

Cap. 6 – Campo Magnético

A latitudes elevadas (norte ou sul) 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?

Convenção

Representação de grandeza com sentido para fora do plano

Representação de grandeza com sentido para dentro do plano

Rotação de 90°

Importante para este capítulo, e seguintes, o não ter dúvidas de como calcular o produto externo ou vetorial

$$\vec{V} = \vec{A} \times \vec{B}$$

$$-\vec{V} = \vec{B} \times \vec{A}$$

$$|\vec{A} \times \vec{B}| = AB \sin \theta$$

6.1. Introdução

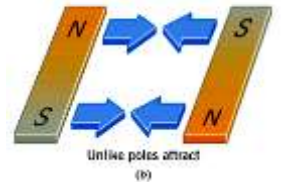
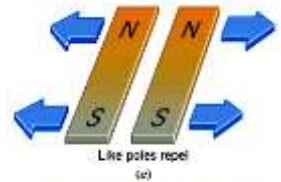
Qual a origem do magnetismo?



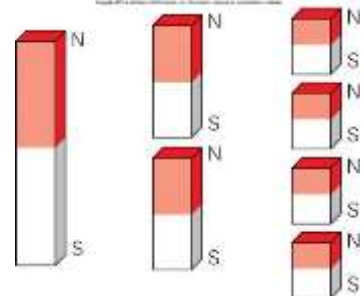
O termo magnetismo provém de magnetite (óxido de ferro natural - Fe_2O_3). De acordo com registros de 800 a 600 a.C., este mineral que atraía pedaços de ferro, foi encontrado pela primeira vez perto da cidade de Magnésia, na antiga Grécia. Hoje essa região faz parte da Turquia e chama-se Manisa.



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

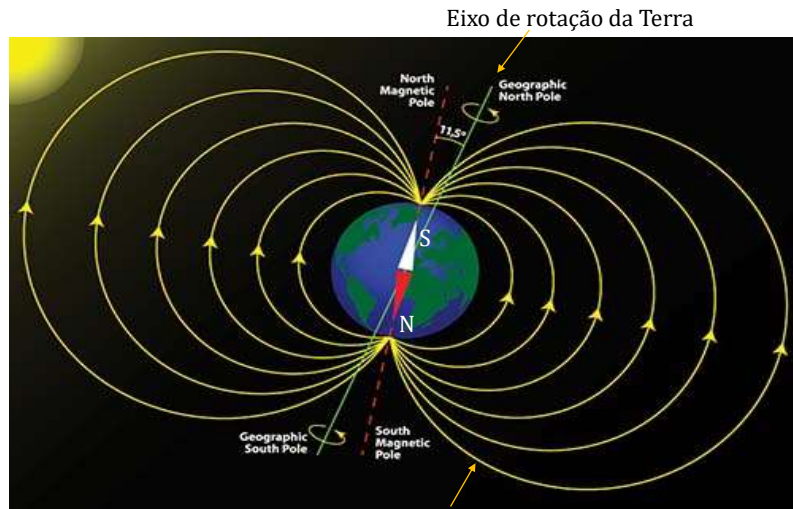


- Um ímã é um dipolo.
- Não há monopolos magnéticos.
- Se cortarmos um ímã a meio, obtemos sempre 2 dipolos.



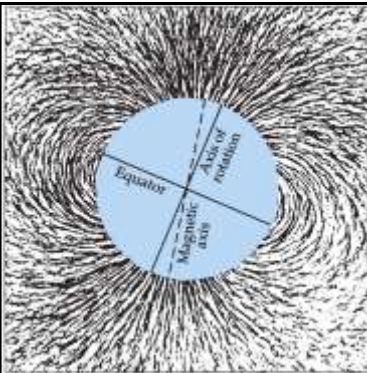


- William Gilbert publica "De Magnete" em 1600, que rapidamente se tornou na bíblia da eletricidade e magnetismo da Europa. Sugeriu que a própria Terra fosse um ímã permanente.

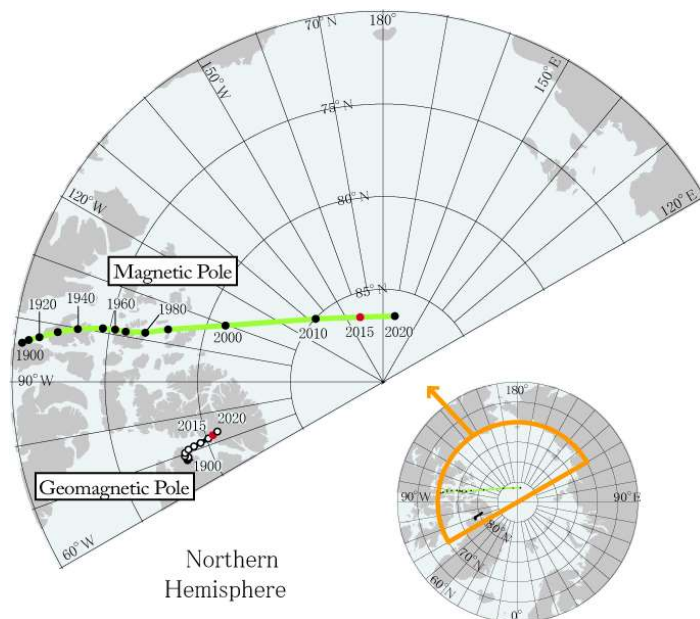


O Pólo Norte Magnético da Terra corresponde a um pólo sul magnético!

Linhas de campo magnético

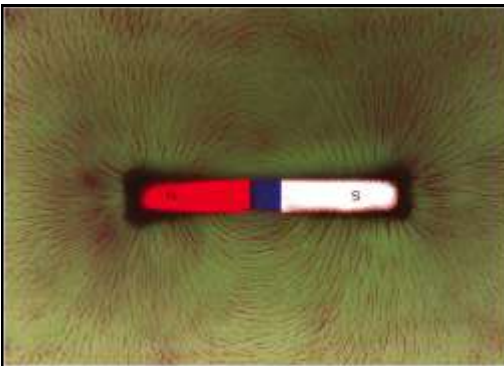
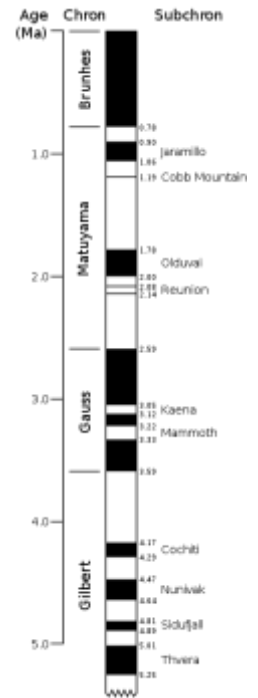


Os polos geográficos e magnéticos terrestres não coincidem e a sua posição relativa vai variando com o tempo.



