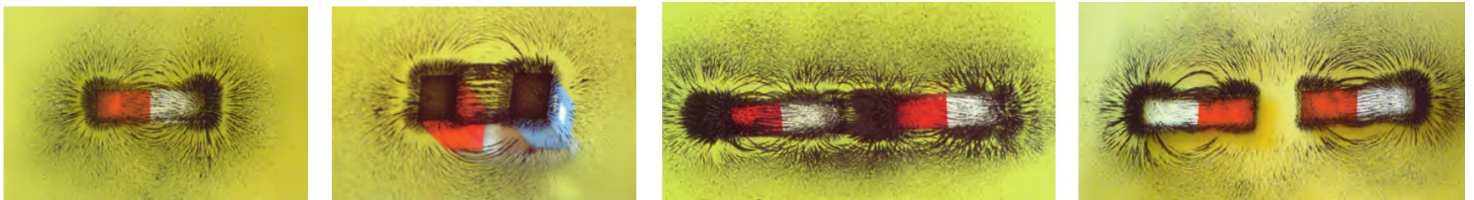


## TEMA 6. CAMPO MAGNÉTICO

Desde muy antiguo es conocida la curiosa propiedad del imán natural o magnetita (1) (mineral de hierro integrado, fundamentalmente, por  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) de atraer pequeños trozos de hierro o acero.

Posteriormente se observó que algunos metales, particularmente el hierro y el acero, podían transformarse en imanes obteniéndose de esta manera los imanes artificiales. Del estudio de los imanes, y de su efecto asociado, el magnetismo, podemos extraer algunos datos importantes:

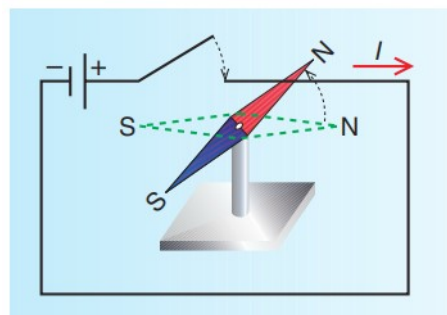
- El efecto atractivo es máximo en los extremos de imán, en las zonas denominadas polos, y nula en la parte media, o zona denominada como línea neutra. Esta afirmación es fácilmente comprobable espolvoreando limaduras de hierro directamente sobre el imán.
- El propio planeta Tierra se comporta como un gigantesco imán, ya que una aguja imantada que pueda girar libremente se orienta en la dirección Norte-Sur (aproximadamente) (2). Por esta razón el polo del imán que apunta hacia el Norte geográfico se le da el nombre de polo norte (N) y polo sur (S) al contrario.
- Si enfrentamos polos del mismo nombre se repelen y si son de nombre distinto se atraen.
- Es imposible obtener polos magnéticos aislados. No existen partículas fundamentales (tal y como sucede en el caso de la carga eléctrica) a las que se les puedan asociar un tipo de magnetismo N o S. Los cuerpos magnetizados siempre presentan ambos polos.
- Al igual que una masa origina un campo gravitatorio y una carga eléctrica un campo eléctrico, un imán perturba el espacio que lo rodea y la región del espacio en que se manifiestan sus efectos magnéticos se llama campo magnético. Puede representarse gráficamente mediante líneas de campo, llamadas líneas de inducción. El campo magnético se puede visualizar espolvoreando limaduras de hierro sobre un papel situado sobre un imán u observando la orientación adquirida por una aguja imantada situada en sus proximidades. De estas experiencias concluiremos que:
  - Las líneas de campo son cerradas.
  - Salen del polo N y entran por el S.



