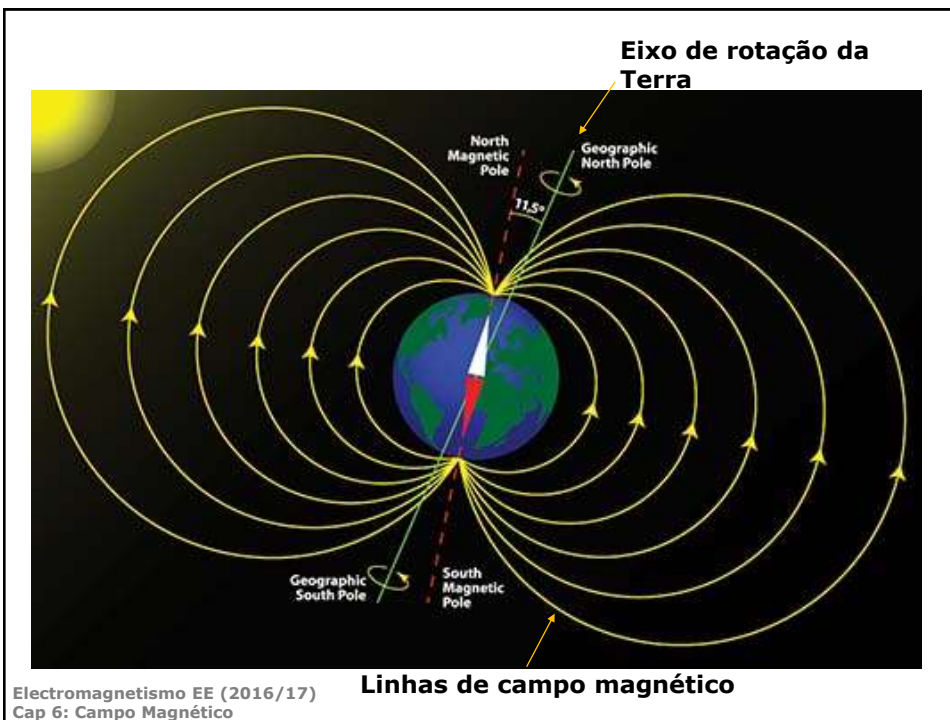


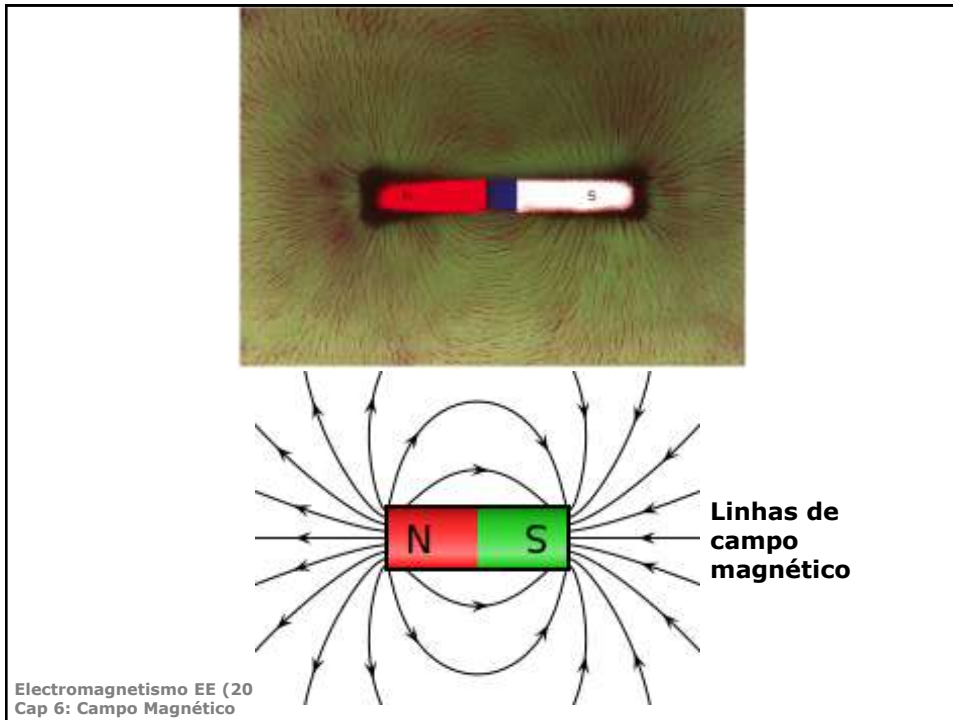
Cap. 6 – Campo Magnético



A latitudes (norte ou sul) elevadas pode assistir-se ao aparecimento de auroras (nos países nórdicos: "*northern lights*"). As auroras podem ter 200 km de altura, 4000 km de comprimento, em forma de arco, mas têm somente cerca de 100 m de espessura. O que provoca as auroras e porque é que são tão finas?

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético





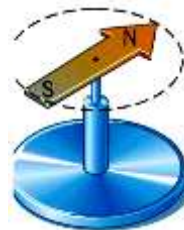
6.1. Introdução

Qual a origem do magnetismo?