O campo magnético terrestre periodicamente inverte-se. Esse fenómeno 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.



Linhas de campo magnético – tem sempre o sentido do polo norte para o polo sul

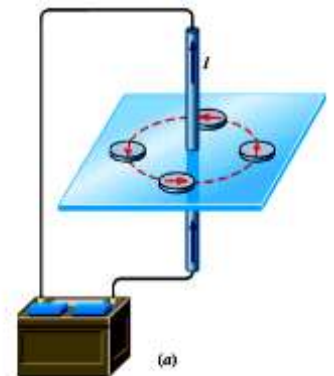


- John Michell publica "*A Treatise of Artificial Magnets*" (1750). Verifica que os pólos magnéticos exercem **forças atractivas ou repulsivas**, uns sobre os outros, e tais forças **variam com o inverso do quadrado da respectiva distância**.

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



Hans Christian Oersted
Danish physicist (1777–1851)

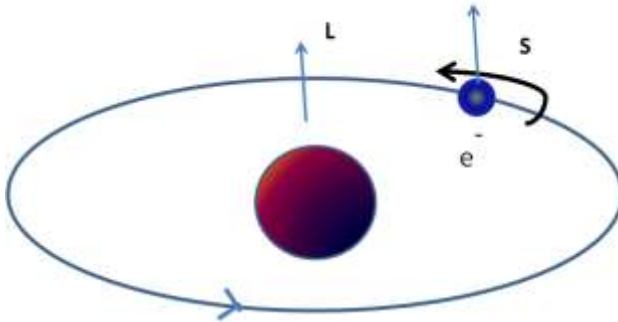


A experiência de Oersted constituiu o ponto de partida para as pesquisas que Ampère viria a realizar, durante as quais iria concluir que uma agulha magnética podia ser usada como um instrumento para detectar uma corrente eléctrica (invenção do galvanómetro). Descobre a causa do magnetismo. **Sabem qual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



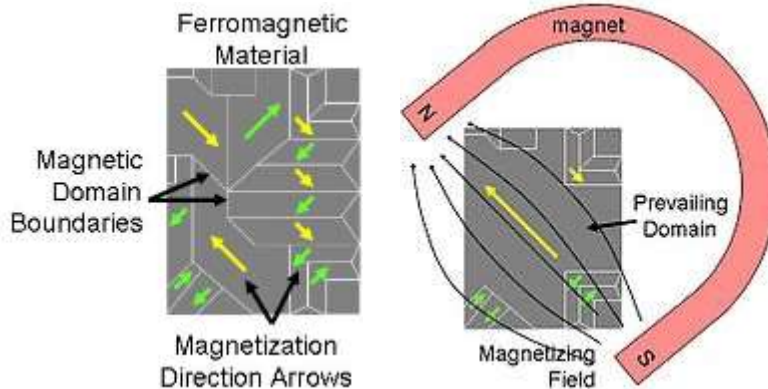
André Marie Ampère,
(1775-1836)

Porque é que há materiais que apresentam estas propriedades?



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



Michael Faraday
(1791-1867)

1820, Faraday verifica que 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.

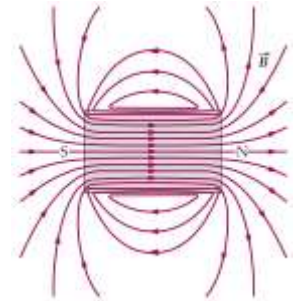


- 1873, J.C. Maxwell enuncia as **Leis do Electromagnetismo**.
- 1888, Heinrich Hertz: **ondas electromagnéticas** no laboratório.
Verificação das previsões de Maxwell.

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 (fora do magnete) e são linhas fechadas

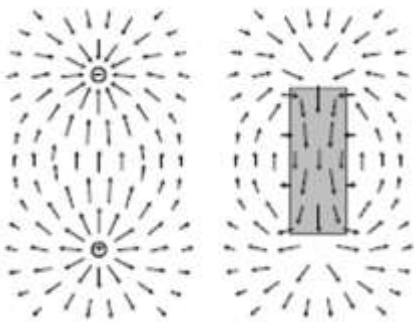


Os vetores \vec{B} são tangentes às linhas de campo é tangente, em cada ponto.