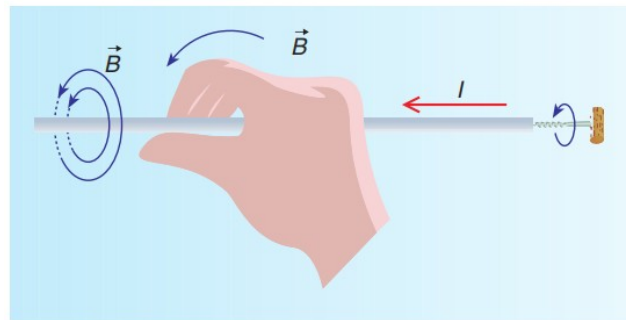
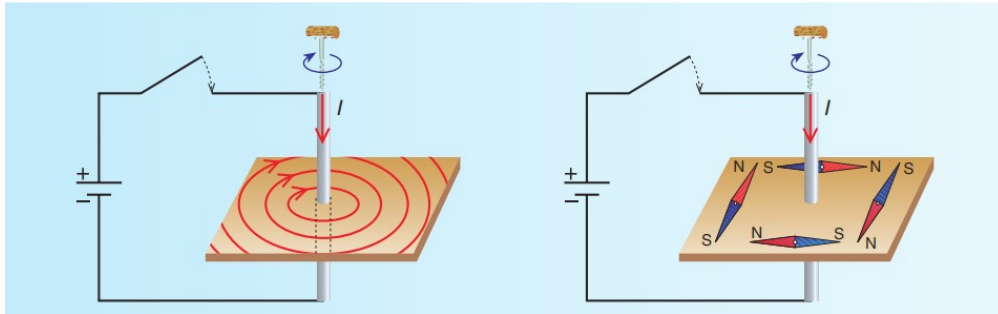
As limaduras de ferro indicam as linhas de indução do campo magnético criado por um ímã.

La unión electricidad-magnetismo tiene una fecha: 1820. Ese año Oersted realizó su famoso experimento (ver figura) en el cual hacía circular una corriente eléctrica por un conductor cerca del cual se colocaba una aguja imantada. La aguja se desviaba mostrando que una corriente eléctrica crea un campo magnético a su alrededor.

<https://www.youtube.com/watch?v=gRVjZRXn9A0>

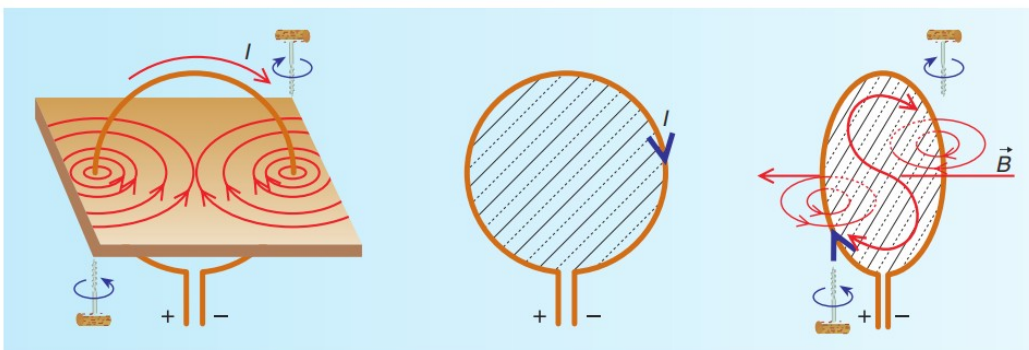


Se pueden visualizar las líneas de inducción de los campos magnéticos producidas por corrientes eléctricas salpicando limaduras de hierro o colocando compases sobre una cartulina atravesada por una corriente eléctrica.



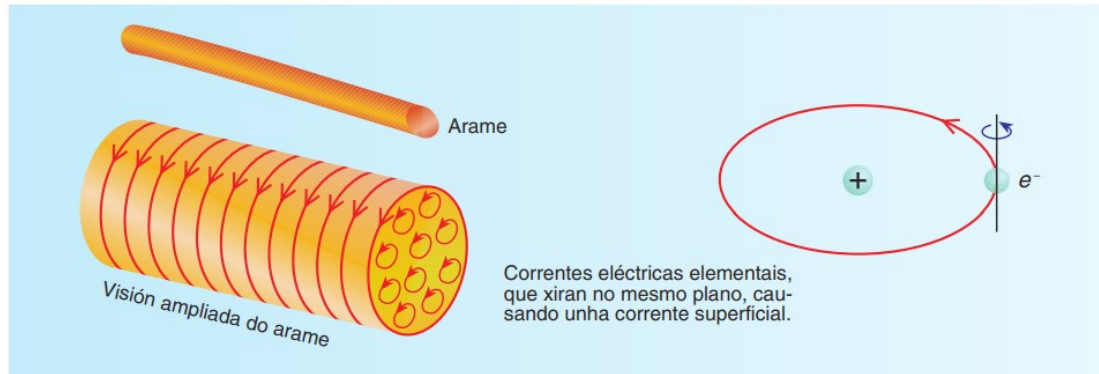
Si el conductor es una espira circular por la que pasa una corriente  $I$  y usamos limaduras de hierro o compases para visualizar las líneas de inducción del campo magnético creado. El efecto se incrementa si juntamos varias espiras, es decir una bobina.