China (???)
BC)

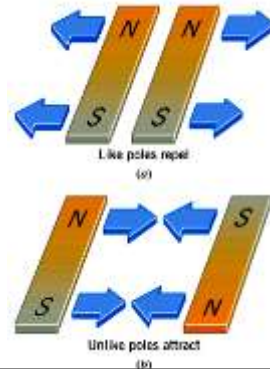
Descoberta da bússola





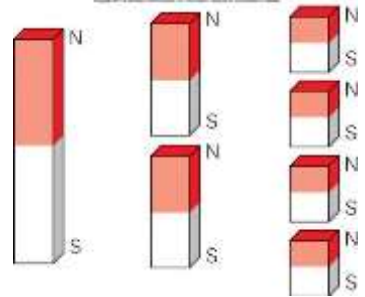
O termo magnetismo provém de magnetite (óxido de ferro natural – Fe_2O_3). De acordo com registos de 800 a 600 a.C., este mineral que atraía pedaços de ferro, foi encontrado pela primeira vez perto da cidade de Magnésia (Grécia antiga, hoje faz parte da Turquia e chama-se Manisa.)

- Pierre de Maricourt (1269), descobre os pólos do imã. Os pólos de mesmo tipo repelem-se; os pólos de tipo opostos atraem-se. [Conceito de polaridade.](#)



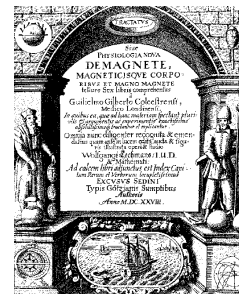
Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

- Um ímã é um dipolo.
- Não há monopolos magnéticos.
- Se cortarmos um ímã a meio, obtemos 2 dipolos.



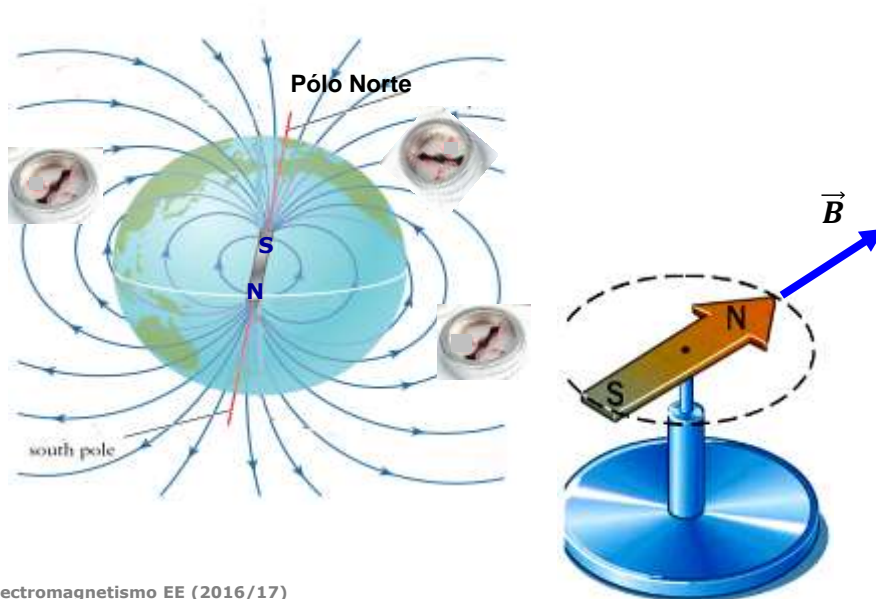
William Gilbert (1544 - 1603)

- William Gilbert publica "De Magnete" em 1600, que rapidamente se tornou na bíblia da electricidade e magnetismo da Europa. [Sugeriu que a própria Terra fosse um ímã permanente.](#)



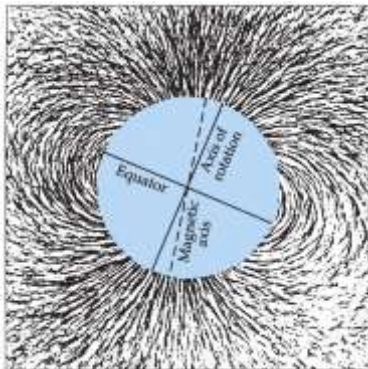
Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

O Pólo Norte Terrestre corresponde a um pólo sul magnético!



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Pólo Norte Magnético



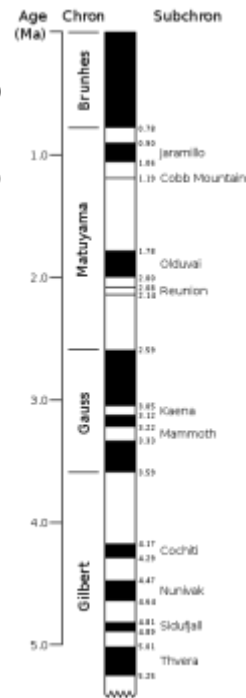
Os pólos geográficos e magnéticos terrestres não coincidem e a sua posição relativa vai variando com o tempo.



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

O campo magnético terrestre periodicamente inverte-se. Esse fenômeno ocorre com intervalos entre 100 000 e 1 000 000 de anos, sendo em media cerca de 450 000 anos.

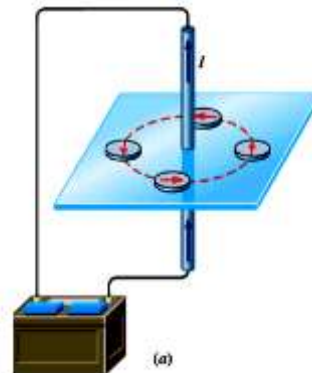
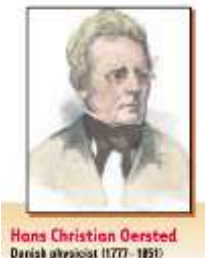
A maioria das inversões ocorre com intervalos de 1 000 a 10 000 anos. A última inversão Brunhes-Matuyama ocorreu há 780 000 anos.



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

- John Michell publica "*A Treatise of Artificial Magnets*" (1750). Verifica que os pólos magnéticos exercem **forças atractivas ou repulsivas**, uns sobre os outros, e tais forças **variam com o inverso do quadrado da respectiva distância**.