Carga -

Vetores
campo
elétrico

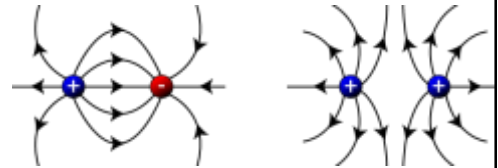
Carga +



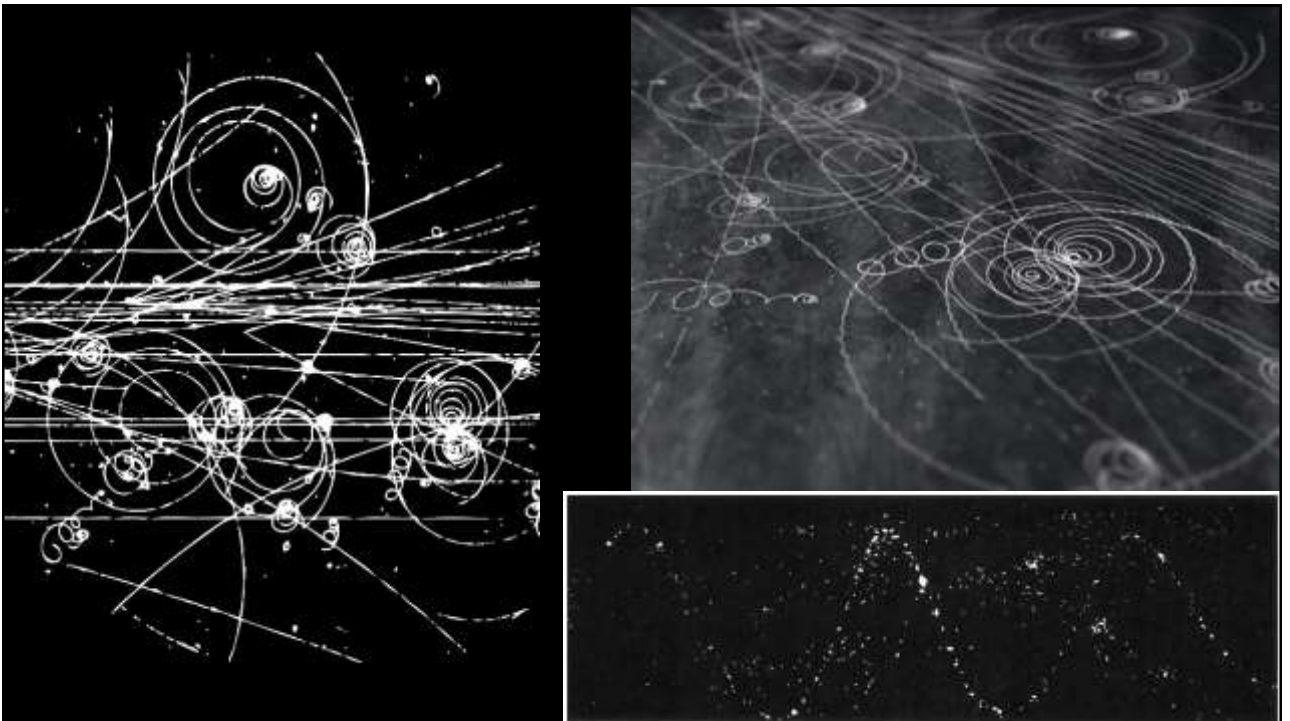
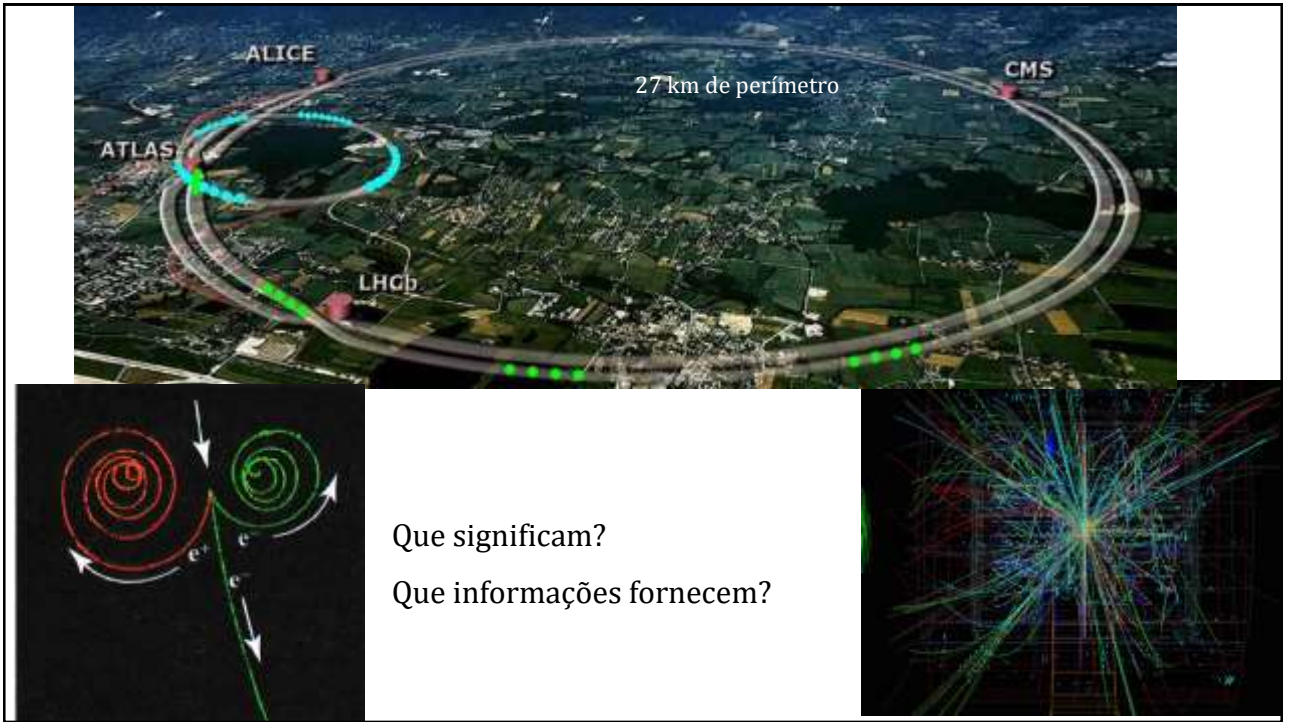
Polo Sul