Vemos que el comportamiento de esta espira es como si se tratara de un imán rectilíneo que tiene el tamaño de la espira. Las caras norte y sur de la espira las podemos reconocer con la regla de la mano derecha (o la del sacacorchos) pero también podemos usar una nueva regla, que consiste en escribir en la espira, siguiendo el sentido de la corriente, la letra S o N, según sea posible. La letra inscrita nos indica, en esa cara de la espira, el polo del imán creado por la corriente circular.

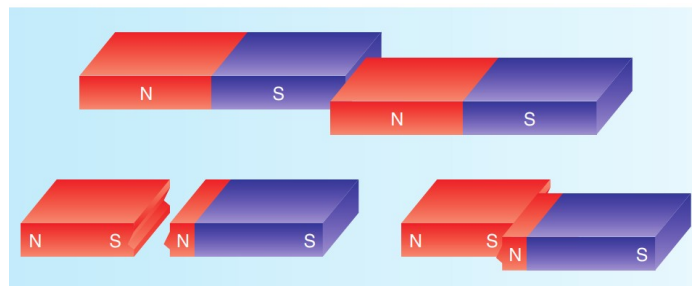


## ¿A QUÉ SE DEBE EL MAGNETISMO?

Ya en el año 1823, Ampère pensó que el magnetismo era debido a la existencia de corrientes eléctricas cerradas en el interior de los cuerpos magnéticos. En efecto, los electrones, al girar en sus órbitas y sobre si mismos (spin), equivalen a corrientes circulares que crean un campo magnético perpendicular al plano de la órbita



En una sustancia no imantada, los diminutos campos magnéticos están orientados al azar, anulándose entre si. Si orientamos estos campos magnéticos elementales (sometiendo a la sustancia a un campo magnético exterior) la sustancia adquiere propiedades magnéticas, apareciendo un imán artificial que puede ser permanente (si la orientación permanece al cesar el campo exterior) o temporal, también llamado electroimán (si desaparece el efecto al cesar la causa exterior).



## 2.- FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UNA CARGA Q EN MOVIMIENTO: LEY DE LORENTZ Y DEFINICIÓN DE B

Si introducimos una carga eléctrica en el seno de un campo magnético no se detecta acción alguna del campo sobre la carga, pero si ésta se mueve en una dirección que no coincida con la del campo magnético, su trayectoria se curva evidenciando la acción de una fuerza perpendicular a la dirección de la velocidad.

La fuerza ejercida sobre una carga en movimiento en el seno de un campo magnético es proporcional a la carga, a su velocidad y a la intensidad del campo magnético (a veces llamado inducción magnética), **B**.

El vector fuerza viene dado por la expresión:

Velocidad con que se desplaza la carga

Fuerza ejercida sobre la carga por el campo magnético (fuerza de Lorentz)

Valor de la carga

Valor del campo magnético

Producto vectorial

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

El producto vectorial de dos vectores es **un vector** definido de la forma siguiente:

**Módulo:** producto del módulo de ambos vectores por el seno del ángulo que forman.

**Dirección:** perpendicular al plano definido por ambos vectores.

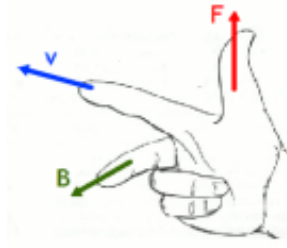
**Sentido:** el del sacacorchos que gira del primer al segundo vector por el camino más corto.