A **relação entre magnetismo e electricidade** foi descoberta por Oersted em 1819 quando descobre que a corrente eléctrica que percorria um condutor provocava o desvio da agulha de uma bússola.



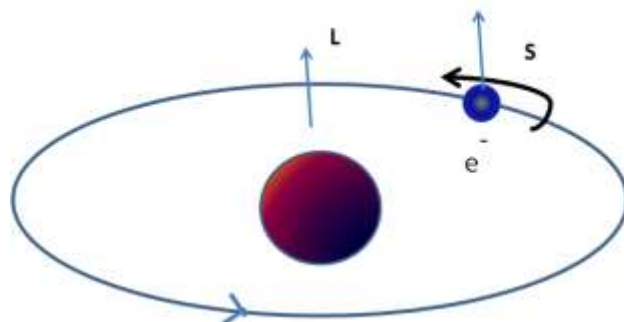
Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

A experiência de Oersted constituiu o ponto de partida para as pesquisas que Ampère viria a realizar, durante as quais iria concluir que uma agulha magnética podia ser usada como um instrumento para detectar uma corrente eléctrica (invenção do galvanómetro). Descobre a causa do magnetismo. **Sabem qual é?**



André Marie Ampère,
(1775-1836)

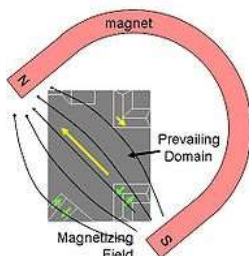
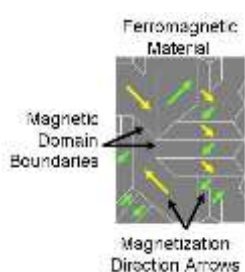
Porque é que há materiais que apresentam estas propriedades?



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

O spin do electrão e o movimento do electrão em torno do núcleo, constituem pequenos magnetes.

Usualmente o movimento do enorme número de electrões contido nos materiais não apresenta orientações preferenciais (orientados aleatoriamente), não causando por isso nenhum efeito resultante. Mas nos materiais magnéticos, alguns electrões tendem a alinhar-se, criando um efeito magnético não negligenciável.



- A maior parte dos materiais não é magnético
- Os magnetes naturais denominam-se materiais ferromagnéticos (como o ferro): Fe, Co, Ni

Ampère afirma que o magnetismo é uma consequência de correntes eléctricas circulares.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético



Michael Faraday
(1791-1867)

1820, Faraday verifica que uma **corrente eléctrica pode ser induzida num circuito, seja pelo movimento de um íman**, perto do circuito, seja pela alteração duma corrente num outro circuito, vizinho ao primeiro. Um campo magnético variável cria um campo eléctrico.



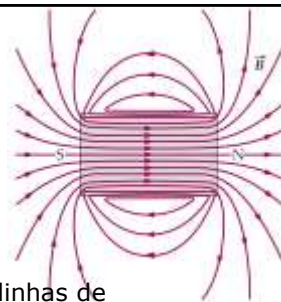
- 1873, J.C. Maxwell enuncia as **Leis do Electromagnetismo**.
- 1888, Heinrich Hertz: **ondas electromagnéticas** no laboratório.
Verificação das previsões de Maxwell.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

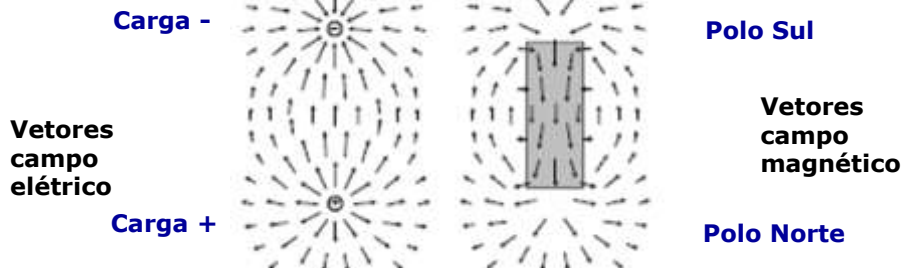
Campo Magnético e Linhas de Campo Magnético

Os materiais magnéticos alteram as características dos espaços que os rodeiam, criando um **Campo Magnético (\vec{B})**.

O campo magnético pode ser representado por linhas de campo magnético. Têm o sentido do polo Norte para o polo Sul.



Os vetores \vec{B} são tangentes às linhas de campo é tangente, em cada ponto.



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

6.2. Movimento de cargas eléctricas pontuais em campos magnéticos. Força magnética

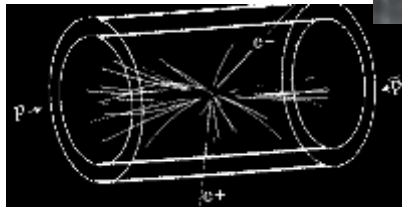
Os campos magnético detetam-se com magnetes (ímanes), bússolas...



Podem detetar-se também com cargas eléctricas em movimento. Como?

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Este tipo de imagens são familiares?



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

LHC – Large Hadron Collider

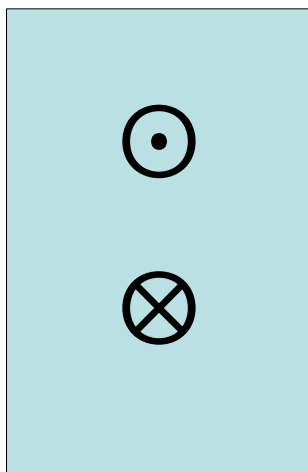


Que significam?
Que informações
fornecem?