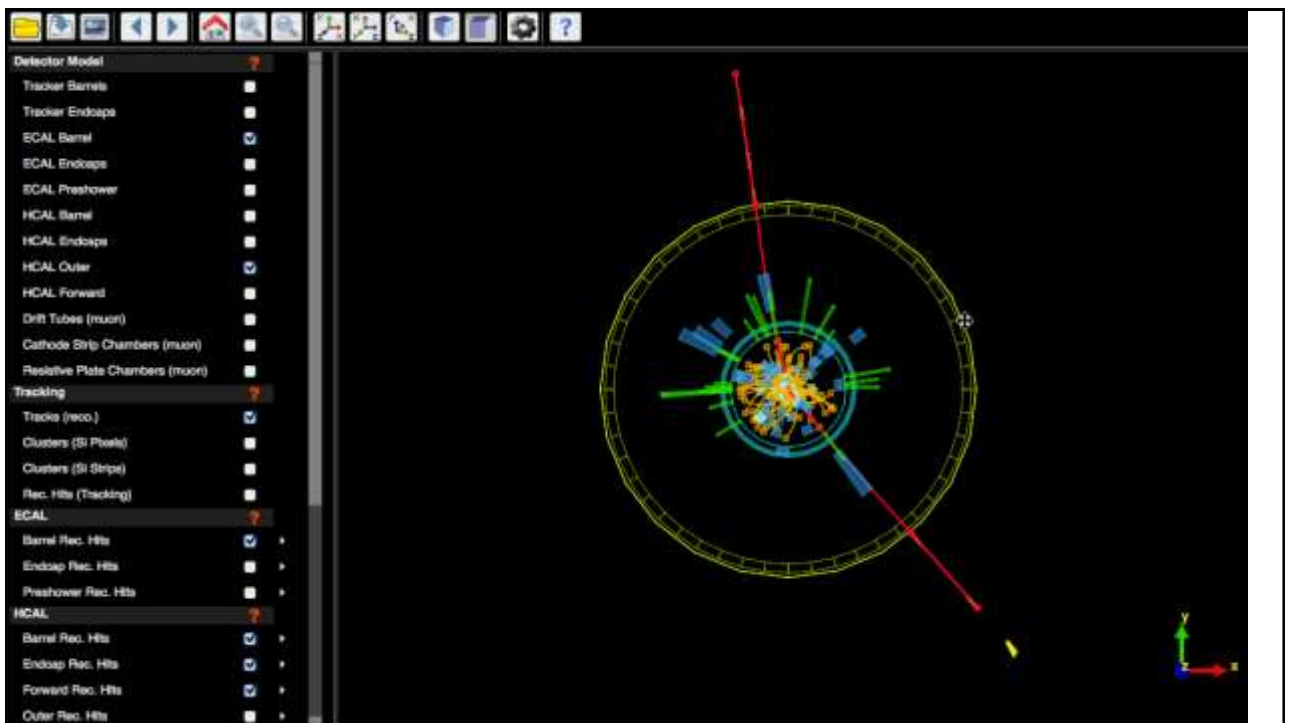
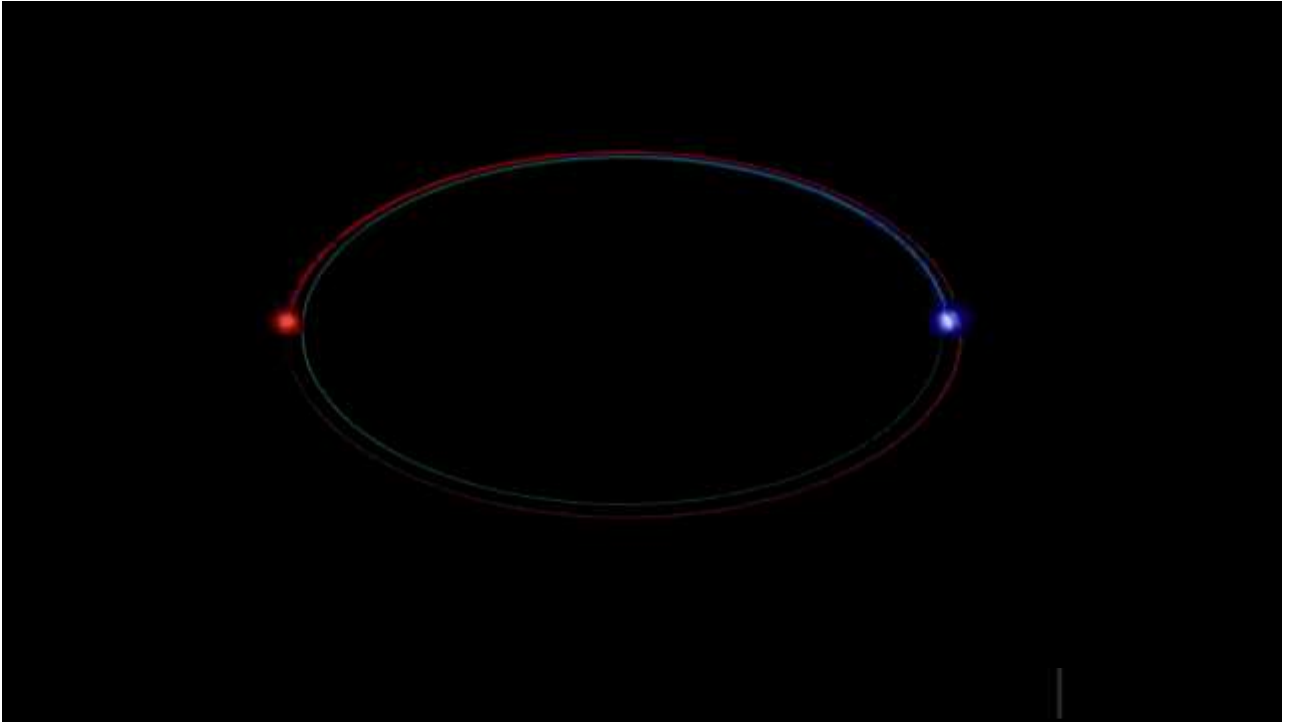
Vetores
campo
magnético

Polo Norte



As linhas de campo elétrico não são fechadas e têm sentido de cargas + para cargas -.





Verificações sobre a influência do campo magnético sobre as cargas elétricas

Caso 1: cargas positivas ou negativas com massa diferente, estão em repouso ou entram no campo magnético com \vec{v} paralela ou anti-paralela a \vec{B} .

Observações:

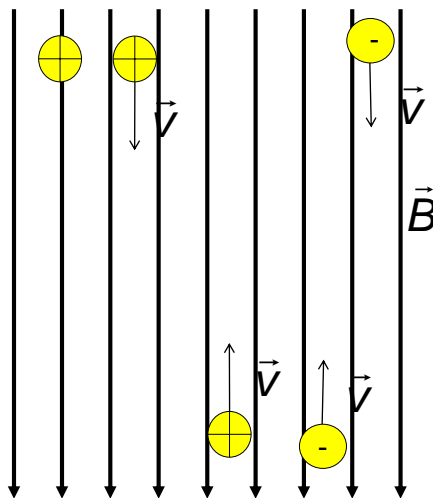
Verifica-se que cargas mantêm a velocidade (módulo direção e sentido).

Portanto se uma carga elétrica se mover com a mesma direção do campo (paralela ou antiparalela), não sentem o efeito do campo magnético.

$$\begin{aligned} \vec{v} \Rightarrow \vec{B} \\ \vec{v} \Leftarrow \vec{B} \end{aligned} \Rightarrow F_B = 0$$

Verifica-se também que uma partícula carregada não sofre efeito do campo magnético se estiver em repouso;

$$\vec{v} = \vec{0} \Rightarrow F_B = 0$$



2ª caso: 3 cargas positivas de massa igual entram com \vec{v} perpendicular a \vec{B} .

As velocidades com que entram no campo magnético são iguais, mas as cargas diferentes $q_1 > q_2 > q_3$. A relação entre as cargas é: $q_1 = 2q_2$ $q_1 = 3q_3$

Observações: $r_1 < r_2 < r_3$ $r_2 = 2r_1$ $r_3 = 3r_1$

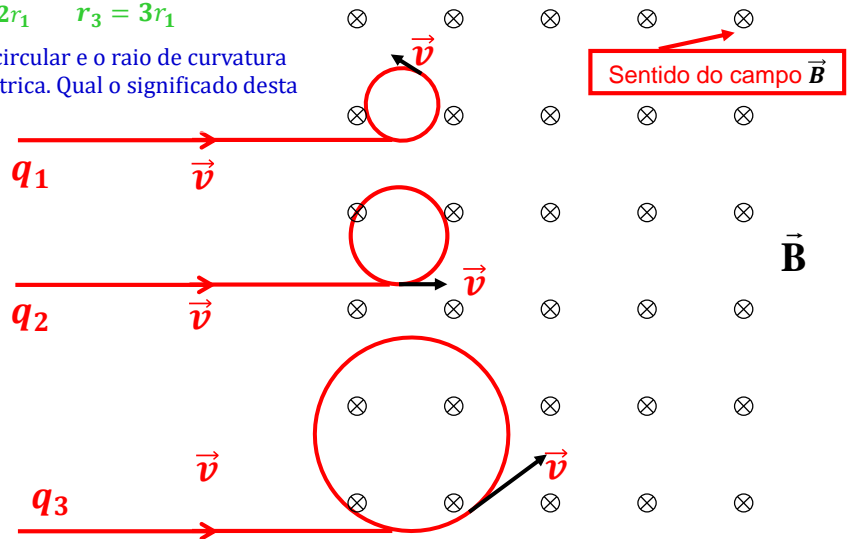
As partículas passam a ter movimento circular e o raio de curvatura aumenta com a diminuição da carga elétrica. Qual o significado desta observação?