El módulo de la fuerza viene dado por:  $F = q v B \sin \alpha$  donde  $\alpha$  es el ángulo formado por el vector campo magnético y la velocidad de la carga. Esto implica:

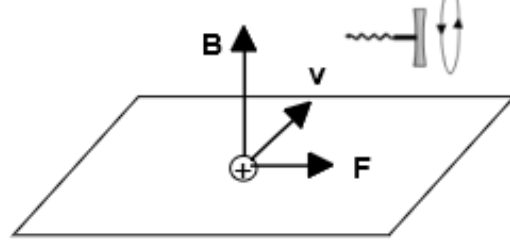
- Que si la carga se desplaza en la misma dirección del campo no experimentará fuerza alguna.
- Que la fuerza adquirirá su máximo valor cuando la carga se mueva en dirección perpendicular al campo ( $F = q v B$ )

El vector fuerza, por tanto, es perpendicular al plano determinado por los vectores velocidad y campo magnético.

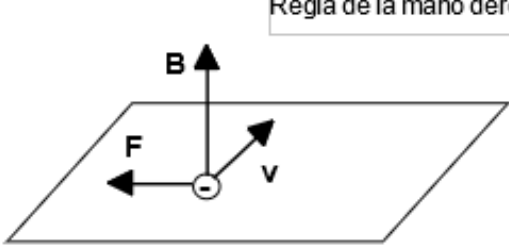
Su sentido es de un sacacorchos que gira de  $v$  a  $B$  por el camino más corto, si la carga es positiva. Si la carga es negativa, su sentido es opuesto.



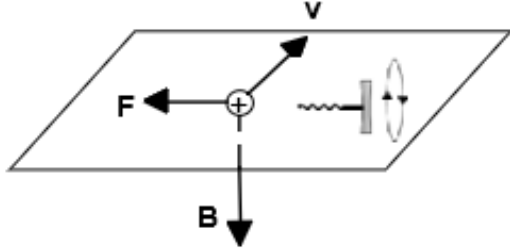
Regla de la mano derecha



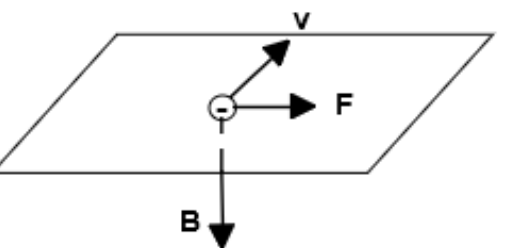
Dirección y sentido del vector fuerza para una carga **positiva** que se desplaza con velocidad  $v$



Dirección y sentido del vector fuerza para una carga **negativa** que se desplaza con velocidad  $v$



Dirección y sentido del vector fuerza para una carga **positiva** que se desplaza con velocidad  $v$



Dirección y sentido del vector fuerza para una carga **negativa** que se desplaza con velocidad  $v$

Teniendo en cuenta lo anterior podemos definir la unidad de campo magnético en el S.I. llamada tesla (T) ou wéber/m<sup>2</sup> (Wb/m<sup>2</sup>)

**Un tesla** es la intensidad de un campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N sobre una carga de 1 C que se mueve perpendicularmente al campo con una velocidad de 1 m/s



**Nikola Tesla (1856 - 1943)**  
Ingeniero e inventor serbio-americano que realizó importantes contribuciones al estudio del electromagnetismo

Dimensionalmente (recordar que  $I = q/t$ ):

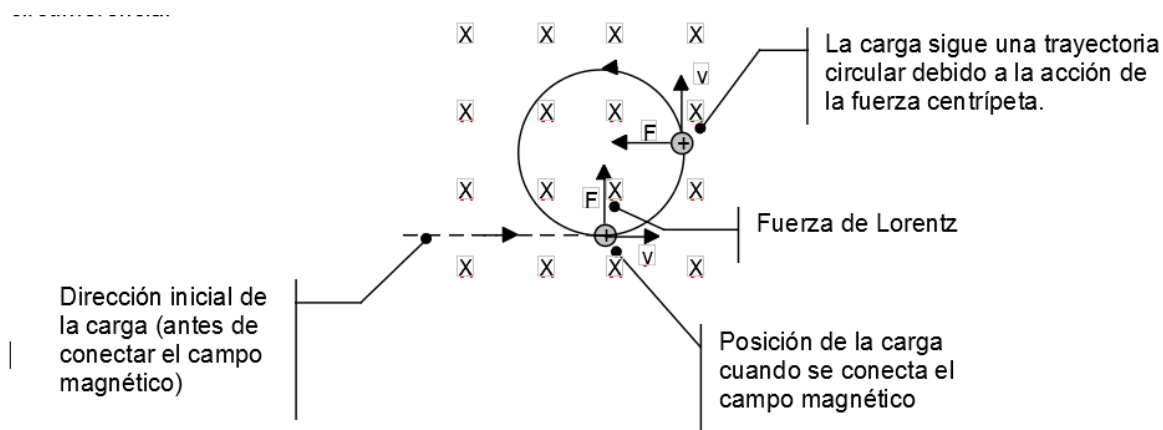
$$|B| = \frac{|F|}{|q||v|} = \frac{|MLT^{-2}|}{|I T||LT^{-1}|} = |MI^{-1}T^{-2}|$$