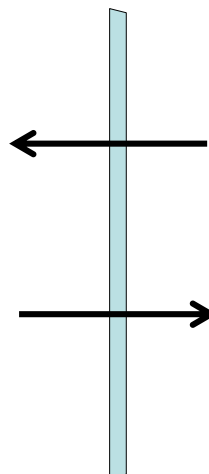
Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Convenção



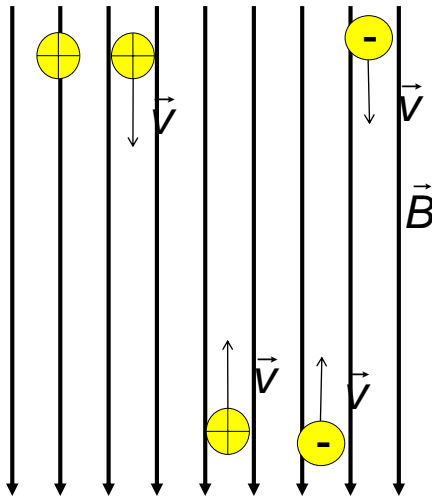
Representação de
grandeza com
sentido para fora do
plano

Representação de
grandeza com
sentido para dentro
do plano



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

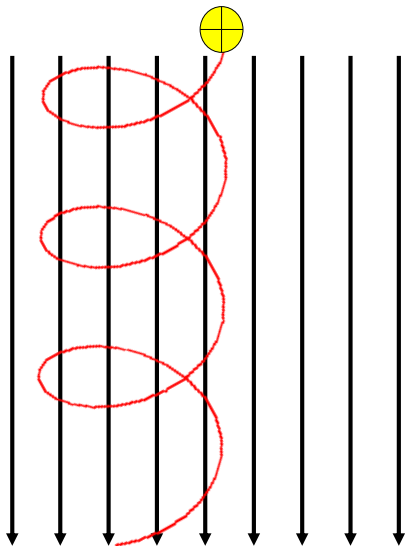
Movimento de partículas com carga em campos magnéticos



Verifica-se que uma partícula carregada não sofre efeito do campo magnético se:

- Estiver em repouso;
- Se se mover com a mesma direção do campo (paralela ou anti-paralela).

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

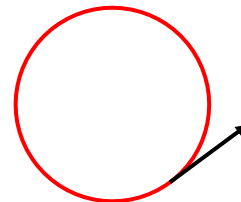


Verifica-se que se uma partícula carregada entrar num campo magnético **uniforme** com uma direção que faça um determinado ângulo, diferente de 0° e de 90° , com a direção do campo magnético, as trajetórias são helicoidais.

Verifica-se também que o raio da trajetória hélice é

\vec{B}

- Proporcional a $|\mathbf{v}|$ e m
- Inversamente proporcional a q



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Verifica-se que se uma partícula carregada entrar num campo magnético uniforme com uma direção perpendicular à direção do campo magnético, e com velocidade constante, as trajetórias são circulares.

Sentido do campo B

Verifica-se também que o raio da trajetória é

- Proporcional a $|v|$ e m
- Inversamente proporcional a q

Verifica-se que se uma partícula carregada o raio da trajetória é inversamente proporcional à intensidade do campo magnético.

Como se pode explicar estes comportamentos?

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Começando por analisar ao movimento (circular e velocidade constante) a 2D:

-A força que actua perpendicular à velocidade (Força centrípeta).

Sentido do campo B

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

-Viu-se experimentalmente que:

$r \propto \frac{mv}{q}$

Então:

$F \propto m \frac{v^2 q}{mv} \Leftrightarrow F \propto vq$

Verifica-se também experimentalmente que: $r \propto \frac{1}{B}$

Então: $F \propto B$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Partindo das relações obtidas no slide...

$$F \propto vq$$

$$F \propto B$$

...e das direções e sentidos das grandezas envolvidas, obtém-se que:

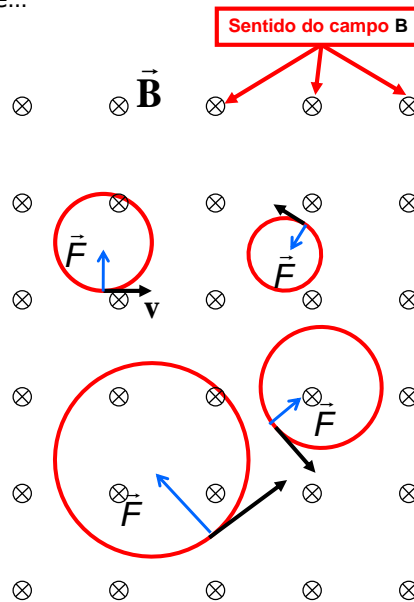
$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Quais as unidade SI de campo magnético?

$$1 \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \text{m/s}} \equiv 1 \text{ tesla (T)}$$

É frequente usar uma unidade menor,
o gauss (G) $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético



Implicações de

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

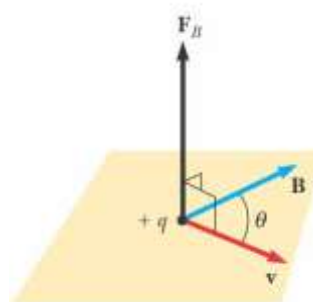
1. F é perpendicular à velocidade v da carga q e ao campo magnético B .