a) Há uma força centrípeta ($m \frac{v^2}{r}$), a que chamaremos força magnética, que é perpendicular à velocidade e ao campo:

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

b) $r_1 < r_2 < r_3 \Rightarrow F_1 > F_2 > F_3$ – A magnitude da força é inversamente proporcional ao raio de curvatura \Rightarrow magnitude da força é diretamente proporcional ao valor da carga.

$$r \propto \frac{1}{q} \quad F_B = m \frac{v^2}{r} \quad F_B \propto q$$



3º Caso: 3 cargas positivas iguais (q), com massa igual, entram com \vec{v} perpendicular a \vec{B} .

As relações entre velocidades com que entram no campo magnético são: $v_1 < v_2 < v_3$ $v_2 = 2v_1$ $v_3 = 3v_1$

Observações: $r_1 < r_2 < r_3$ $r_2 = 2r_1$ $r_3 = 3r_1$

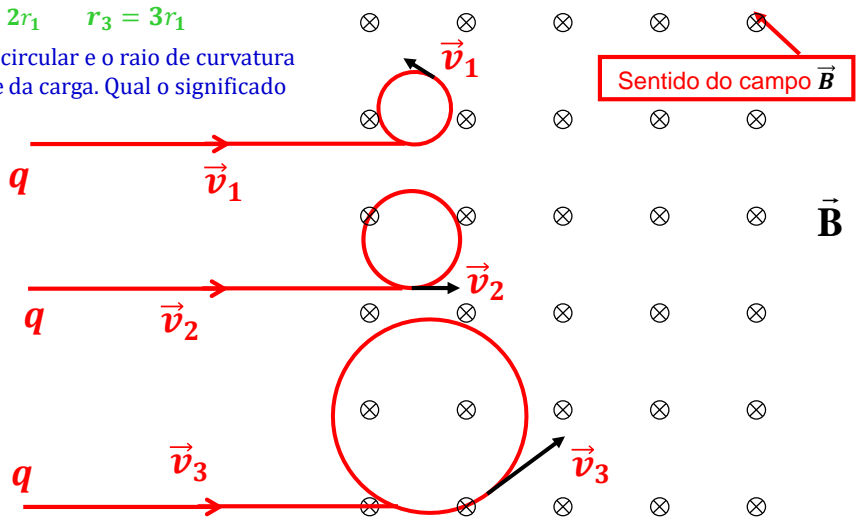
As partículas passam a ter movimento circular e o raio de curvatura aumenta com o aumento da velocidade da carga. Qual o significado desta observação?

a) Há uma força centrípeta ($m \frac{v^2}{r}$) (normal) que é perpendicular à velocidade e ao campo:

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

b) $r_1 < r_2 < r_3 \Rightarrow F_1 > F_2 > F_3$ – A magnitude da força é inversamente proporcional ao raio de curvatura \Rightarrow magnitude da força é diretamente proporcional ao valor da velocidade.

$$r \propto v \quad F_B = m \frac{v^2}{r} \quad F_B \propto v$$



4º Caso: 2 cargas de massa igual, uma positivas ($q_1 > 0$) e outra negativa ($q_2 < 0$), de módulo igual ($|q_1| = |q_2|$), entram com \vec{v} igual e perpendicular a \vec{B} .

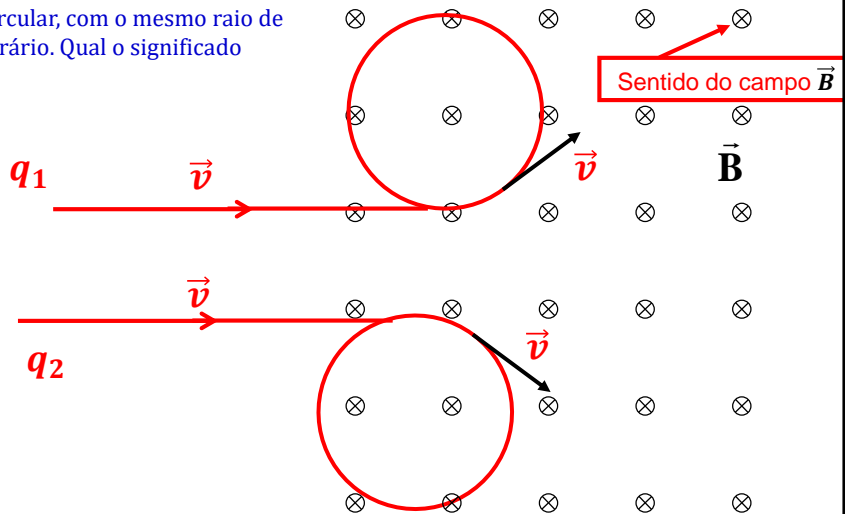
Observações:

As partículas passam a ter movimento circular, com o mesmo raio de curvatura, mas o sentido de rotação contrário. Qual o significado desta observação?

a) Há uma força centrípeta ($m \frac{v^2}{r}$) (normal) que é perpendicular à velocidade e ao campo:

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

b) Se as cargas têm sinal contrário a força magnética tem sentido oposto..



5º Caso 3 cargas positivas iguais entram com \vec{v} perpendicular a \vec{B} .

