na Terra

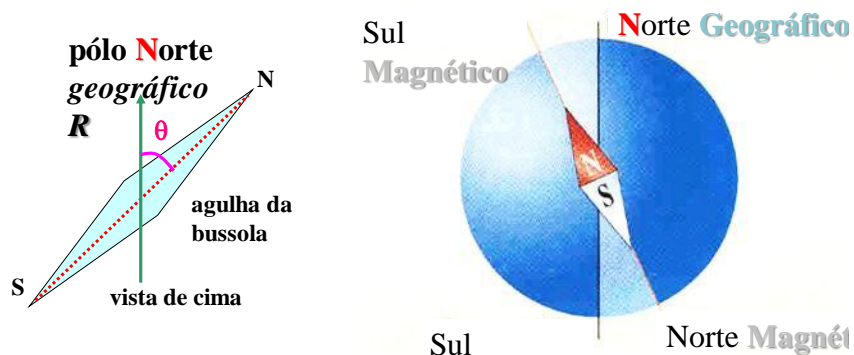


<https://www.dreamstime.com/stock-illustration-axial-tilt-earth-vector-diagram-image41459242>

## Magnetismo na Terra

O **campo magnético terrestre** assemelha-se a um dipolo magnético com seus pólos próximos aos pólos geográficos da Terra.

Uma linha imaginária traçada entre os pólos sul e norte magnéticos apresenta uma inclinação de aproximadamente  $\theta = 11,3^\circ$  relativa ao eixo de rotação (**R**) da Terra.



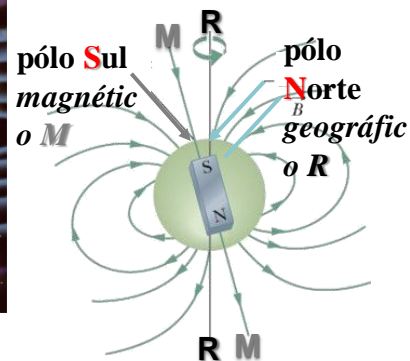
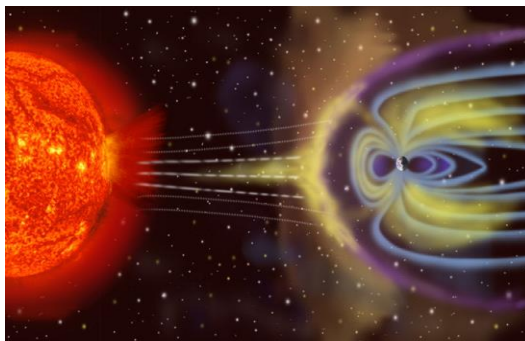
## Magnetismo na Terra

*Um campo magnético, genericamente, se estende infinitamente.*

*Um campo magnético vai se tornando mais fraco com o aumento da distância da sua fonte.*

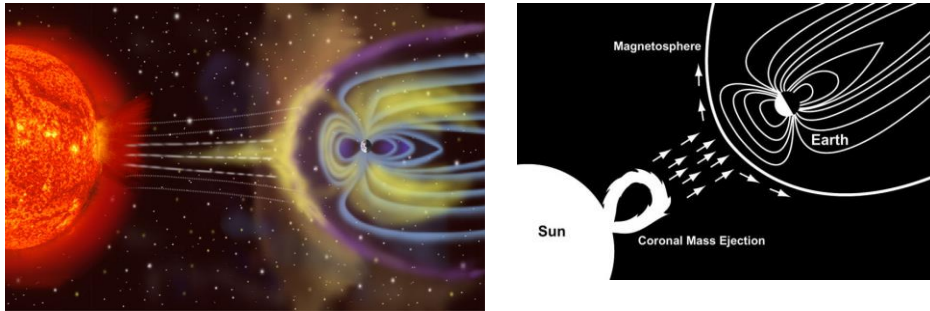
## Magnetismo na Terra

Como o efeito do campo magnético terrestre se estende por várias dezenas de milhares de quilômetros, no espaço ele é chamado de **magnetosfera da Terra**.



## Magnetismo na Terra

Como o efeito do campo magnético terrestre se estende por várias dezenas de milhares de quilômetros, no espaço ele é chamado de **magnetosfera da Terra**.



## Magnetismo na Terra

O campo é semelhante ao de um ímã de barra, mas essa semelhança é superficial.

O campo magnético de um ímã de barra, ou qualquer outro tipo de ímã permanente, é criado pelo movimento coordenado de elétrons dentro dos átomos de ferro.

O núcleo da Terra, no entanto, é mais quente que  $T_c = 1043$  K, a temperatura de Curie em que a orientação dos orbitais do elétron dentro do ferro se torna aleatória.