2. A intensidade da força magnética é

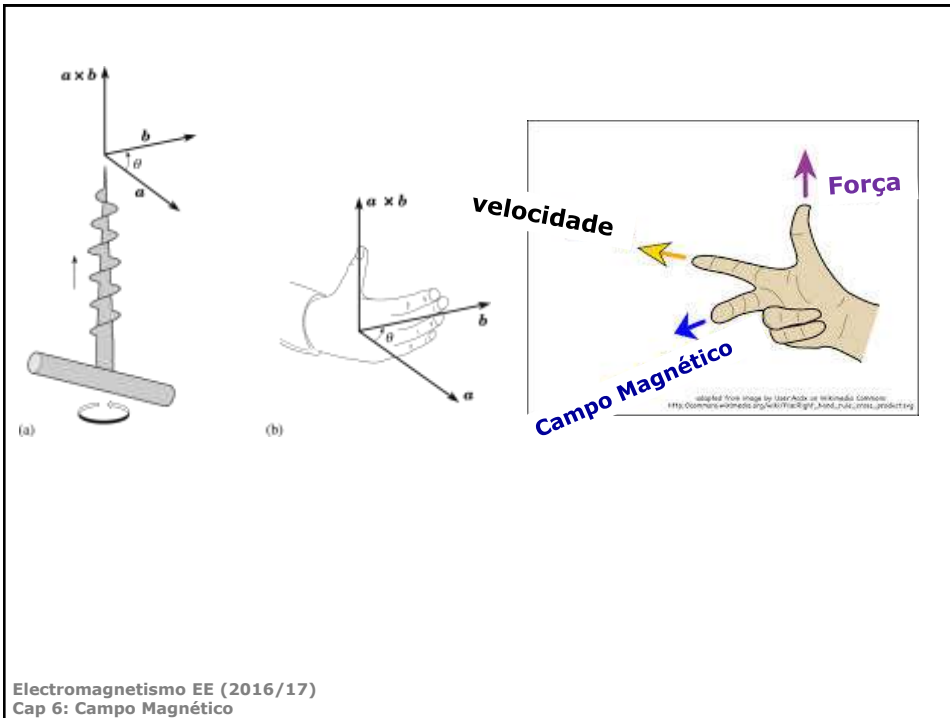
$$F = qvB \sin\theta$$

O que significa que a força magnética numa carga estacionária ou que se mova paralelamente ao campo magnético é nula.

3. Sentido da força magnética dada pela regra da mão direita



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético



Movimento de cargas eléctricas em campos magnéticos

A positive charge (red circle with '+') moves with velocity \vec{v} (pink arrow) in a magnetic field \vec{B} (represented by dots). The magnetic force \vec{F}_B (blue arrow) is perpendicular to the velocity, causing the charge to move in a circular path (dashed line).

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

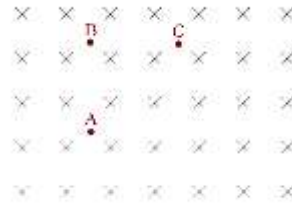
A negative charge (blue circle with '-') moves with velocity \vec{v} (pink arrow) in a magnetic field \vec{B} (represented by dots). The magnetic force \vec{F}_B (blue arrow) is perpendicular to the velocity, causing the charge to move in a circular path (dashed line).

- A direcção da força magnética é alterada, mas a sua magnitude permanece constante
- O campo magnético pode alterar a direcção do movimento da carga, mas não pode alterar o módulo da sua velocidade.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Check point 1

3 pontos A, B e C num campo magnético uniforme que aponta para o interior do ecrã.



1) Uma carga positiva em A está em repouso. Qual o sentido da força magnética a que fica sujeita?

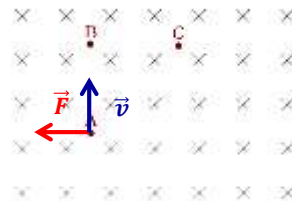
- a) Direita b) Esquerda c) Interior do ecrã
d) Exterior do ecrã e) Zero f) Cima g) baixo

A força magnética é: $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Check point 2

3 pontos A, B e C num campo magnético uniforme que aponta para o interior do ecrã.



2) A carga positiva tem velocidade no sentido de A para B. O sentido da força magnética é:

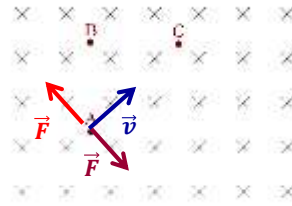
- a) Direita b) Esquerda c) Interior do ecrã
d) Exterior do ecrã e) Zero f) Cima g) baixo

A Força Magnética é $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Check point 3

3 pontos A, B e C num campo magnético uniforme que aponta para o interior do ecrã.



3) A carga positiva tem **velocidade** no sentido de A para C. O sentido da **força magnética** é...

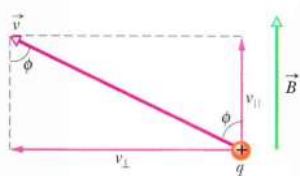
3) E se a carga for **negative** com **velocidade** no sentido de A para C. Qual o sentido da **força magnética**?

A Força Magnética é

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

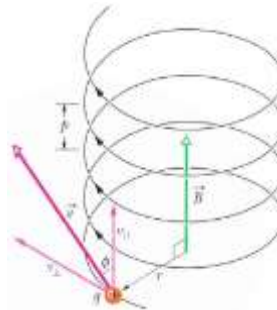
Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

E se a velocidade não é perpendicular ao campo B?

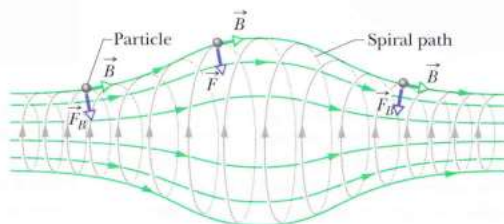


$$v_{\perp} = v \sin \phi$$

$$v_{\parallel} = v \cos \phi$$



se B é não uniforme?