As velocidades com que entram no campo magnético são iguais, mas a relação entre as massas é: $m_1 < m_2 < m_3$ $m_2 = 2m_1$ $m_3 = 3m_1$

Observações:

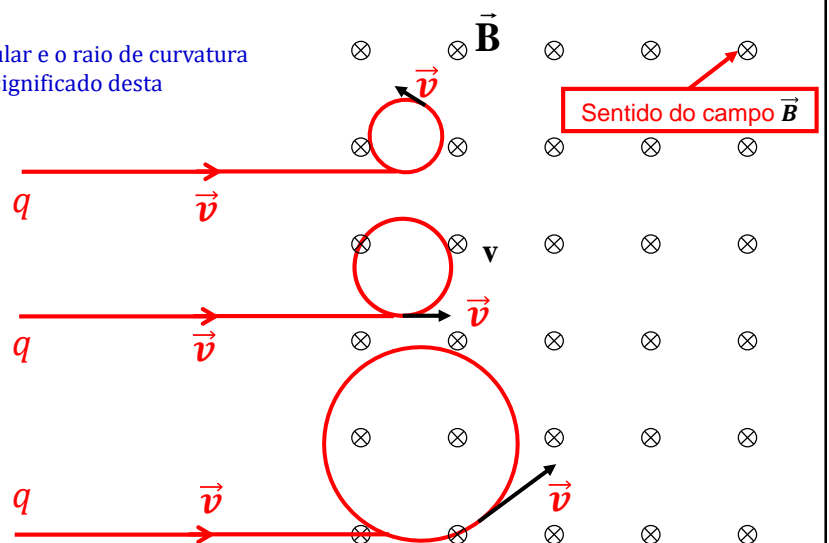
As partículas passam a ter movimento circular e o raio de curvatura aumenta com o aumento da massa. Qual o significado desta observação?

a) Há uma força centrípeta ($m \frac{v^2}{r}$) (normal) que é perpendicular à velocidade e ao campo:

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

b) $r_1 < r_2 < r_3 \Rightarrow F_1 > F_2 > F_3$ - A magnitude da força é inversamente proporcional ao raio de curvatura \Rightarrow magnitude da força é diretamente proporcional ao valor da massa.

$$r \propto m \quad F_B = m \frac{v^2}{r}$$

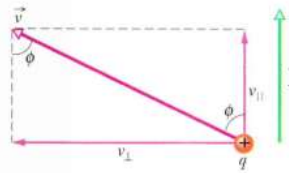
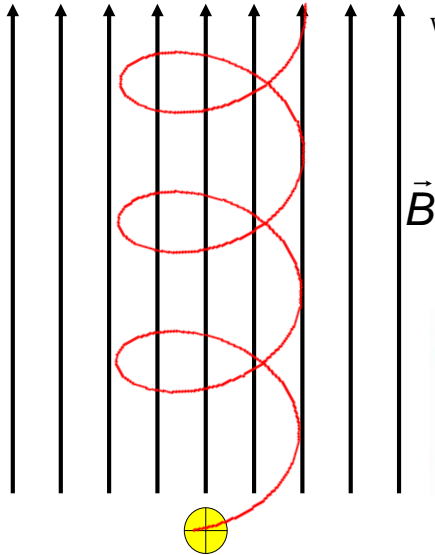


Verifica-se que se uma partícula carregada entrar num campo magnético uniforme com uma direção que faça um determinado ângulo, diferente de 0° e de 90° , com a direção do campo magnético, as trajetórias são helicoidais.

Verifica-se também que o raio da trajetória hélice é

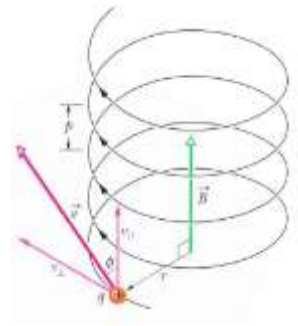
- Proporcional a $|v|$ e m
- Inversamente proporcional a q
- Inversamente proporcional a B

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



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

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



Como se podem explicar estes comportamentos?

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

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

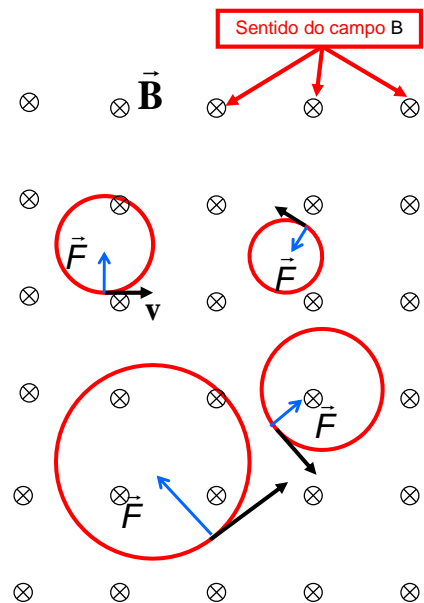
–Viu-se experimentalmente que: $r \propto \frac{mv}{qB}$

Então: $F \propto m \frac{v^2 q B}{mv}$ $F \propto v q B$

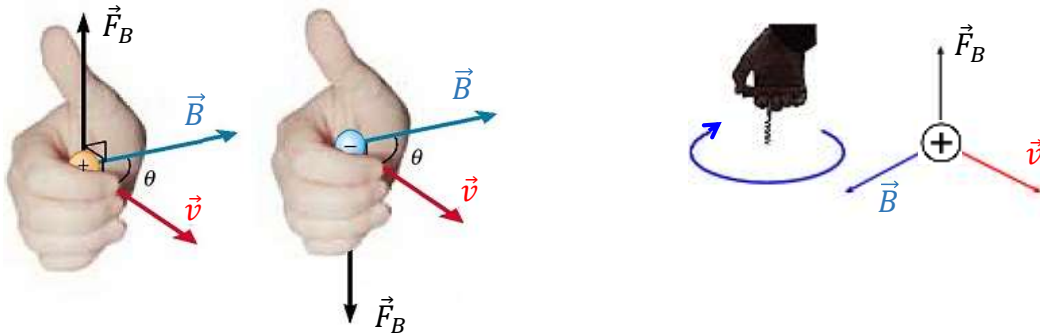
Mas viu-se também que: $\vec{F}_B \perp \vec{v}$ $\vec{F}_B \perp \vec{B}$

Juntando todos as observações pode-se escrever a seguinte lei:

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

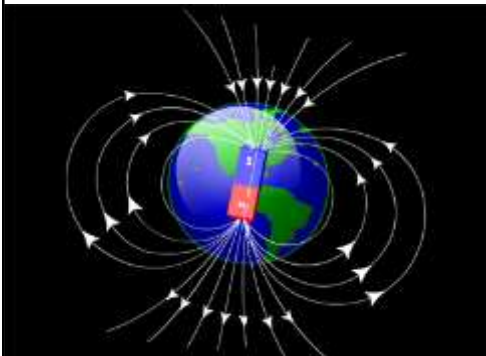
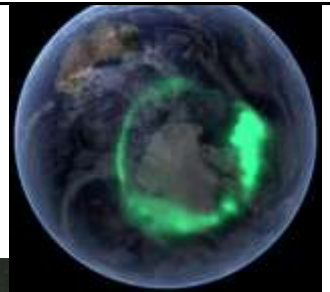
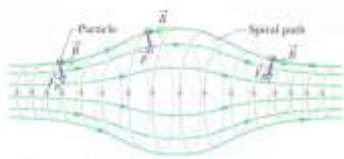


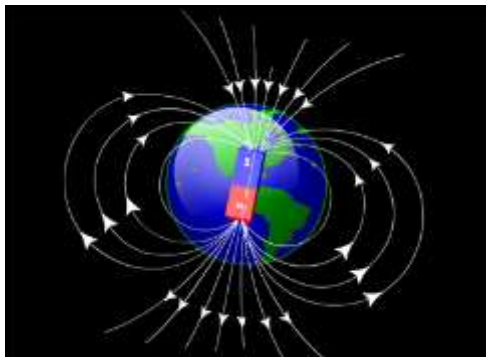
$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$



se B é não uniforme?

