TEMA 3: INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

1- MAGNETISMO E IMÁNS.

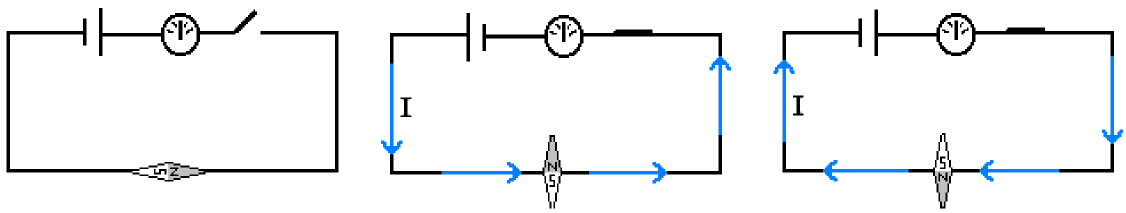
A *magnetita* ($FeO.Fe_2O_3$), unha pedra que procedia dunha zona de Grecia (Magnesia) e que tiña a extrana propiedade de atraer pequenos anacos de Ferro xa era coñecida dende hai máis de 2000 anos. Os materiais que teñen esta propiedade de xeito natural chámanse *imans naturais* e esta propiedade recibe o nome de **magnetismo**.
As substancias que, como o Fe, Co, Ni,..ou as súas aliaxes, son atraídas pola magnetita, poden converterse en imáns se se fregan repetidas veces coa magnetita. O seu poder magnético dura moito tempo e coñécense como *imáns artificiais permanentes*.
Tamén existen outros métodos de imantación: por contacto, por influencia e por corrente eléctrica.
Os chineses xa coñecían o **compás** (que consiste nunha agulla imantada) moitos anos antes de que fose coñecido en Europa. Cara o ano 1269, Pierre Maricourt obsevou que os imáns sempre se orientaban do mesmo xeito, cunha punta para o norte e outra punta para o sur. Deste xeito, nun imán sempre imos ter dous polos: **Norte** e **Sur** . O polo norte é o que se orienta cara o norte xeográfico e polo sur é o que se orienta cara o Sur. Considérase entón que a Terra é un gran imán natural. Experimentalmente compróbase que:

- Cando interaccionan dous imáns estes atráense se se enfrontan polos de distinto signo e repélense se se enfrontan polos do mesmo signo.
- Cando rompemos un imán pola metade obtemos dous novos imáns máis pequenos, cada un cos seus polos. *É imposible separar os polos magnéticos dun imán. Sempre se presentan por parellas.*

Na actualidade, as aplicacións do magnetismo son moi importantes: almacenamento de información en discos magnéticos, xeración de campos magnéticos para acelerar partículas, etc.
O magnetismo é tamén fundamental no funcionamento de diversos dispositivos eléctricos e electrónicos com reles, bobinas, timbres, altofalantes, etc..

1.1- EXPERIENCIA DE OERSTED.

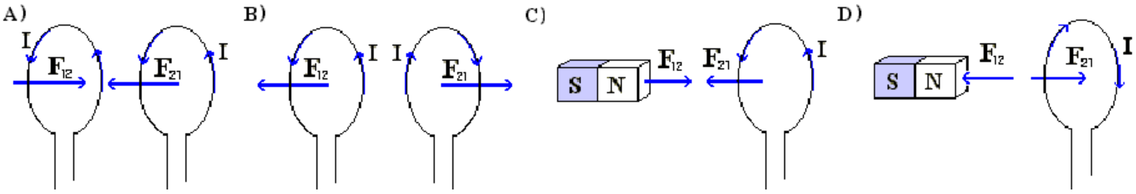
Ata o 1820 pensábase que os fenómenos eléctricos e os fenómenos magnéticos eran independentes. A 1ª experiencia que puxo de manifesto a interrelación entre estes dous fenómenos foi debida ao científico danés **Hans Christian Oersted**.
O seu experimento consistiu en que colocou un compás nas proximidades dun fío condutor polo que circulaba corrente continua e obsevou que a agulla se orientaba perpendicularmente ao fío. Ao cortar o paso da corrente esta volvía a súa posición normal. Se invertía o sentido da corrente, esta variaba a súa orientación N-S con respecto ao caso anterior.



O traballo de Oersted demostrou que o movemento de cargas eléctricas produce efectos magnéticos.
Experimentalmente podemos observar outra serie de fenómenos que poñen de manifesto a afirmación anterior:

- Cando temos dous fíos paralelos polos que circulan intensidades grandes, establécense entre eles forzas de interacción que son *atractivas* se as correntes levan o mesmo sentido e *repulsivas* se teñen sentido contrario. Ao cesar o paso de corrente, as forzas deixan de actuar. Esta observación débese a *Ampère*.

- Entre dous condutores circulares (espiras) paralelos recorridos por corrente continua prodúcense forzas atractivas se o sentido da corrente é o mesmo e repulsivas se é o contrario.
- Entre unha espira pola que circula corrente continua e un imán permanente tamén se xeneran atraccións e repulsións (figuras C e D):



Ampère suxeriu en 1823 que o magnetismo natural era debido a pequenas correntes pechadas no interior da materia. Estas pequenas correntes non son máis que o movemento dos electróns no interior dos átomos. Un electrón que xira arredor do núcleo equivale a unha pequena corrente que produce os mesmos efectos que un pequeno imán. Os electróns tamén xiran sobre si mesmos (spin) producindo efectos magnéticos adicionais.
Logo podemos considerar a calquera material como un conxunto de pequenos imáns de tamaño atómico. Na meirande parte dos casos estes pequenos imáns están orientados ao chou e os seus efectos cancélanse pero nalgúns materiais, como ocorre coa magnetita, estan orientados no mesmo sentido polo que se suman os efectos de cada imán e temos un imán natural.

O campo magnético terrestre tamén é xenerado, principalmente, por correntes eléctricas debidas ao movemento de ions dos metais fundidos no interior da terra, no núcleo.

2- DEFINICIÓN DO CAMPO MAGNÉTICO: FORZA DE LORENTZ. APLICACIÓN

O campo magnético xenérase por imáns ou por cargas eléctricas en movemento. Podémolo definir entón como: "*perturbación que un imán ou unha corrente eléctrica producen no espazo que os rodea*" .

O campo magnético represéntase por $\vec{B}$.

Como sabemos, todo campo se representa polas liñas de campo. No caso do campo magnético, ao non existir polos illados, as liñas de campo son pechadas. Nacen no **Norte** e morren no **Sur**. **As liñas de campo non son a súa vez liñas de forza como sucedía nos campos gravitatorio e eléctrico xa que, como imos ver, non sinalan a dirección da forza magnética**. Imos estudar o campo magnético a partir dos efectos que produce sobre unha carga puntual.

2.1-FORZA DE LORENTZ

Cando situamos unha carga puntual nunha zona do espazo onde existe un campo magnético observamos que:

a) Se a carga está en repouso, non actúa nengunha forza sobre ela.

b) Se a carga está en movemento:
   - Existe unha dirección da velocidade na que non actúa nengunha forza sobre a carga eléctrica.
   - Nas outras dúas direccións de velocidade perpendiculares a anterior a forza sobre a carga é máxima.
   - A forza sempre é perpendicular a velocidade e o seu módulo é proporcional ao dela.
   - A forza tamén é proporcional o valor da carga eléctrica e cambia de sentido se cambia o signo da carga.