Uma **partícula** que evolui num **campo magnético** pode ficar "aprisionada".

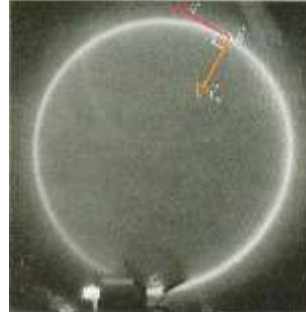
Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Movimento circular de cargas eléctricas

Se uma partícula se move com movimento circular a **velocidade constante**, então a magnitude da força resultante que actua na partícula é constante, a sua direcção é perpendicular à velocidade da partícula e o sentido "aponta" para o centro da trajectória. É uma **força centrípeta**.



Circulação de electrões numa câmara contendo um gás a baixa pressão.



Qual o sentido do campo magnético em cada caso?

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético



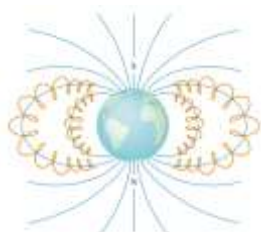
Aurora Borealis - Northern Lights - in shades of red and green from Maine.



Purple-green-yellowish northern lights in a star-filled sky with moonlight in Alaska

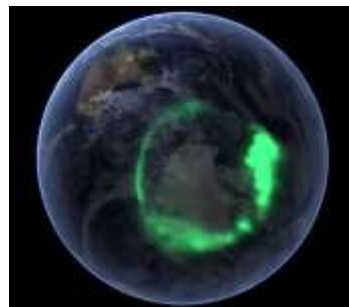
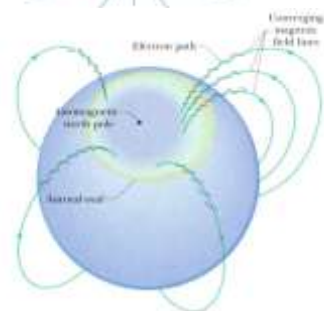
<http://geology.com/nasa/aurora-borealis.shtml>

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético



Cinturas de radiação de Van Allen

É uma região onde ocorrem vários fenómenos atmosféricos devido a concentrações de partículas carregadas no campo magnético terrestre, e foram descobertas em 1958 por James Van Allen: **Auroras boreais e austrais**.



Aurora Australis captured by NASA's IMAGE satellite and overlaid onto NASA's satellite-based Blue Marble image

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Checkpoint

Numa experiência destinado a medir a magnitude de um campo magnético uniforme, os electrões são acelerados a partir do repouso através de uma diferença de potencial de 350 V. Os electrões deslocam-se ao longo de uma trajectória circular com um raio de 7.5 cm. Determinar:

- A magnitude do campo magnético
- A velocidade angular dos electrões
- O período do movimento
- Qual o trabalho realizado pela força magnética?



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

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

mas $\vec{F} = m\vec{a}_c$

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

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

Frequência

$f = \frac{1}{T} \Rightarrow f = \frac{qB}{2\pi m}$

Frequência de ciclotrão

$T = \frac{2\pi r}{v} \Rightarrow T = \frac{2\pi m}{qB}$ Período

Frequência angular

$\omega = 2\pi f \Rightarrow \omega = \frac{qB}{m}$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Aceleradores de partículas

O ciclotrão é utilizado para aumentar a energia cinética de partículas carregadas. Para tal é necessário a existência de um campo magnético e de um campo eléctrico.

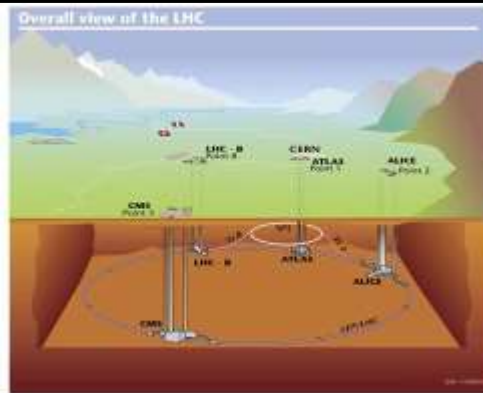
As partículas com energia cinética elevada podem ser utilizadas para bombardeamento de núcleos de outros átomos de forma a obter informação sobre Física de partículas e provocar reacções nucleares;

Em muitos hospitais são utilizados ciclotrões para produzir substâncias radioactivas de interesse para o diagnóstico médico.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Large Hadron Collider (LHC)

O maior e mais poderoso acelerador de partículas do mundo, que se encontra localizado no CERN, junto da fronteira entre a Suíça e a França. Consiste num anel com um perímetro de 27 km, e localizado a uma profundidade de 100 m.



Dentro do acelerador dois feixes de partículas são acelerados, até uma velocidade próxima da velocidade da luz (energia de 7 TeV). Os feixes circulam em tubos separados com condições de ultra-alto vácuo. A aceleração dos feixes é feita por um campo magnético forte, produzido por supercondutores electromagnéticos.