Uma partícula que evolui num campo magnético pode ficar “aprisionada”.



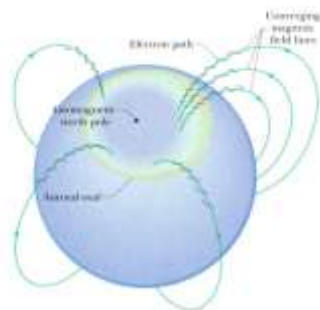
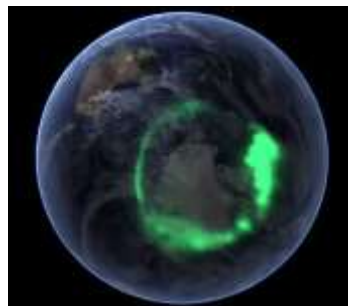


Cinturas de radiação de Van Allen

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.

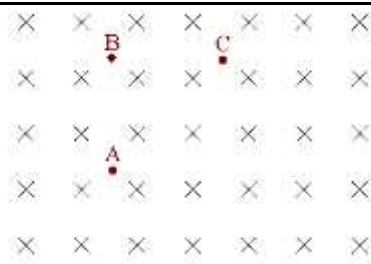
Aurora Australis captured by NASA's IMAGE satellite and overlaid onto NASA's satellite-based Blue Marble image



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?



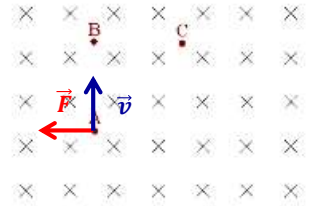
- a) Direita b) Esquerda c) Interior do ecrã
d) Exterior do ecrã **e) Zero** f) Cima g) baixo

A força magnética é:

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

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:

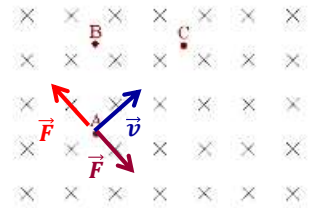
- a) Direita **b) Esquerda** c) Interior do ecrã
d) Exterior do ecrã e) Zero f) Cima g) baixo

A Força Magnética é

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

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 negativa com velocidade no sentido de A para C. Qual o sentido da **força magnética**?

A Força Magnética é

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

Checkpoint

Calcule a força magnética que atua sobre um próton que se move com $\vec{v} = 4.46 \times 10^6 \hat{i} \text{ m/s}$, numa região em que existe um campo magnético $\vec{B} = 1.5 \hat{k} \text{ T}$.

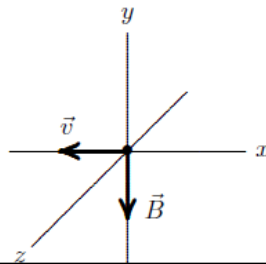


Regra da mão direita: sentido?

Módulo: $F = qvB \sin \theta$

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

Um elétron tem uma velocidade de módulo $v = 10^6 \text{ m/s}$, numa região onde existe um campo magnético $B = 1 \text{ T}$. Calcule a força magnética a que o elétron está sujeito.



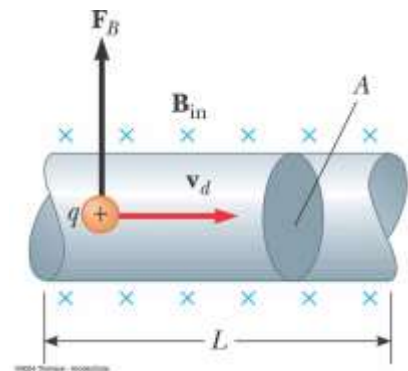
Se a velocidade e o campo magnético se mantiverem constantes, descreva o movimento do elétron.

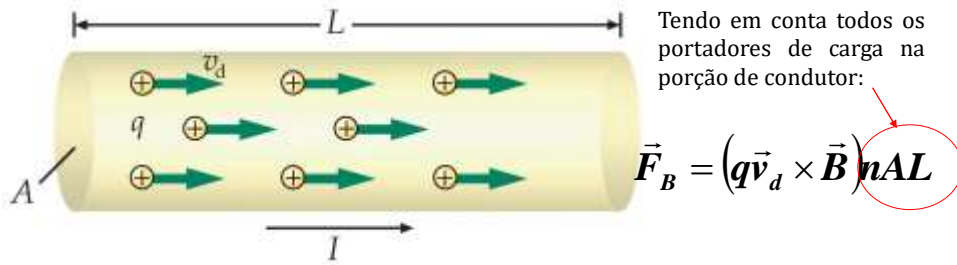
Força magnética que actua num condutor com uma corrente I

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

- Cada carga individualmente sente uma força magnética.

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





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

Sabendo que:

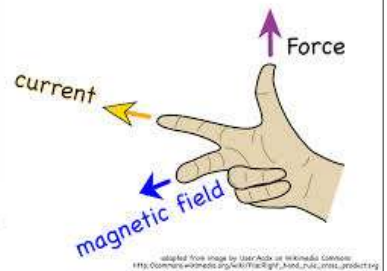
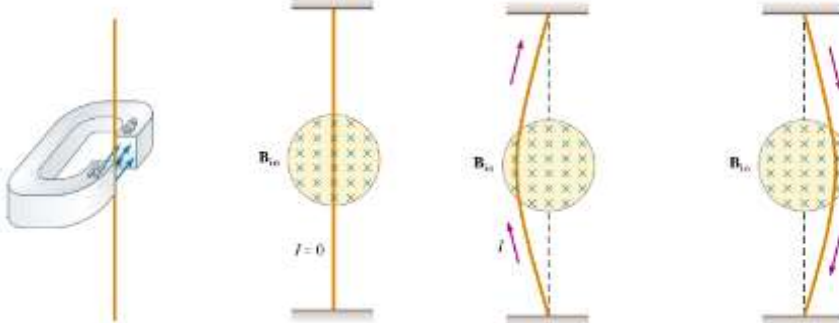
$$I = n q v_d A$$