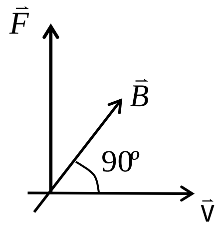
A relación matemática que explica todos estes feitos coñécese como **forza de Lorentz** xa que foi este físico un dos que estudou este tipo de forzas. A súa expresión é a seguinte:

$\boxed{\vec{F} = q\cdot(\vec{v}\times\vec{B})}$. Facendo o producto vectorial temos: $\vec{F} = q\cdot v\cdot B\cdot sen\alpha\cdot\vec{u}_n$

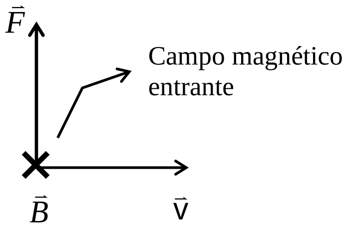
O módulo de F será $\boxed{F = |q| \cdot \text{v} \cdot B \cdot sen\alpha}$. (a carga en valor absoluto neste caso). Cando $\vec{\text{v}}$ *e* $\vec{B}$ son perpendiculares entón F é máxima e temos: $\boxed{F_{\max} = |q| \cdot \text{v} \cdot B}$

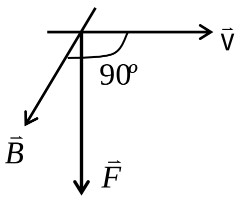
Podemos definir o módulo do campo magnético a partires desta expresión. Logo: $\boxed{B = \dfrac{F_{\max}}{|q| \cdot \text{v}}}$

<u>Casos</u>:

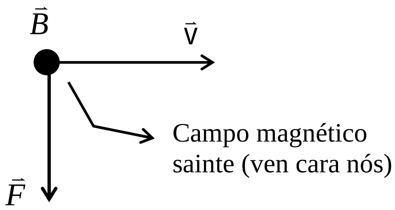


Represéntase así:





Represéntase así:



O campo magnético tamén se coñece como <u>*inducción magnética*</u> e a unidade S.I é o Tesla (**T**).

$$1T = 1\frac{N \cdot s}{C \cdot m} = 1\frac{N}{A \cdot m}$$. Outra unidade de uso común é o Gauss: 1 G = 10^{-4} T

Valores dalguns campos magnéticos:	
Campo terrestre	10^{-5} T
Imán permanente	10^{-2} T
Electroimán	2 T
Estrela de neutróns	10^{9} T

Se comparamos o campo eléctrico e o magnético observamos que mentres unha carga eléctrica sempre interacciona con un campo eléctrico, <u>para que unha carga eléctrica interaccione con un campo magnético debe poseer unha velocidade e unha orientación axeitada</u>.

***** Se temos unha carga que se move por unha zona do espazo na que existe un campo magnético e un campo eléctrico, ademais da forza magnética debemos considerar tamén a forza eléctrica, polo que a expresión xeral da **forza de Lorentz** será:

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

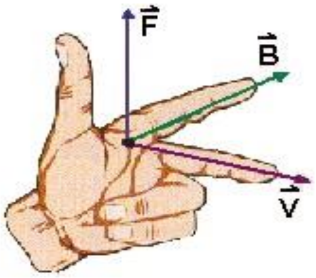
PROBLEMA

1- Un protón penetra nun campo magnético uniforme $\vec{B} = -0{,}2\vec{k}\ (T)$ cunha velocidade $\vec{\text{v}} = 3 \cdot 10^{7}\ \vec{i}\ (m/s)$. Calcula:

a) vector forza magnética e módulo que actúa sobre o protón.
b) radio da órbita que describe se o protón queda atrapado no campo magnético.

Datos: masa p^{+} =1,67.10^{-27} Kg, q protón = 1,6.10^{-19} C.

Para saber o sentido da forza magnética sobre unha **carga positiva** en movemento aplícase a regra da man esquerda:



Poñendo a man como se mostra, o dedo *índice* indícanos o sentido do campo magnético, o *corazón* indícanos o sentido do vector velocidade da partícula e o *pulgar* o sentido da forza magnética resultante. Se a carga é negativa, o sentido da forza magnética será o contrario o indicado polo pulgar.

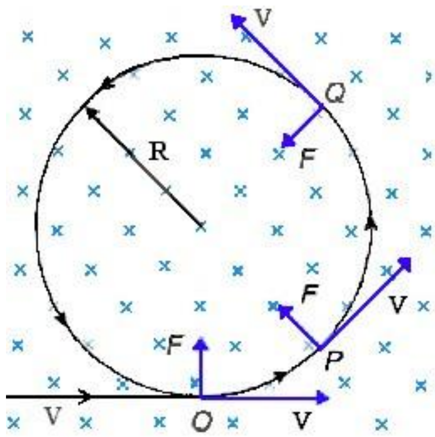
Sabemos que cando unha carga penetra nun campo magnético con dirección perpendicular, a forza magnética que se exerce sobre ela é máxima. Se a zona de campo magnético é grande, a carga pode quedar atrapada no campo magnético describindo unha traxectoria circular tal como se pode apreciar na seguinte figura:

Como podemos ver, a carga non sofre variación no módulo da velocidade ao ser esta perpendicular a forza magnética. Aplicando a 2ª lei da Dinámica temos:

$$-F_{mag}\cdot\vec{u}_r = -m\cdot a_n\cdot\vec{u}_r \Rightarrow F_{mag} = m\cdot a_n$$

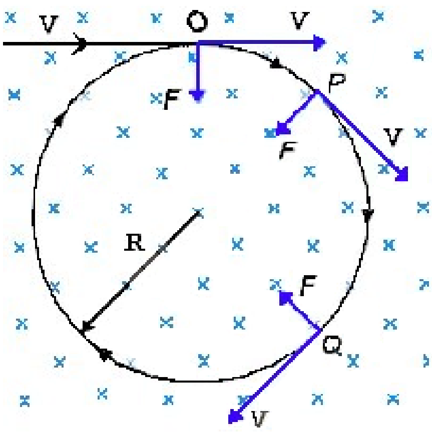
$$|q|\cdot v\cdot B\cdot sen\,90^{o} = m\cdot\frac{v^2}{R};\quad |q|\cdot v\cdot B = m\cdot\frac{v^2}{R} \Rightarrow$$

$$Despexando R\ quédanos:\ R = \frac{m\cdot v}{|q|\cdot B}$$



Podemos comprobar como **a forza magnética non realiza traballo** pois sempre é perpendicular ao desprazamento.

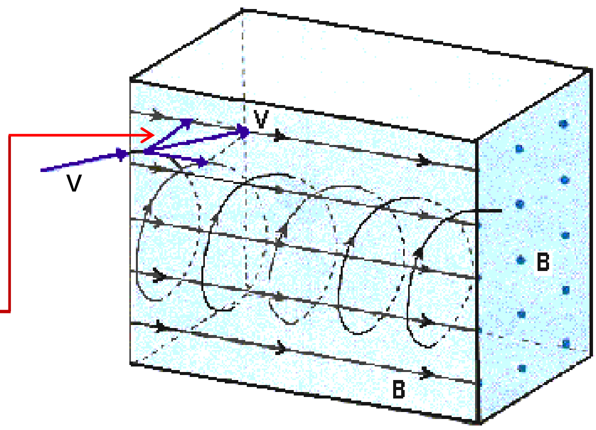
Se a carga fose negativa, o tratamento matemático sería exactamente igual. O único que cambiaría sería o sentido de xiro da carga no campo magnético tal como se aprecia no gráfico seguinte:



Cando a carga penetra no campo magnético cunha velocidade que non é perpendicular ao campo magnético, a velocidade vai ter dúas compoñentes:

Unha ***paralela*** ao campo magnético e outra ***perpendicular*** a este. A compoñente perpendicular é a que vai experimentar a interacción co campo magnético (igual que no caso anterior) e a compoñente paralela non vai experimentar variación ningunha, de tal xeito que o movemento resultante é un movemento helicoidal e a partícula pode escapar do campo magnético. Podémolo ver na seguinte figura:

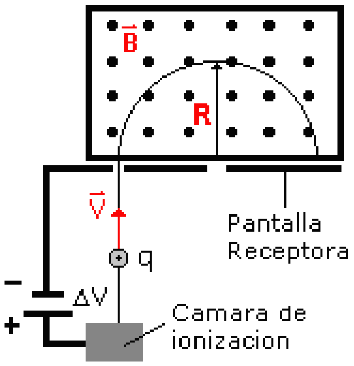
A patícula describirá un movemento en tres dimensións. Para calcular o radio da órbita hai que empregar a compoñente vertical da velocidade respecto da dirección do campo !!



Hai moitas aplicacións da forza que exerce un campo magnético sobre cargas móbiles tales como os tubos de raios catódicos nos televisores antiguos, etc. Nos imos ver dous exemplos que son representativos: o *espectrómetro de masas* e o *ciclotrón* ou acelerador de partículas.

2.2.1- ESPECTRÓMETRO DE MASAS

Emprégase para medir masas de ións (normalmente com carga positiva) e determinar a existencia de isótopos. O seu esquema é o seguinte:
Na cámara de ionización prodúcense os ions con carga positiva que despois son acelerados cara o campo magnético debido á diferenza de potencial ΔV á que se ven sometidos.



O único traballo que se realiza sobre os ions é o traballo eléctrico que, como sabemos, é (en valor absoluto): $W = q \cdot \Delta V$ (o dato de ΔV sempre se vai a dar positivo)
Este traballo(neto) emprégase en comunicar enerxía cinética aos ions cargados. Logo: $W = \Delta E_c$; $|q| \cdot \Delta V = \frac{1}{2} m \cdot v^2 - 0 \Rightarrow$

$v^2 = \frac{2 \cdot |q| \cdot \Delta V}{m}$; $\boxed{v = \sqrt{\frac{2 \cdot |q| \cdot \Delta V}{m}}}$ Esta é a expresión da velocidade coa que os ions chegan ao campo magnético uniforme $\vec{B}$.