<http://lhcbhome.cern.ch/>

<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Collaboration/>

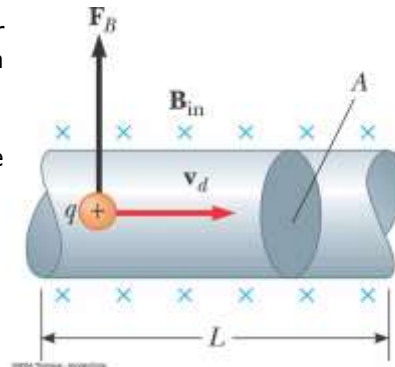
Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Força magnética que actua num condutor com uma corrente I

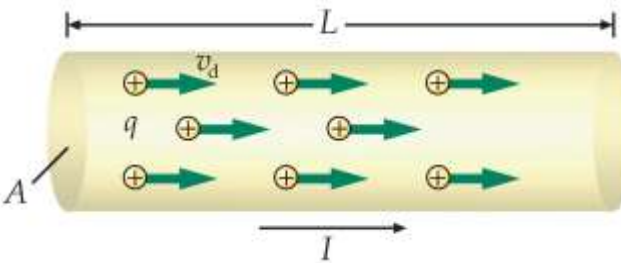
Um condutor que é percorrido por uma corrente eléctrica I sob a influência dum campo magnético.

– Cada carga individualmente sente uma força magnética.

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



Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético



Tendo em conta todos os portadores de carga na porção de condutor:

$$\vec{F}_B = (q\vec{v}_d \times \vec{B})nAL$$

n - nº de portadores de carga por unidade de volume.

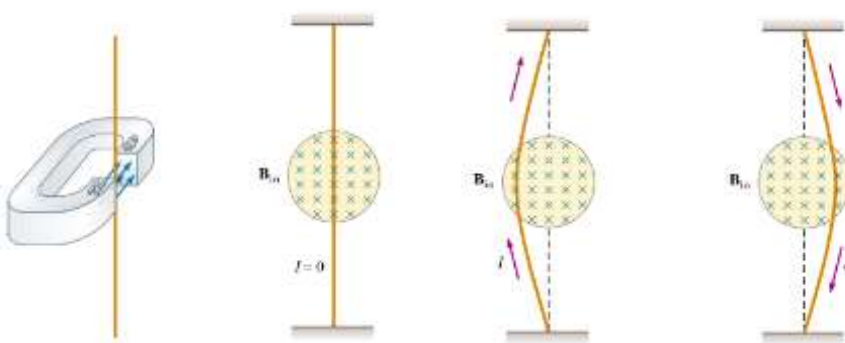
Sabendo que: $I = nqv_d A$

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

Lei de Laplace

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Consequências de $\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}$

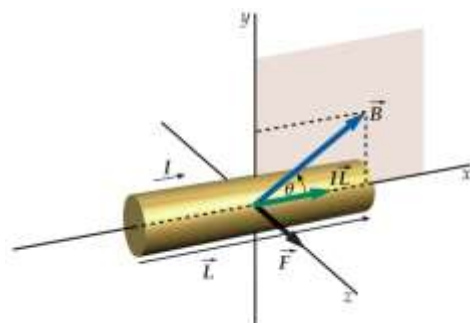


Quando $I = 0$, o fio permanece na vertical

Quando I tem sentido ascendente, o fio desvia-se para a esquerda

Quando I tem sentido descendente, o fio desvia-se para a direita

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético



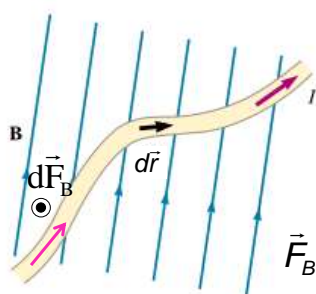
A força magnética que actua num fio rectilíneo percorrido por uma corrente I , num campo magnético uniforme é:

$$\vec{F}_B = I \vec{L} \times \vec{B} \quad \rightarrow \quad F_B = I L B \sin \theta$$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Fio condutor não rectilíneo

Segmento condutor de forma arbitrária, num campo magnético uniforme, percorrido por uma corrente I .



A força magnética, que é exercida no fio, pode ser calculada a partir da força magnética exercida em cada elemento $d\vec{r}$ do fio.

$$d\vec{F}_B = I d\vec{r} \times \vec{B}$$

$$\vec{F}_B = \int_a^b I d\vec{r} \times \vec{B} \Rightarrow \vec{F}_B = I \int_a^b d\vec{r} \times \vec{B}$$

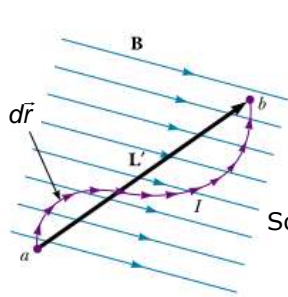
\vec{F}_B é máxima quando $\vec{B} \perp d\vec{r}$

$\vec{F}_B = 0$, quando $\vec{B} \parallel d\vec{r}$

a e b , correspondem a pontos terminais do condutor

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Caso I- Qual a força magnética a que fica sujeito um **condutor curvo**, quando se encontra numa região de **campo magnético uniforme**?



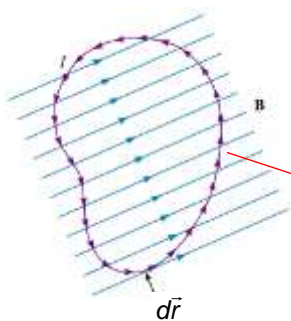
$$\vec{F}_B = \int_a^b I d\vec{r} \times \vec{B} \Rightarrow \vec{F}_B = I \int_a^b d\vec{r} \times \vec{B}$$

Soma de todos os vectores ds de a até b é igual a L

$$\vec{F}_B = I \vec{L} \times \vec{B}$$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Caso II - Qual a força magnética a que fica sujeito um **condutor curvo fechado (ou espira)**, quando se encontra numa região de **campo magnético uniforme**?