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

Lei de Laplace

Consequências de

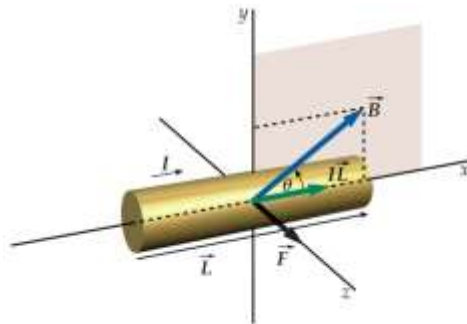
$$\vec{F} = I \vec{L} \times \vec{B}$$



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

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

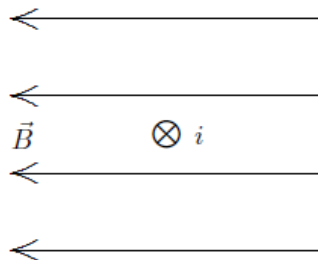
Quando I tem sentido descendente, o fio desvia-se para a direita



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

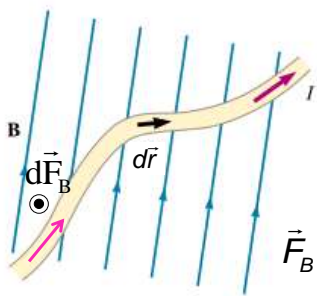
$$\vec{F}_B = I\vec{L} \times \vec{B} \quad \rightarrow \quad F_B = I L B \sin\theta$$

A figura mostra a secção de um condutor retilíneo, percorrido por uma corrente elétrica $I = 1 \text{ A}$, numa região onde existe um campo magnético $B = 1 \text{ T}$. Calcule a força magnética por unidade de comprimento a que o condutor está sujeito.



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 dr do fio.

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

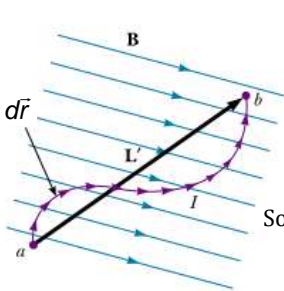
$$\vec{F}_B = \int_a^b I d\vec{r} \times \vec{B} \Rightarrow \vec{F}_B = I \int_a^b d\vec{r} \times \vec{B}$$

\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

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

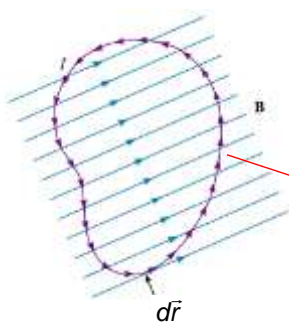


$$\vec{F}_B = \int_a^b I d\vec{r} \times \vec{B} \Rightarrow \vec{F}_B = I \int_a^b d\vec{r} \times \vec{B}$$

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

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

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**?



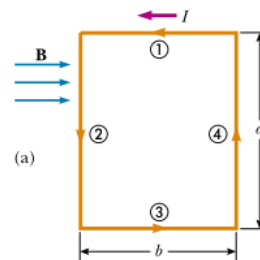
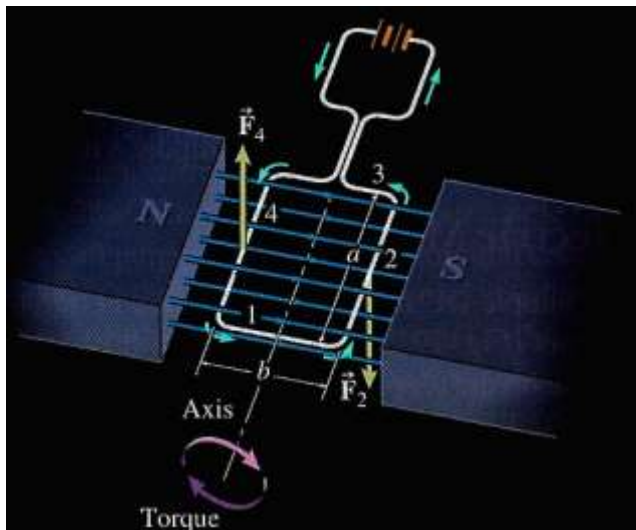
$$\vec{F}_B = I \oint d\vec{r} \times \vec{B}$$

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.

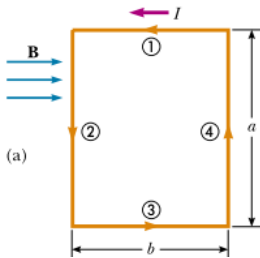
Espira de Corrente num Campo Magnético Uniforme



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

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

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

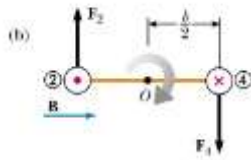


Campo eléctrico é uniforme no plano da espira

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

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

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



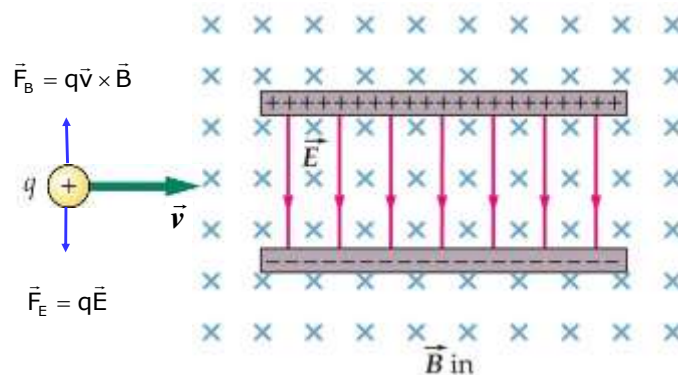
$$F_1 = F_2 = I a B$$

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>

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

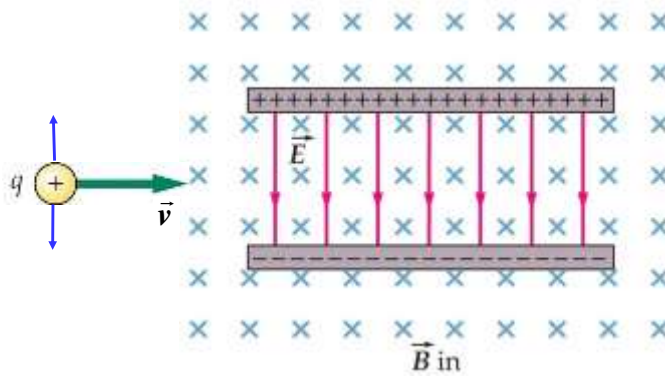
O que acontece a uma carga eléctrica animada de uma certa velocidade que entre na zona entre as placas do condensador?



Força de Lorentz

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

O que acontece se sob a mesma geometria e direções de Campo elétrico e magnético, $F_E = F_B$?



\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.

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