Unha vez dentro do campo magnético, os ions van a describir un radio que ven dado pola expresión: $\boxed{R = \frac{m v}{|q| . B}}$. O valor deste radio mídese directamente facendo incidir os ions sobre unha pantalla ou unha película fotográfica despois de que percorran media circunferencia. Coñecido o radio podemos calcular a relación $\frac{m}{|q|}$ despexando da anterior expresión.

$\frac{m}{|q|} = \frac{R\,B}{v}$, Substituindo a expresión da velocidade obtida máis arriba e operando:

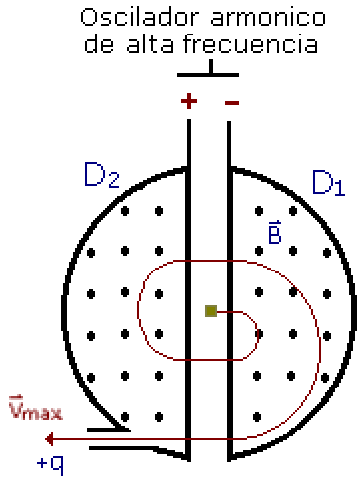
$$\frac{m}{|q|} = \frac{RB}{\sqrt{\frac{2q\Delta V}{m}}} \; ; \quad \frac{m^2}{q^2} = \frac{R^2B^2}{\frac{2q\Delta V}{m}} = \frac{mR^2B^2}{q2\Delta V} \Rightarrow \textit{simplificando m e q}: \boxed{\frac{m}{|q|} = \frac{R^2B^2}{2\Delta V}}$$

"A relación $\frac{m}{|q|}$ só depende de magnitudes coñecidas ou que podemos medir"

2.2.2- CICLOTRÓN

O ciclotrón permite acelerar partículas cargadas ata acadar velocidades moi altas requeridas para reaccións nucleares, etc.
Básicamente consta de dous recipientes metálicos semicirculares **D_1** e **D_2** colocados perpendicularmente a un campo magnético uniforme $\mathbf{B}$. **D_1** e **D_2** están separados entre eles e mantéñense a unha diferenza de potencial **ΔV** que cambia de polaridade cada **T/2**. No centro do ciclotrón está situada a fonte de ions. Os ions procedentes da fonte móvense polo interior das Ds describindo semicircunferencias de radio cada vez maior e aumentando a súa velocidade en cada volta.

Vexamos o seu funcionamento:



$r = \frac{m\text{v}}{qB}$; O tempo que tardaría a carga en dar unha volta (Periodo) é: $T = \frac{2\pi\, r}{\text{v}} = \frac{2\pi}{\text{v}}\frac{m\text{v}}{qB} = \frac{2\pi\, m}{qB}$

A carga q introdúcese en **D₁** onde describe unha semicircunferencia nun periodo $\frac{T}{2}$. Ao sair de **D₁** a polaridade da diferencia de potencial cambia e a partícula sofre de novo unha aceleración polo que entra na placa **D₂** con maior velocidade e polo tanto describe un radio maior pero invertindo o mesmo tempo $\frac{T}{2}$ que no caso anterior. Cando sae de **D₂** a polaridade da diferenza de potencial cambia de novo e así sucesivamente ata que a partícula sae do acelerador.

Para que a partícula sexa acelerada no ciclotrón, a diferenza de potencial debe oscilar cunha frecuencia igual a frecuencia do movemento da partícula. Coñécese como ***frecuencia de resonacia do ciclotrón*** :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\frac{2\pi\, m}{qB}} = \frac{qB}{2\pi\, m} \Rightarrow \boxed{f = \frac{|q|\,B}{2\pi\, m}}$$

Cando a partícula sae do ciclotrón leva a velocidade máxima.

Nese instante é como se describise unha circunferencia de radio igual o radio das placas, logo: $\boxed{\text{v}_{\max} = \frac{|q|\; B\,R}{m}}$ Tamén se toma o radio da última volta.

PROBLEMAS

1- As placas dun ciclotrón estan colocadas nunha rexión do espazo onde existe un campo magnético uniforme de 0,3 T. A fonte de ions xenera protóns. Calcula:

a) frecuencia coa que ten que oscilar a polaridade da diferenza de potencial.
b) velocidade de saída do protón se o radio de saída da última volta é de 60 cm.
c) diferenza de potencial a que habería que someter o protón para que acadase esa mesma velocidade.

2- Na cámara de ionización dun espectrómetro de masas obtéñense ${}_1^2H^+$ (deuteróns). Estes ions aceléranse mediante unha diferenza de potencial de 1500 V e penetran nun campo magnético uniforme de 0,1 T perpendicular á velocidade dos ions. Calcula:

a) Velocidade coa que os ions penetran no campo magnético.
b) Radio da órbita circular que describen os ions no interior do campo magnético.

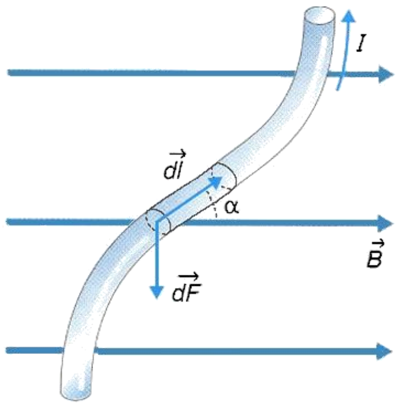
Solucións: v= $3{,}8.10^5$ m/s ; R=$7{,}9.10^{-2}$ m

3- Calcula a forza exercida sobre un fío conductor rectilíneo de 3,5 m de lonxitude percorrido por unha intensidade de 4 A e colocado perpendicularmente a un campo magnético uniforme de 2.10^{-2} T.

Solución: 0,28 N

3- FORZAS MAGNÉTICAS SOBRE CORRENTES ELÉCTRICAS.

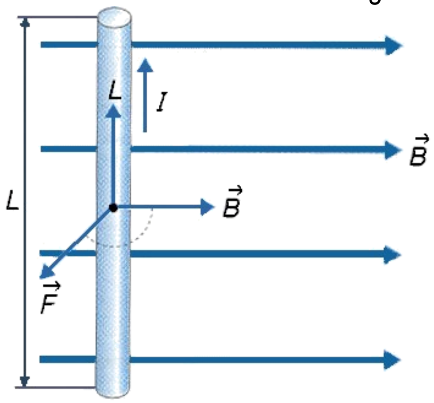
Anteriormente vimos como un campo magnético actúa sobre *cargas puntuais* en movemento polo que é de supoñer que tamén debe de actuar sobre correntes eléctricas (esto é, cundutores polos que está circulando unha corrente). A partir da lei de Lorentz imos deducir a expresión da forza que actúa sobre correntes eléctricas.



Supoñamos un condutor situado nun campo magnético. Como o condutor non está en equilibrio electrostático, as cargas móvense polo interior do condutor. Tomamos primeiro unha porción de condutor ($d\vec{l}$) que teña unha carga infinitesimal dq. Sobre esta carga infinitesimal vai actuar unha forza magnética infinitesimal $d\vec{F}$ pois a forza $\vec{F}$ vai ser a que actúe sobre todo o condutor.

Calculamos a forza infinitesimal aplicando a lei de Lorentz: $d\vec{F} = dq(\vec{v} \times \vec{B})$. Temos que ter en conta que polo condutor circula unha intensidade I que por definición é: $I = \dfrac{dq}{dt}$ polo que, podemos poñer $dq = I\,dt$. Ademais: $\vec{v} = \dfrac{d\vec{l}}{dt}$. Substituindo quédanos: $d\vec{F} = I\,dt\left(\dfrac{d\vec{l}}{dt} \times \vec{B}\right) = I\left(d\vec{l} \times \vec{B}\right)$ $\boxed{d\vec{F} = I\left(d\vec{l} \times \vec{B}\right)}$

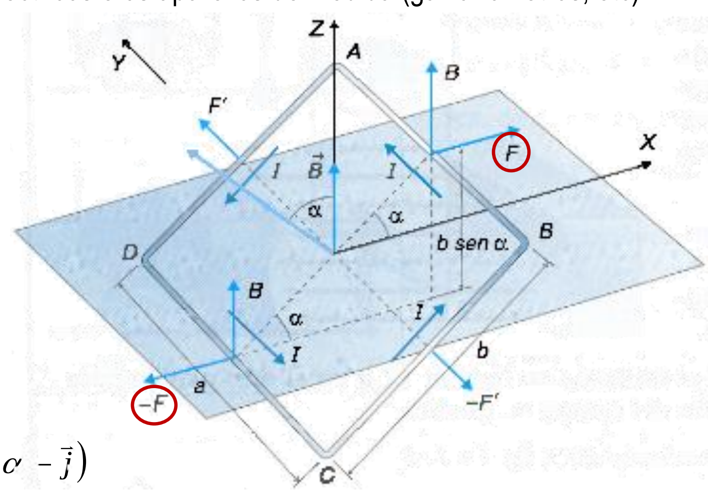
Se queremos calcular a forza ao longo de todo o condutor debemos de integrar a expresión anterior, pero no caso de que teñamos un condutor rectilíneo situado nun campo magnético uniforme non é necesario integrar e a expresión anterior transfórmase en: $\boxed{\vec{F} = I\left(\vec{l} \times \vec{B}\right)}$



sendo $\vec{l}$ un vector de <u>módulo</u>: a lonxitude do conductor, <u>dirección</u>: a deste e <u>sentido</u>: o da intensidade.