En la práctica el tesla resulta ser una unidad demasiado grande por lo que frecuentemente se emplea el gauss (G):  $1 T = 10^4 G$ . Según se ha dicho fuerza y velocidad son siempre perpendiculares, por tanto la fuerza variará la dirección del vector velocidad, pero no su módulo. Cuando una carga en movimiento es sometida a la acción de un campo magnético no se produce una conversión de energía potencial en cinética. El **campo magnético no es conservativo**. No obstante, y en ausencia de fuerzas de rozamiento, la energía cinética de la carga permanece invariable.

Puede ocurrir que en la región considerada exista, además de un campo magnético (B), uno eléctrico (E), en este caso la carga en movimiento interacciona con ambos campos y la fuerza total será:

$$F = q \cdot (v \wedge B + E)$$

Supongamos una partícula con carga positiva que se mueve de izquierda a derecha con velocidad constante. Si se crea un campo magnético perpendicular al plano del papel y dirigido hacia abajo (el campo magnético se representa por aspas), la carga interaccionará con dicho campo ejerciéndose sobre ella una fuerza perpendicular a su velocidad que hará que cambie continuamente de dirección describiendo una circunferencia. La carga se moverá con movimiento circular uniforme:

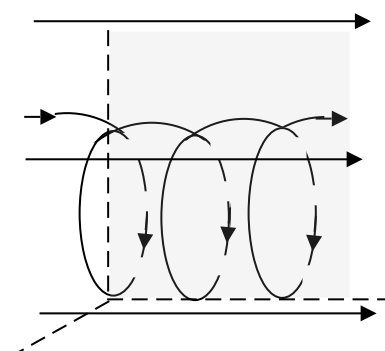
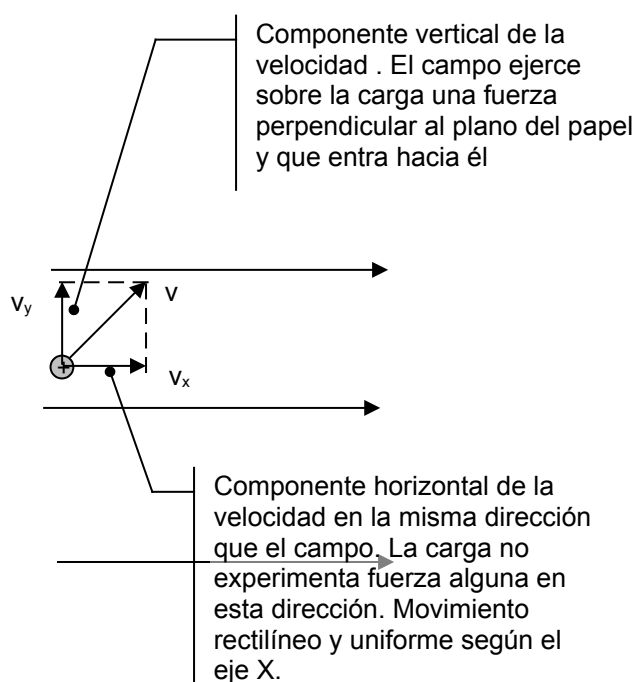


La carga se moverá con movimiento circular uniforme:

$$\begin{aligned} F_N &= m a_N \\ q v B &= m \frac{v^2}{R} \\ R &= \frac{m v}{q B} = \left( \frac{m}{q B} \right) v \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v &= \omega R ; \omega = \frac{v}{R} = \frac{q B}{m} \\ \omega &= \frac{2 \pi}{T} ; T = \frac{2 \pi}{\omega} = \frac{2 \pi}{\frac{q B}{m}} = \frac{2 \pi m}{q B} \end{aligned}$$

En el caso general de que la carga penetre en el campo magnético con una velocidad oblicua, podemos considerar las componentes horizontal (en la misma dirección del campo) y vertical (perpendicular) de la velocidad. El movimiento resultante será la composición del movimiento de avance según el eje X y el circular según el eje Y, es decir un movimiento helicoidal.