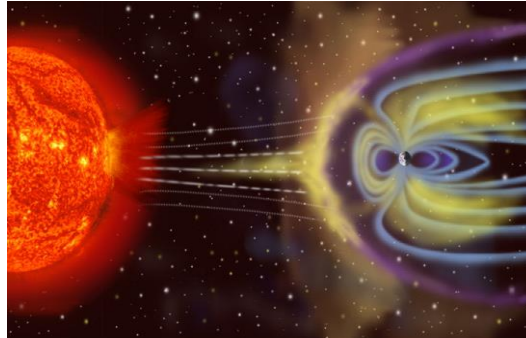
Tal aleatorização tende a fazer a substância perder o seu campo magnético.

## Magnetismo na Terra

Portanto, o campo magnético da Terra não é causado por depósitos magnetizados de ferro, mas em grande parte por correntes elétricas do núcleo externo líquido.

Outra característica que distingue a Terra magneticamente de um ímã em barra é sua magnetosfera.

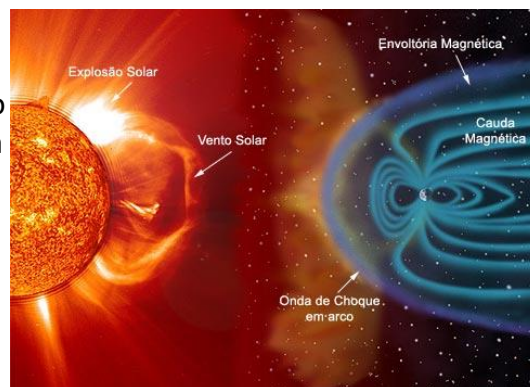
A grandes distâncias do planeta, isso domina o campo magnético da superfície.



## Magnetismo na Terra

O campo magnético da Terra é uma proteção natural do nosso planeta que impede que as partículas carregadas emitidas pelo Sol ou vindas do espaço profundo cheguem à superfície.

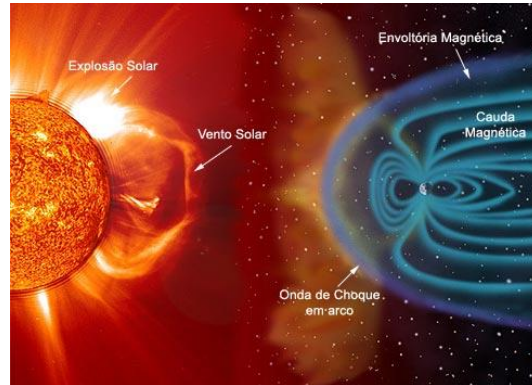
Como as partículas solares são compostas por íons e elétrons elas sofrem a ação desse campo e são, em sua maioria, desviadas por ele. Cientistas descobriram que esse escudo protetor, chamado magnetosfera, não é perfeito.



Apolo11 - [http://www.apolo11.com.spacenews.php?posic=dat\\_20081218-101028.inc](http://www.apolo11.com.spacenews.php?posic=dat_20081218-101028.inc)

## Magnetismo na Terra

Trabalhando com dados da frota de satélites THEMIS (Linha do Tempo de Eventos e Interações de Macro-escala Durante Sub-tempestades), da NASA, pesquisadores da Universidade da Califórnia descobriram que existem dois enormes buracos na magnetosfera que permitem o vazamento das partículas e consequentemente sua entrada na Terra.



Apolo11 - [http://www.apolo11.com.spacenews.php?posic=dat\\_20081218-101028.inc](http://www.apolo11.com.spacenews.php?posic=dat_20081218-101028.inc)



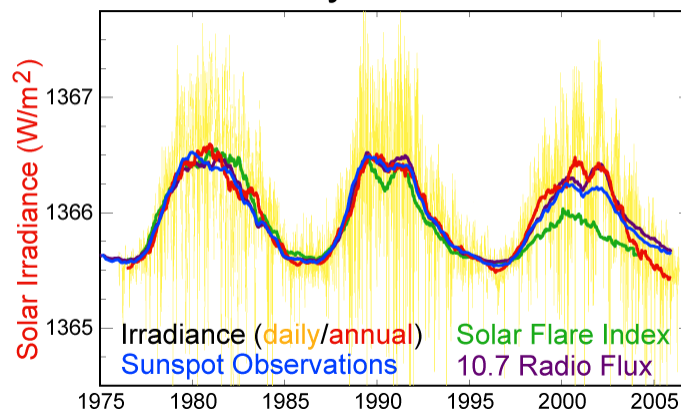
096059-A-FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 1

Ignez Caracelli

121

## Magnetismo na Terra

### Solar Cycle Variations



[http://www.answers.com/topic/solar-cycle#Solar\\_irradiance](http://www.answers.com/topic/solar-cycle#Solar_irradiance)



096059-A-FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 1

Ignez Caracelli

122



## BioMagnetismo

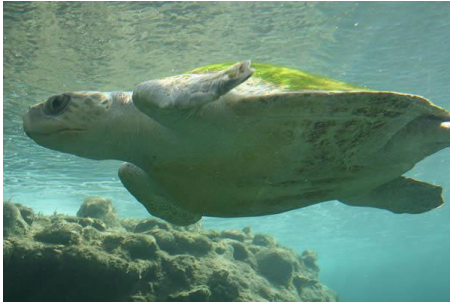
Cristais de magnetita são encontrados em certos tipos de bactérias (por exemplo, na *Aquaspirillum magnetotacticum*), em cérebros de abelhas, cupins, peixes, ursos, alguns pássaros (por exemplo, em pombos) e em seres humanos.