Imos ver agora as utilidades que ten a forza magnética sobre correntes eléctricas:

Cando temos unha espira recorrida por unha corrente de intensidade I, vaise producir nela un par de forzas que van a facer que rote. Neste fenómeno baséanse os motores eléctricos e os aparellos de medida (galvanómetros, etc)



Como podemos ver, a forza total sobre a espira é nula. Sen embargo, como o plano da espira está inclinado respecto ao plano formado por X,Y, **F** e **-F** producen un par de forzas que van dar lugar a unha rotación.

$$\vec{F}' = I\left(\vec{b} \times \vec{B}\right) = IbBsen(90+\alpha)\vec{u}_n$$

$$\vec{F}' = IbB\cos\alpha\ \vec{j}$$

$$-\vec{F}' = IbBsen(90-\alpha)\vec{u}_n = IbB\cos\alpha\ (-\vec{j})$$

$$\vec{F} = IaBsen\,90\vec{u}_n = IaB\,\vec{i}$$

$$-F = IaBsen90(-\vec{i}) = IaB(-\vec{i}) \Rightarrow \vec{F}_T = -\vec{F}' + \vec{F}' - \vec{F} + \vec{F} = 0$$

Imos calcular agora o momento do par de forzas **F** e **-F**:

$M = Fd = IaB \cdot bsen\alpha = I\,S\,Bsen\alpha$, $\boxed{M = I\,S\,Bsen\alpha}$ sendo S a área da espira S = a.b

A expresión anterior é válida para tódolos circuitos planos calquera que sexa a súa forma. Cando en vez dunha única espira temos N espiras entón o momento é:

$$\boxed{M = N\,I\,S\,Bsen\alpha}$$

PROBLEMAS

1- Un electrón que é acelerado por unha diferenza de potencial de 1000 V, entra pola dereita nun campo magnético B sainte perpendicular á súa traxectoria, e describe unha órbita circular de T = 2.10^{-11}s. Logo de facer un debuxo da situación, calcula: a) velocidade do electrón; b) o campo magnético ; c) ¿dirección dun campo eléctrico E que aplicado xunto con B permita que a traxectoria sexa rectilínea?

Datos: $q_e = -1{,}6.10^{-19}C$; $m_e = 9{,}l.10^{-31}$**kg**

2- Un electrón entra con velocidade constante $\vec{v} = 10\,\vec{j}$ (m/s) nunha rexión do espazo na que existe un campo eléctrico uniforme $\vec{E} = 20\,\vec{k}$ (N /C) e un campo magnético uniforme $\vec{B} = B_0\,\vec{i}$ (T). Pídese:

a) Debuxar as forzas que actúan sobre o electrón (dirección e sentido), no instante no que entra na rexión na que existen os campos eléctrico e magnético.

b) Calcular o valor de B_0 para que o movemento do electrón sexa rectilíneo e uniforme.

Dato: qe = -1,6 10^{-19} C **S**: b) B_0 = 2 T

3-Un chorro de ions acelérase por unha diferenza de potencial de 10000 V, antes de penetrar nun campo magnético de 1 T. Se os ions describen unha traxectoria circular de 5 cm de radio, determina a súa relacion carga-masa. **S**: *$8{\cdot}10^{6}$ C/kg*

4- Obsévase un chorro de electróns que atravesa unha rexión do espacio sen desviarse. Indica razoadamente se : a) non poden existir campos magnéticos , b) non poden existir campos eléctricos, c) poden existir campos eléctricos e magnéticos.

Solución: 0,28 N

5- Elixe razoadamente a resposta correcta as seguintes cuestións:

- Unha carga eléctrica crea un campo magnético B cando está:
  a) en repouso. b) en movemento. c) en repouso ou en movemento. d) nunca.
- Un campo magnético B exerce unha forza sobre unha carga Q que se move cunha velocidade v : a) sempre. b) nunca. c) ás veces.

6- Un protón móvese no sentido positivo do eixe OY nunha rexión onde existe un campo eléctrico de 3.10^5 N/C no sentido positivo do eixe OZ e un campo magnético de 0,6 T no sentido positivo do eixe OX.

a) Debuxar un esquema das forzas que actúan sobre a partícula e razoa en qué condicións a partícula non se desvía.

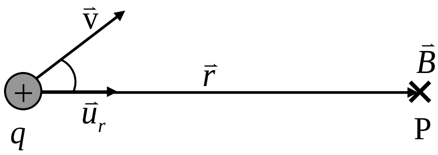
b) Se un electrón se movera no sentido positivo do eixe OY con unha velocidad de 10^3 m/s, ¿sería desviado?. Explícao.

7- Un protón é acelerado ao longo do eixe X desde o repouso por unha diferenza de potencial de 15000 V. A continuación accede perpendicularmente a un campo magnético de 0,4 T perpendicular ao plano do papel e dirixido cara o observador. Debuxa nun esquema a traxectoria da partícula e calcula o radio e o periodo da súa órbita. $q_p = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C ; $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg ;

4- CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UN ELEMENTO DE CORRENTE. LEI DE AMPÈRE.

A meirande parte dos campos magnéticos utilizados na industria e nos laboratorios son creados por correntes eléctricas que circulan a través dunha bobina. Neste apartado veremos cómo determinar o campo magnético creado por diferentes circuitos de correntes eléctricas.

<u>As cargas eléctricas en movemento crean campos magnéticos</u>. O campo magnético creado por unha carga eléctrica **q** que se move cunha velocidade $\vec{v}$ pódese determinar a partir da <u>*lei de Biot e Savart*</u>.



$$\boxed{\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q\vec{v}\times\vec{u}_r}{r^2}}$$

μ_0 = permeabilidade magnética no baleiro. $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ T.m.A^{-1}

r = distancia da carga ao punto onde queremos calcular o campo

4.1- CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UN ELEMENTO DE CORRENTE

Consideremos un elemento infinitesimal de condutor de lonxitude $d\vec{l}$, percorrido por unha intensidade de corrente I, e calculemos a súa contribución ao campo magnético nun punto calquera do espazo.

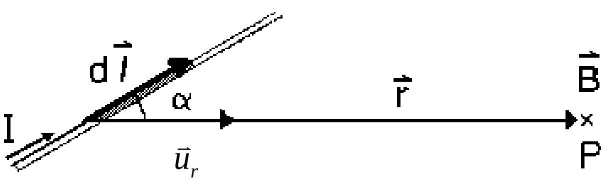
Para poder describir circuítos de distinta forma, asignamos a $d\vec{l}$ un carácter vectorial: <u>é un vector coa dirección e o sentido que ten a intensidade de corrente no elemento condutor</u>.

Chamámoslle elemento de corrente ao produto $I\cdot d\vec{l}$

Un elemento de corrente infinitesimal crea un campo magnético infinitesimal que ven dado pola *lei de Biot e Savart.*

$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{dq\vec{v}\times\vec{u}_r}{r^2}$ Xa sabemos que $I.d\vec{l} = \vec{v}.dq$, entón: $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{l}\times\vec{u}_r}{r^2}$

A *dirección* e *sentido* de $d\vec{B}$ ven determinada polo produto vectorial $d\vec{l}\times\vec{u}_r$.