$$\vec{F}_B = I \oint d\vec{r} \times \vec{B}$$

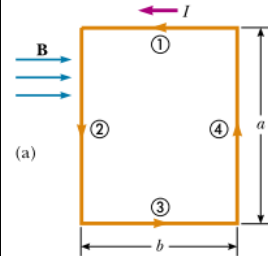
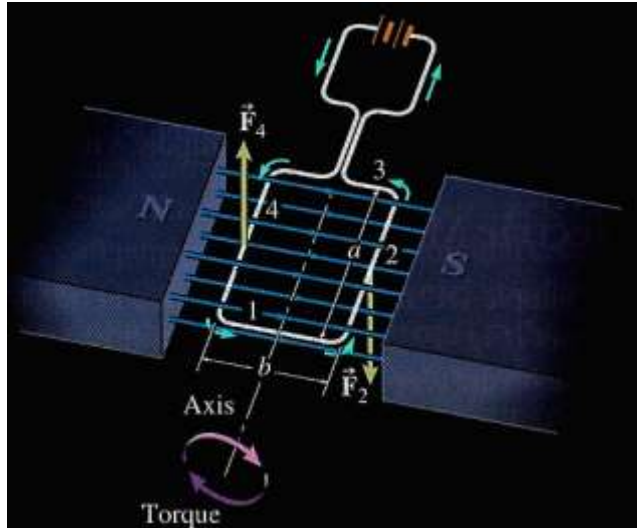
polígono fechado \Rightarrow a soma vectorial é ser nula

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

A força magnética total sobre qualquer espira de corrente, fechada, num campo magnético uniforme é igual a zero.

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

Espira de Corrente num Campo Magnético Uniforme



http://www.walter-fendt.de/ph14br/electricmotor_br.htm

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

A força magnética que actua num fio rectilíneo percorrido por uma corrente I , num campo magnético uniforme é:

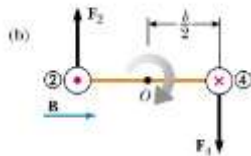
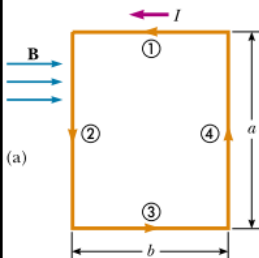
$$\vec{F}_B = I \vec{L} \times \vec{B}$$

Campo eléctrico é uniforme no plano da espira

A força magnética que actua nos lados 1 e 3 são nulas, porque

$$\vec{B} \parallel d\vec{r}$$

As forças que actuam no lado 2 e 4, são iguais, mas de sentidos opostos



$$F_1 = F_2 = I a B$$

Estas duas forças provocam um momento em relação a O, originando a rotação no sentido horário, da espira.

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/generator/dc.html>

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

$F_1 = F_2 = I a B$

A magnitude do momento da força, é:

$M = F_1 \frac{b}{2} + F_2 \frac{b}{2}$ (braço da força)

área da espira

$M = I a B \frac{b}{2} + I a B \frac{b}{2} \Rightarrow M = I a b B \Rightarrow M = I A B$

- Só válida quando \vec{B} é paralelo ao plano da espira
- Sentido da rotação depende do sentido da corrente
- Se a I for invertida \Rightarrow as forças são invertidas e a rotação dá-se no sentido oposto.

$\vec{M} = I \vec{A} \times \vec{B}$ Expressão Geral do Momento da Força

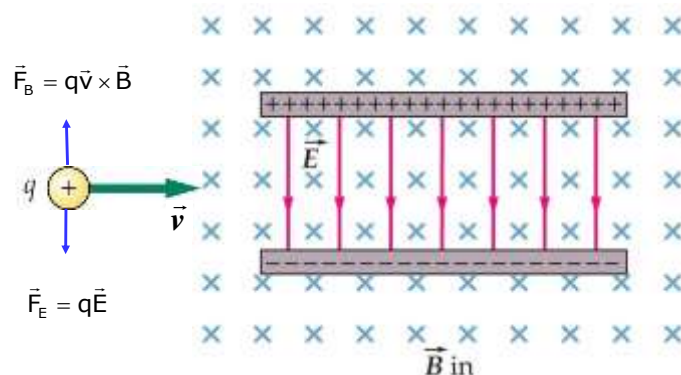
Se o circuito rodar, o momento vai variando:

$M = I A B \sin \theta$

Electromagnetismo EE (2016/17)
Cap 6: Campo Magnético

6.3. Movimento de uma carga onde co-existem os campos magnéticos e eléctricos. Força de Lorentz

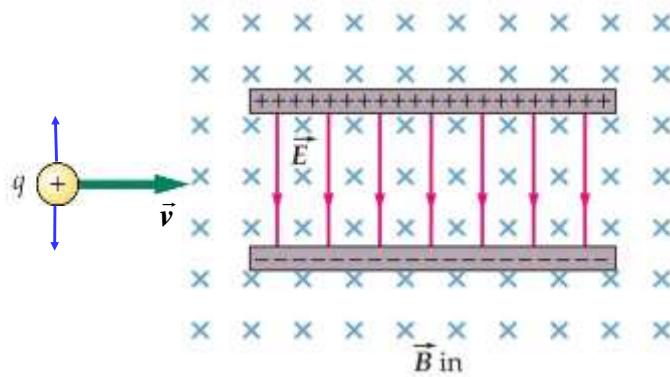
O que acontece a uma carga eléctrica animada de uma certa velocidade que entre na zona entre as placas do condensador?



Força de Lorentz

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

O que acontece se $F_E = F_B$?



\vec{E} e \vec{B} Podem ser escolhidos de modo a que $\vec{F} = \vec{0}$

As partículas com a velocidade adequada não são deflectidas, independentemente da sua carga ou da sua massa.

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