Acredita-se que estes cristais estão envolvidos no processo de magneto-recepção (capacidade de perceber a polaridade ou a inclinação do campo magnético da Terra) e na navegação animal por orientação magnética.

O estudo de biomagnetismo começou com as descobertas do paleontologista Heinz Lowenstam na década de 1960.

[Nature. 1983 Jan 6;301\(5895\):79-80.](#)

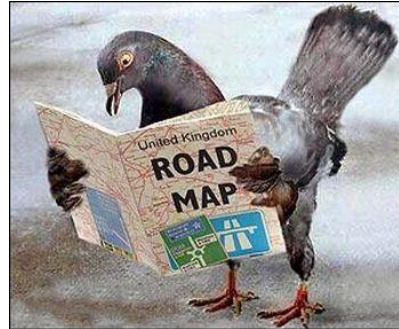
## BioMagnetismo



As tartarugas marinhas navegam usando o campo magnético da Terra



O pombo-correio pode retornar a sua casa usando sua capacidade de sentir o campo magnético da Terra e outras pistas para se orientar



<https://www.english-online.at/news-articles/science/animals-and-shifting-magnetic-fields.htm>



096059-A-FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 1

Ignês  
Caracelli

## Exemplos: *deteção de campo magnéticos*

### SQUID

(*Superconducting QUantum Interference Devices*) são dispositivos supercondutores de interferência quântica

- equipamento sensível complexo
- requer temperaturas criogênicas para a operação (hélio ou nitrogênio líquido).
- capaz de detectar campos magnéticos  $\cong 10^{-8}$  T ou menores (até  $10^{-15}$  T);
- campo magnético terrestre  $\cong 10^{-5}$  T.
  
- equipamentos desse tipo têm sido usados para detectar fluidos gástricos.



096059-A-FÍSICA PARA BIOTECNOLOGIA 1

Ignês  
Caracelli

126

## Exemplos: *detecção de campo magnéticos*

### SQUID

Sua sensibilidade o torna essencial em algumas aplicações, como na medição de sinais magnéticos gerados no cérebro, de campos geomagnéticos flutuantes em áreas remotas para a detecção de ondas gravitacionais e observação de ruído de spin em um conjunto de núcleos magnéticos.



## Exemplos: *detecção de campo magnéticos*

Um sensor magnético baseado em um super átomo demonstrou sua eficácia na prática medindo a atividade cerebral humana.

Os testes demonstraram o potencial do sensor atômico para aplicações práticas em medicina e nas pesquisas de interfaces neurais, para o controle de próteses ou outros equipamentos, como robôs e computadores, diretamente pelo pensamento.





## Exemplos: *detecção de campo magnéticos*

As medições foram comparadas com as obtidas por um SQUID.

Contudo, por precisarem de materiais *supercondutores*, eles exigem aparatos criogênicos complicados, caros e grandes.

O novo sensor atômico apresentou uma sensibilidade ligeiramente menor do que os SQUIDS.

Contudo, além de ter potencial para melhorias, ele funciona a temperatura ambiente, é minúsculo, abrindo caminho para equipamentos portáteis e de baixo custo.

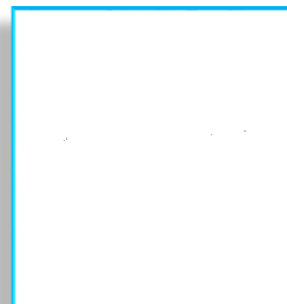
<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=sensor-magnetico-atomico&id=010165120425#.W9bnTntKjIU>



## Exemplos: *MRI – Imagens por ressonância magnética*

A **ressonância magnética (MRI)** é uma técnica de imagem médica usada em radiologia para formar imagens da anatomia e dos processos fisiológicos do corpo, tanto na saúde como na doença.

Os scanners de MRI usam campos magnéticos fortes, ondas de rádio e gradientes de campo para gerar imagens dos órgãos no corpo.



Exame de R.M., do topo do cérebro à base. O pequeno ponto em cima à esquerda é uma cápsula de Vitamina E, que serve de orientação na compilação das imagens.

[https://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem\\_por\\_resson%C3%A2ncia\\_magn%C3%A9tica](https://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem_por_resson%C3%A2ncia_magn%C3%A9tica)