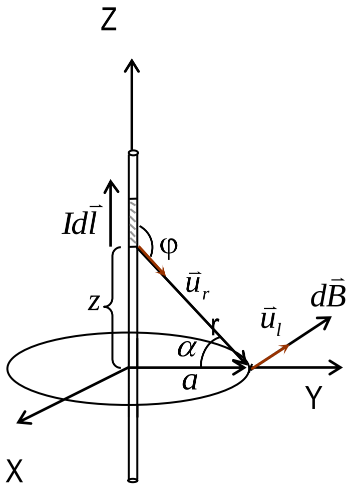
O *sentido* ven determinado pola <u>regra da man dereita</u>. (Ao pechar a man dereita, o pulgar indica o sentido da corrente e os outros dedos o sentido do campo).

O módulo será: $dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\cdot\frac{Idlsen\alpha}{r^2}$. Para detereminar o campo magnético total $\vec{B}$ creado por un condutor C nun punto do espazo debemos integrar a expresión anterior.

Vexamos un par de exemplos sinxelos:

4.1.1- CAMPO CREADO POR UN CONDUTOR RECTILÍNEO.

Supoñamos un condutor rectilíneo de lonxitude infinita (na práctica moi longo). Imos calcular o campo magnético a unha distancia **a** do fío condutor:



Temos: $Id\vec{l} = Idz\vec{K} \Rightarrow Id\vec{l} \times \vec{u}_r = Idzsen\varphi\, \vec{u}_l$

$$z = a\tan x\alpha \Rightarrow dz = \frac{a}{\cos^2\alpha}d\alpha$$

$sen\varphi = sen(90+\alpha) = \cos\alpha$ logo:

$$Idzsen\varphi = I\frac{a}{\cos^2\alpha}d\alpha \cdot \cos\alpha = I\frac{a}{\cos\alpha}d\alpha\,.$$

Temos tamén:

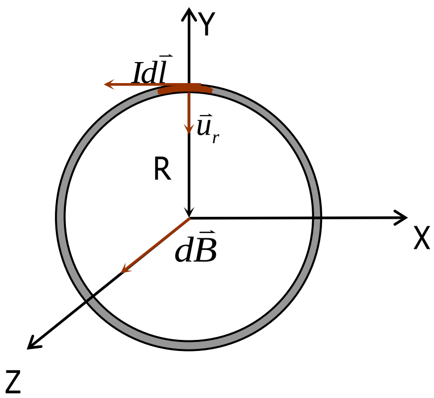
$r = \dfrac{a}{\cos\alpha} \Rightarrow r^2 = \dfrac{a^2}{\cos^2\alpha}$. Entón:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{l}\times\vec{u}_r}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\dfrac{a}{\cos\alpha}d\alpha}{\dfrac{a^2}{\cos^2\alpha}}\vec{u}_l = \frac{\mu_0 I}{4\pi\, a}\cos\alpha\; d\alpha\,\vec{u}_l$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi\, a}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\cos\alpha\; d\alpha\,\vec{u}_l = \frac{\mu_0 I}{4\pi\, a}\left[sen\alpha\right]_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\vec{u}_l = \frac{2\mu_0 I}{4\pi\, a}\vec{u}_l$$

Polo tanto, o módulo do campo magnético será: $\boxed{B = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi\, a}}$

4.1.2- CAMPO MAGNÉTICO NO CENTRO DUNHA ESPIRA OU CONDUTOR CIRCULAR.



Dividimos a espira en pequenos elementos de corrente $Id\vec{l}$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{l}\times\vec{u}_r}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Idl}{R^2}\vec{k}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2}\int_0^L dl\vec{k} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2}2\pi R\vec{k}$$

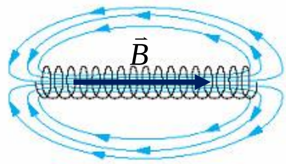
$$\text{Módulo de } B: \boxed{B = \frac{\mu_0 I}{2R}}$$

* Para puntos situados na recta que pasa polo centro da espira o campo magnético sería menor que no centro.

Se en vez dunha espira temos N espiras, o campo no centro será: $\boxed{B = \dfrac{\mu_0 NI}{2R}}$

A fórmula anterior é válida para un conxunto de espiras no que a lonxitude da bobina que forman é desprezable respecto ao radio das espiras.
Se, pola contra, temos un conxunto de espiras no que o seu radio é desprezable frente a lonxitude da bobina, o circuito así formado coñécese co nome de ***solenoide***.

SOLENOIDE



Os solenoides teñen gran importancia no electromagnetismo porque o campo que crean no seu interior é uniforme e intenso.

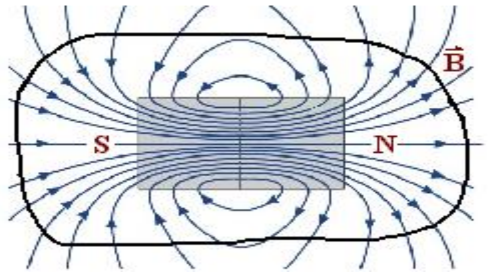
Para aumentar o valor do campo colócase no interior do solenoide, como núcleo, unha substancia de elevada permeabilidade, como é o caso do ferro, no que $\mu >> \mu_0$.

$$\boxed{B = \frac{\mu N I}{L}}$$

Fórmula que nos da o valor do campo magnético no interior dun solenoide.
N = Número de espiras.
I = Intensidade da corrente (en A).
L = Lonxitude do solenoide (en m).

4.2- LEI DE AMPÈRE

Se temos un imán encerrado dentro dunha superficie calquera, o fluxo magnético a través desa superficie vai ser nulo debido a que non existen polos magnéticos illados.



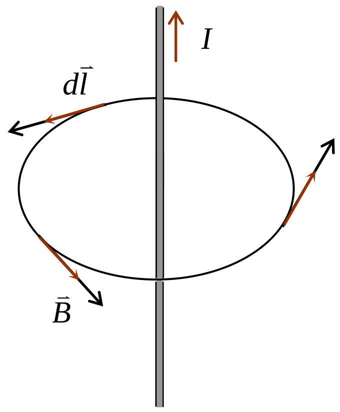
$\phi_{mag} = 0$, esto implica que <u>non vai haber un Th similar ao Th (teorema) de *Gauss* para o campo eléctrico e gravitatorio</u>.

Debemos buscar un teorema que relacione o campo magnético coas súas fontes, as correntes eléctricas.

Ampère foi quen de atopar tal relación. Primeiro recordaremos unha definición:

A ***circulación dun campo magnético*** ao longo dunha liña pechada defínese como a integral:

$\oint \vec{B}\, d\vec{l}$. Imos calcular canto vale esta integral para un caso sinxelo como é a circulación do campo magnético $\vec{B}$ creado por unha corrente rectilínea (calculado na pregunta anterior) ao longo dunha circunferencia de radio **r** centrada no fío condutor:



Sabemos que:

$B = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi R}$. Logo como $\vec{B}$ e $d\vec{l}$ son paralelos (α = 0):

$$\oint \vec{B}\, d\vec{l} = \oint \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \cdot dl = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \oint dl = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \cdot L = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} 2\pi R$$

$$\boxed{\oint \vec{B}\, d\vec{l} = \mu_0 I} \Rightarrow \textit{Lei de Ampère}$$

Ampère demostrou que este resultado é xeral para calquera circuito con independencia da súa forma:

"A circulación do campo magnético sobre calquera curva pechada é igual ao produto da permeabilidade magnética μ_0 pola intensidade de corrente que atravesa a superficie limitada pola curva C"

Podemos ver como o campo magnético non é conservativo pois a integral ao longo dunha liña pechada non é nula No caso dos campos conservativos si o é: $\oint \vec{g}\, d\vec{l} = 0$; $\oint \vec{E}\, d\vec{l} = 0$

A lei de Ampère ten a mesma utilidade para o campo magnético que a *lei de Gauss* para o campo eléctrico e gravitatorio: *mediante o seu emprego podemos calcular o campo magnético creado por correntes*.

EXERCICIOS

1- Unha bobina circular plana de radio 2π cm está constituida por 50 espiras. ¿Qué intensidade de corrente debe circular polo condutor para que o campo magnético no centro sexa de 1 Gauss? **Solución**: I = 0,2 A

2- Un solenoide constrúese enrollando uniformemente 600 voltas dun fino fío condutor sobre un cilindro oco de 30 cm de lonxitude. Se polo bobinado circula unha corrente I = 2 A . Calcula:
a) o valor do campo magnético no interior do solenoide e debuxa de forma aproximada as liñas de campo no interior e no exterior do solenoide.
b) Unha partícula cargada penetra no interior do solenoide movéndose cunha velocidade paralela ao eixe do solenoide. Debido a existencia do campo magnético, curvarase nalgún sentido a traxectoria da partícula? Dato: $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ T.m.A^{-1}. **Solución**:5,02.10^{-3} T

3- Determina a intensidade de corrente que circula por un fío rectilíneo longo se a unha distancia de 28 cm medimos un campo magnético de 3.10^{-6} T. **Solución**: I = 4,2 A

4- Se se aproxima o polo norte dun imán a cara dunha espira percorrida por unha corrente eléctrica no sentido horario, fai a elección razoada do que lle sucede a espira de entre unha das seguintes respostas: a) repélea b) nada c) atráea

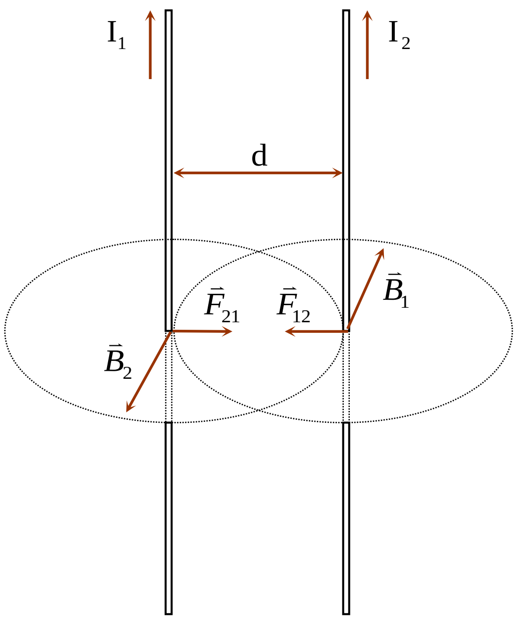
5- Por dous fíos rectilíneos, paralelos e indefenidos, separados 60 cm circulan correntes de 2 A e 4 A no mesmo sentido. Calcula a inducción magnética nun punto situado entre os dous fios, no plano que contén aos duos e que está: a) a 20 cm do 1º fio. b) a mesma distancia dos dous fios. c) a 20 cm do segundo fío. **Solucións**: a) 0 T; b) 1,4.10^{-6} T; c) 3.10^{-6} T

6- Un cable vertical e indefinido transporta 20 A de corrente no sentido z (+). Un segundo condutor paralelo ao anterior, está en x= 10 cm. a) ¿Qué intensidade circula polo segundo cable sabendo que o campo magnético é nulo en x=2 cm. Solución: I = 80 A
b) ¿Canto vale o campo magnético en x= 5 cm? **Solución**: 2.4 .10^{-4} $\vec{i}$ (T)

7- Por dous condutores rectilíneos paralelos e indefenidos circulan correntes de intensidades I_1 e I_2 en sentidos opostos. Se $I_1 = 2I_2$, detemina en que puntos o campo magnético resultante é nulo.

5- INTERACCIÓNS MAGNÉTICAS ENTRE CORRENTES PARALELAS.

No caso de que o sentido das correntes fose oposto, o tratamento sería igual ao que se mostra pero as forzas serían repulsivas.



Ampère xa estudara cualitativamente estes fenómenos e xa determinara asimesmo cuantitativamente a magnitude destas forzas.

Imos estudar o caso de dúas correntes paralelas do mesmo sentido separadas unha distancia **d** que é moito menor que a lonxitude dos fíos.

Traballamos só con módulos pois os sentidos e direccións xa estan postos no gráfico.

$F_{21} = F_{12}$ polo que calculamos só unha delas:

$$F_{12} = I_2 l\, B_1; \quad B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi\, d} \Rightarrow F_{12} = I_2 l \cdot \frac{\mu_0 I_1}{2\pi\, d}$$

$$\frac{F_{12}}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi\, d}$$

Temos entón que a forza por unidade de lonxitude vai ser: $\boxed{\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi\, d}}$

O resultado anterior permite definir de forma experimental o **Amperio**, polo qué a magnitude fundamental da electricidade é o Amperio en vez do Culombio (carga).

Amperio: *Intesidade dunha corrente eléctrica constante que mantida en dous conductores paralelos rectilíneos de lonxitude infinita no baleiro e separados unha distancia de 1m, produce entre eles unha forza igual 2.10^{-7} N /m de lonxitude*.

6- INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA. EXPERIENCIAS DE FARADAY E HENRY.

De momento sabemos que as correntes eléctricas producen campos magnéticos ao seu redor, pero agora debemos preguntarnos se é posible o contrario: se os campos magnéticos producen correntes eléctricas, igual que o fixeron científicos como *Faraday* (inglés), *Henry* (estadounidense) e *Lenz* (ruso) no século XIX unha vez que xa se coñecían os traballos de Oersted, Ampère, etc.

6.1- EXPERIENCIAS DE FARADAY.

Nun primeiro momento, Faraday experimentuo poñendo o circuito no que pretendía crear unha corrente eléctrica cerca de potentes imáns ou circuitos polos que circulaba unha corrente intensa obtendo resultados negativos.

No ano 1831, preparaba unha das súas experiencias consistente en dúas bobinas illadas entre sí e arrolladas en torno a un cilindro de madeira, de tal xeito, que unha delas estaba conectada a unha batería e na outra tiña un galvanómetro para detectar o paso de corrente. Observou algo inesperado pois o galvanómetro só detectaba paso de corrente no instante que conectaba a batería ou cando á desconectaba. Cando a corrente acadaba o seu estado estacionario o galvanómetro non detectaba paso de corrente no outro circuito.

Se empregaba un cilindro de *ferro doce* en vez de madeira a corrente detectada polo galvanómetro era moito maior. Estes resultados animárono a realizar novas experiencias polo que máis adiante colocou unha bobina conectada a un galvanómetro nas proximidades dun potente imán permanente e despois de diversas experiencias elaborou as seguintes conclusións:

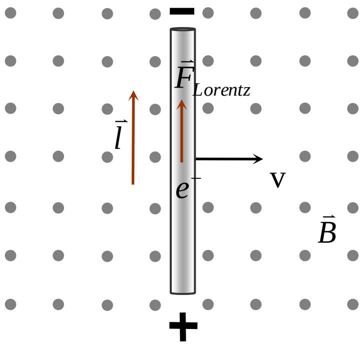
1- O galvanómetro detecta corrente sempre que hai *movemento relativo* entre a bobina e o imán. Cando cesa o movemento non se detecta corrente.
2- A intensidade medida polo galvanómetro é maior canto máis rápido é o movemento.
3- A intensidade é maior cantas máis espiras ten a bobina.
4- O sentido da corrente inducida cambia cada vez que invertimos o sentido do movemento ou cando invertimos os polos do imán.
5- Obsérvanse os mesmos resultados se o imán permanente se reemplaza por un electroimán.

Faraday denominou a este conxunto de fenómenos **inducción electromagnética** e chegou a conclusión de que o que da lugar a unha corrente inducida non é a presenza dun campo magnético senón a variación deste co tempo respecto ao circuito:

"*É a variación das liñas de campo magnético que etravesan a bobina a que da lugar a unha corrente inducida e esta é maior canto máis acusada sexa esa variación*"

6.2- EXPERIENCIA DE HENRY

Independentemente de Faraday, Henry descubriu que cando un condutor se move perpendicularmente a un campo magnético, orixínase unha diferenza de potencial nos extremos do condutor que pode producir unha corrente eléctrica se pechamos o circuito. Ao invertir o movemento do condutor ou o sentido do campo magnético, invírtese o sentido da corrente.



Empregando a forza de *Lorentz* podemos explicar este fenómeno. Ao mover o condutor no seo do campo magnético os electróns libres que posúe vense sometidos a forza de Lorentz:

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

Os electróns son transportados a un extremo do condutor quedando este cargado negativamente e o outro extremo queda cargado positivamente polo que se establece unha diferenza de potencial.

Defínese a ***forza electromotriz inducida*** (ε) como o traballo necesario para transportar a unidade de carga ao longo do condutor polo que a súa unidade é o **voltio**. Temos entón:

$$\mathcal{E} = \frac{W}{q} = \frac{\vec{F}_{lorentz} \cdot \vec{l}}{q} \Rightarrow \vec{l} \text{ representa a lonxitude da barra condutora.}$$

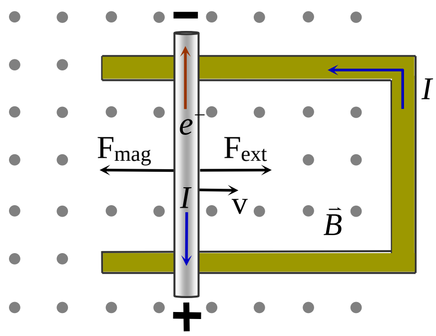
Se a barra de lonxitude l, o campo magnético e a velocidade v son perpendiculares entre sí, enton, $\vec{F}_{lorentz}$ e $\vec{l}$ son paralelos (e no caso mostrado no gráfico teñen, tamén, o mesmo sentido):

$$\mathcal{E} = \frac{F_{lorentz} \cdot l \cdot \cos 0^{o}}{q} = \frac{F_{lorentz} \cdot l \cdot 1}{q} = \frac{q \mathrm{v} B l}{q}; \quad \boxed{\mathcal{E} = \mathrm{v} B l}$$

No caso de que a lonxitude $\vec{l}$ non fose perpendicular a velocidade, entón a expresión anterior quedaría:

$\mathcal{E} = \mathrm{v} B l \cos(90 - \alpha)$ ou mellor $\boxed{\mathcal{E} = \mathrm{v} B l \, sen\alpha}$ sendo α o ángulo que formarían $\vec{l}$ e $\vec{v}$

Se a barra condutora se move sobre outro condutor de tal xeito que se pecha o circuito como se aprecia na figura, a ΔV producida polo desprazamento dos electróns orixina unha corrente.



O sentido da corrente é o contrario ao dos electróns. Como resultado temos unha corrente circulando no seo dun campo magnético, polo que vai experimentar unha forza magnética que virá dada pola expresión: $\vec{F} = I(\vec{L} \times \vec{B}) = ILB$. Esta foza oponse á velocidade da barra polo que acabará parándose polo que <u>é preciso aplicar unha forza externa no sentido da velocidade e de igual módulo que o da forza magnética para poder manter</u> a barra en movemento.

6.3 - INTERPRETACIÓN

Para interpretar as experiencias de Faraday e Henry hai que definir unha nova magnitude similar ao fluxo eléctrico. Falamos do *fluxo magnético* Φ_B a través dunha superficie delimitada por un circuito: $\Phi_B = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$. Cando o campo magnético é uniforme e a superficie é plana (esto implica que o ángulo entre $\vec{B}$ e $d\vec{S}$ sempre é o mesmo) teremos:

$$\Phi_B = \int_s B\, dS \cos\alpha = B \cos\alpha \int_s dS = BS \cos\alpha$$

A unidade de fluxo no S.I é o **Weber** (Wb) $\Rightarrow$ 1 Wb = 1 T.m²

Agora estamos en condicións de afirmar que a corrente inducida nun circuito é debida á variación do fluxo magnético que ó atravesa. Existen tres maneiras independentes de variar o fluxo mágnético que atravesa un circuito:

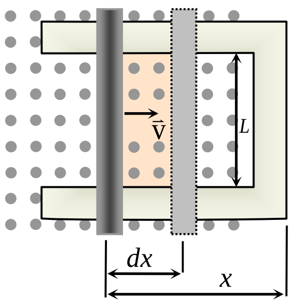
1ª- *Que se modifique o valor do campo magnético, ben porque varie co tempo ou ben porque varie a distancia de separación entre o circuito e o imán.*

2ª- *Que varie a superficie delimitada polo conductor por deformación desta ou outro método*.

3ª- *Que varie o valor do ángulo α ao variar a orientación do circuito respecto ao campo.*

7- LEIS DE FARADAY E LENZ.

7.1- LEI DE FARADAY.



No circuito da figura, ao recorrer a barra unha distancia dx, a variación de fluxo que atravesa a espira é:

$d\Phi_B = \vec{B}\cdot d\vec{S} = B\,dS$ .Temos que $d\Phi_B$ disminúe ao amentar dx: $dS = L(x-dx) - Lx = -Ldx \Rightarrow$ temos: $d\Phi_B = -BLdx = -BL\text{v}dt$.

A rapidez coa que varía o fluxo será: $\dfrac{d\Phi_B}{dt} = -BL\text{v} = -\text{v}BL$

Na pregunta anterior deducíramos canto valía a forza electromotriz ε inducida nos extremos da barra conductora: $\mathcal{E} = \text{v}Bl\,sen\alpha$ que neste caso ($sen90^\circ = 1$) será: $\mathcal{E} = \text{v}Bl$.

Logo entón: $\dfrac{d\Phi_B}{dt} = -\boldsymbol{\varepsilon} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\varepsilon = -\dfrac{d\Phi_B}{dt}}$ $\Rightarrow$ **Lei de Faraday**

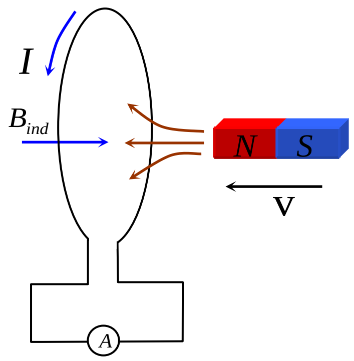
Se temos unha bobina formada por N espiras, a f.e.m será: $\boxed{\varepsilon = -N\dfrac{d\Phi_B}{dt}}$

<u>Cando os incrementos son finitos podemos poñer:</u> $\boxed{\varepsilon = -\dfrac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}}$ e $\boxed{\varepsilon = -N\dfrac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}}$

7.2- LEI DE LENZ.

"*O sentido da corrente inducida nun circuito é tal que se opón a causa que a produce*"

A *f.e.m* e a intesidade inducida tenden a opoñerse á variación de fluxo magnético. É como se o circuito presentase unha certa inercia aos cambios.



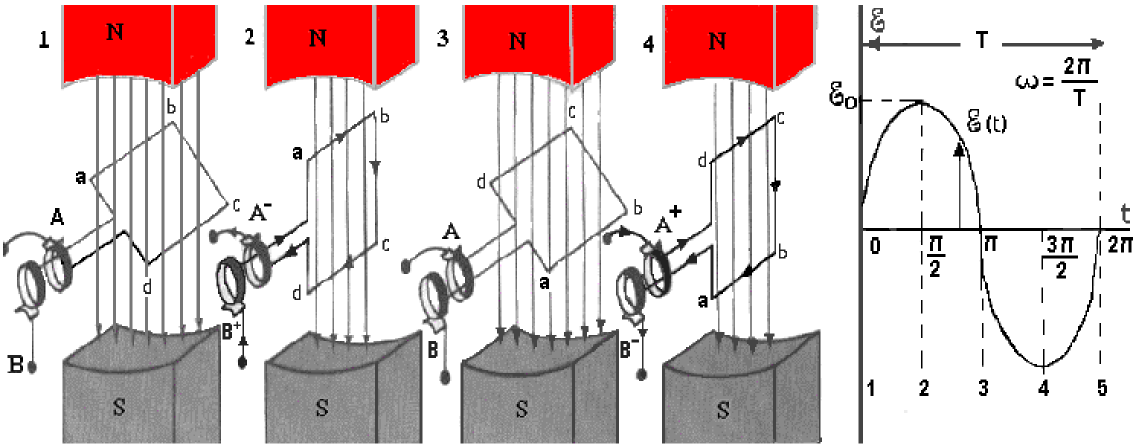
Por exemplo, se acercamos o *polo Norte* dun imán a unha espira, o sentido da corrente inducida será aquel que cree un campo magnético co *polo norte* enfrentado ao *polo norte* do imán. Pola contra, se alonxamos o *polo norte* (equivale a acercar ó polo sur) o sentido da corrente inducida será tal que o campo magnético creado teña o *polo sur* fronte ao *polo norte* do imán.

Podemos ver como na figura, ao acercar o imán, a intensidade inducida no circuito é tal que produce un campo magnético que se opón ao aumento de fluxo (creando fluxo en sentido contrario) á través da superficie delimitada polo circuito.

8- PRODUCCIÓN DE CORRENTES ALTERNAS.

Faraday deseñou o 1º xerador de corrente alterna. Un xerador de corrente alterna está constituido fundamentalmente por un conxunto (*cadro*) de N espiras situadas no seo dun campo magnético uniforme. As espiras deben xirar perpendicularmente ao campo magnético e aquí é onde consume enerxía o proceso pois precísase realizar traballo para rotar as espiras.
O obxectivo de que as espiras xiren non é outro máis que conseguir unha variación do fluxo magnético que ás atravesa, o que provoca, pola lei de Faraday, unha forza electromotriz inducida.

Supoñamos unha espira que xira entorno a un eixe perpendicular ao plano do papel con velocidade angular ω cte e está situada no seo dun campo magnético $\vec{B}$ vertical como se indica na figura:



O fluxo que atravesa a espira ven dado pola fórmula:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS\cos\alpha \ ; \quad \alpha = \omega\, t \Rightarrow \Phi = BS\cos\omega\, t$$

A f.e.m. inducida (ε) calculámola pola lei de Faraday:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\left(BS\cos\omega\, t\right)}{dt} = -BS\,\frac{d(\cos\omega\, t)}{dt} = BS\omega\ sen\omega\, t$$

Dedúcese que a forza electromotriz é periódica cambiando alternativamente de polaridade.
Se en vez dunha espira tivésemos unha bobina formada por N espiras, a f.m.e sería:

$$\varepsilon = NBS\omega\ sen\omega\, t$$

No instante inicial (t=0) o plano da espira é perpendicular ao campo magnético $\Rightarrow$ O fluxo é máximo e a *f.m.e.* é nula. A *f.m.e.* inducida en ¼ de volta (t=T/4) acada o seu valor máximo e o fluxo sería nulo e así sucesivamente. Podemos ver na gráfica da dereita com sería a función da forza electromotriz inducida. A gráfica do fluxo estaría desfasada de tal xeito que os máximos e mínimos corresponderian aos ceros da *f.m.e.*

A *f.e.m* máxima sería: $\varepsilon = BS\omega\ sen\omega\, t = \varepsilon_{\max}\ sen\omega\, t \Rightarrow \boxed{\varepsilon_{\max} = BS\omega}$

A corrente alterna prodúcese a gran escala nas centrais eléctricas empregando unha forza motriz para mover unha turbina unida a un xerador eléctrico (alternador). A forza que move as turbinas pode proceder da auga, do vento, da combustión de combustibles fósiles ou de combustibles nucleares que producen vapor de auga que move a turbina, etc.

As diversas centrais onde se produce a electricidade presentan diversos tipos de contaminación según de onde proceda a forza motriz (combustibles fósiles,nuclear, etc).

PROBLEMAS

1- A través de dous condutores rectilíneos, paralelos e infinitamente largos separados 4 cm circulan correntes de 2 A e 6 A no mesmo sentido ¿Que forza por unidade de lonxitude actúa sobre eles?. ***S****: F/L = 6. 10^{-5} N/m, atractiva*

2- Unha variña condutora de 20 cm de lonxitude deslízase perpendicularmente a sí mesma con unha velocidade de 0,4 m/s, sobre un conductor en forma de U e de 8 Ω de resistencia. O conxunto está situado no seo dun campo magnético uniforme de 0,5 T perpendicular ao circuito formado polos condutores. Determina:

a) O valor da *fem* inducida.

b) O valor e o sentido da intensidade que recorre o circuito.

c) O módulo, dirección e sentido da forza que hai que aplicar para manter a variña en movemento.

3- Indica razoadamente se as seguintes afirmacións son verdadeiras ou falsas:

a) Unha carga eléctrica sempre orixina un campo eléctrico e un campo magnético.

b) As correntes eléctricas orixinan sempre un campo magnético.

c) Calquer campo magnético orixina sempre unha corrente eléctrica.

d) Calquer condutor polo que circule unha corrente está sometido a unha forza sempre que se introduce nun campo magnético.

4- Indica verdadeiro ou falso para as seguintes cuestións e razóaas.

a) A *fem* inducida nun circuito é proporcional ó fluxo magnético que ó atravesa.

b) A intensidade que recorre unha espira sempre tende a disminuir o fluxo magnético que á atravesa.

c) Se frente a unha bobina con moitas espiras se coloca un electroimán moi potente, a corrente inducida é moi elevada.

d) As correntes inducidas xeneranse exclusivamente cando hai movemento relativo entre o imán e o circuito.

e) A cantidade de carga transportada por un circuito cando se induce nel unha intensidade depende da rapidez coa que se modifica o fluxo magnético.

5- Unha bobina de 2000 espiras e de 5 cm de radio xira cunha frecuencia de 1000 rpm no seo dun campo magnético de 0,2 T. Determina a f.e.m en calquer instante e o seu valor máximo.

6- O fluxo magnético que atravesa unha espira condutora ven defenido pola ecuación:

$$\Phi = \left(t^2 - 4t\right)\cdot 10^{-1} \text{ Wb}$$

a) Deduce a ecuación que determina a f.e.m inducida en función do tempo.

b) Representación gráfica.

c) ¿Para que valor de t se anula o fluxo?¿cal é o valor da f.e.m nese instante?

7- Unha bobina plana de 40 espiras e superficie 0,04 m^2 atópase dentro dun campo magnético uniforme de intensidade B = 0,1 T e perpendicular ao eixe da bobina; se en 0,2 segundos xira ata que o campo queda paralelo ao eixe da bobina. Calcula a f.e.m. inducida. **S**: ε = –0,8 V.

8- Unha espira circular de 2 cm de radio atópase nun campo magnético uniforme, de dirección normal ao plano da espira e de intensidade variable co tempo: $B = 3t^2 + 4$ (S.I.)

a) Deduze a expresión do fluxo magnético a través da espira en función do tempo.

b) Representa gráficamente a forza electromotriz inducida en función do tempo e calcula o seu valor para t = 2 s.

9- Unha espira móvese nun plano horizontal e penetra nun campo magnético uniforme vertical.

a) Explica as características da corrente inducida na espira ao entrar na rexión do campo, ao moverse nel e ao abandonalo. b) Razoa en qué etapas do traxecto descrito habería que comunicarlle unha forza externa á espira para que avanzara con velocidade constante.

EXERCICIO RESOLTO

Un protón, un electrón e unha partícula α acelerados pola mesma diferencia de potencial, penetran nunha rexión do espazo perpendicularmente a un campo magnético uniforme. Atopa:

a) Relación entre as súas enerxías cinéticas.

b) Relación entre as súas velocidades no momento de penetrar no campo magnético.

c) Se o radio da traxectoria do protón é de 0,1 m, ¿Cales son os radios das outras dúas partículas?

Temos que aclarar 1º que para acelerar o electrón e necesario invertir a polaridade das placas e que este xira en sentido contrario ao protón e á partícula α (${}_{2}^{4}He^{+2}$) unha vez que entra no campo magnético.

Tomamos como unidade de carga a carga do electrón:

$q_{protón}$= e ; $q_{electrón}$= -e ; q_{α}= 2e

Masas: $m_{protón}$= 1 u , $m_{electrón}$= 5,45.10^{-4} u, m_{α}= 4 u

Para cada partícula teremos: $q\Delta V = E_c$

$$Ec_p = e\Delta V \ ; \ Ec_e = -e(-\Delta V) = e\Delta V \ ; \ Ec_\alpha = 2e\Delta V \ \Rightarrow$$

$$\boxed{Ec_p = Ec_e = \frac{1}{2}Ec_\alpha}$$

A partir desta expresión, calculamos a relación entre as velocidades:

$$\frac{1}{2}m_p \mathrm{v}_p^2 = \frac{1}{2}m_e \mathrm{v}_e^2 = \frac{1}{4}m_\alpha \mathrm{v}_\alpha^2 \Rightarrow \frac{1}{2}1\,\mathrm{v}_p^2 = \frac{1}{2}5{,}45\cdot 10^{-4}\,\mathrm{v}_e^2 = \frac{1}{4}4\mathrm{v}_\alpha^2 \Rightarrow$$

$$\mathrm{v}_p^2 = 5{,}45\cdot 10^{-4}\,\mathrm{v}_e^2 = 2\mathrm{v}_\alpha^2$$

Facendo a raiz quédanos:

$$\boxed{\mathrm{v}_p = 2{,}3\cdot 10^{-2}\,\mathrm{v}_e = \sqrt{2}\ \mathrm{v}_\alpha}$$

O radio da órbita que describe cada partícula ven dado pola expresión: $R = \frac{mv}{qB}$

Como o radio que coñecemos é o do protón, dividimos os outros dous por este:

$$\frac{R_e}{R_p} = \frac{\frac{m_e v_e}{eB}}{\frac{m_p v_p}{eB}} = \frac{m_e v_e}{m_p v_p} = \frac{5{,}45\cdot 10^{-4}\,\frac{v_p}{2{,}3\cdot 10^{-2}}}{1 v_p} = \frac{5{,}45\cdot 10^{-4}}{2{,}3\cdot 10^{-2}} = 2{,}37\cdot 10^{-2} \Rightarrow R_e = 2{,}37\cdot 10^{-2} R_p$$

$$R_e = 2{,}37\cdot 10^{-3}\ m$$

$$\frac{R_\alpha}{R_p} = \frac{\frac{m_\alpha v_\alpha}{2eB}}{\frac{m_p v_p}{eB}} = \frac{m_\alpha v_\alpha}{2m_p v_p} = \frac{4\frac{v_p}{\sqrt{2}}}{2v_p} = \frac{2}{\sqrt{2}}v_p \Rightarrow R_\alpha = \sqrt{2}R_p = \sqrt{2}\cdot 0{,}1 = 0{,}141 m$$