Movimiento resultante: hélice en el plano XZ

### 3. FUERZA MAGNÉTICA EJERCIDA SOBRE UNA CORRIENTE ELÉCTRICA

Si una corriente eléctrica de intensidad  $I$  circula por un conductor de longitud  $l$ , situado dentro de un campo magnético de inducción  $\mathbf{B}$ , los electrones en movimiento están sometidos a la fuerza de Lorentz y la fuerza total  $\mathbf{F}$  que actúa sobre el conductor es la suma de todas las fuerzas de Lorentz que actúan sobre cada electrón. Para estudiar esta fuerza empezamos considerando al conductor como formado por un gran número (infinito) de conductores elementales  $d\mathbf{l}$  con la dirección y el sentido de la corriente, a los que le corresponde la carga elemental  $dQ$ , sobre la que  $\mathbf{B}$  ejerce la fuerza magnética elemental  $d\mathbf{F}$ , que se obtiene con la expresión:  $d\mathbf{F} = dQ \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ .

Para escribir esta fórmula en función de la intensidad de corriente y de la longitud elemental de conductor vamos a recordar que:

- La carga  $dQ$  que atraviesa una sección del conductor en un tiempo  $dt$  se relaciona con la intensidad  $I$  con la expresión:  $dQ = I dt$ .
- La longitud elemental de conductor  $d\mathbf{l}$  que recorre la carga  $dQ$  en el tiempo  $dt$  depende de la velocidad  $\mathbf{v}$  con la que se desplazan las cargas:  $\mathbf{v} = d\mathbf{l} / dt$ , pudiendo escribir:

$$dQ \mathbf{v} = I dt \frac{d\mathbf{l}}{dt} = I d\mathbf{l}$$

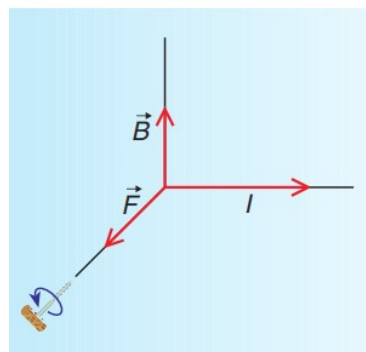
y el valor de la fuerza elemental ejercida por el campo magnético sobre el elemento de corriente  $I \cdot d\mathbf{l}$  es:

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = \int I d\vec{l} \times \vec{B}$$

Si el conductor es rectilíneo y el campo magnético es estacionario (constante en el tiempo) y uniforme (igual dirección, sentido e intensidad en todos los puntos del espacio) resulta:

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



Esta expresión se conoce como **segunda ley de Laplace**.

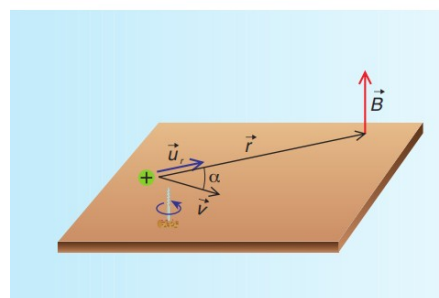
#### 4. CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA CARGA PUNTUAL MÓVIL

La experiencia de Oersted (año 1820) puso de manifiesto que una corriente eléctrica (cargas en movimiento) crea un campo magnético. Ese mismo año, los físicos Biot y Savart establecieron experimentalmente una expresión matemática que relacionaba la inducción magnética **B** en un punto con la carga que la origina. Observaron que el valor (módulo) de **B** era:

- Directamente proporcional al valor de la carga Q que se mueve.
- Directamente proporcional al módulo de la velocidad, **v**, de la carga.
- Inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r que separa la carga del punto donde queremos conocer **B**.
- Mínimo (nulo) cuando la dirección de la velocidad **v** coincide con la dirección de **r** y máximo cuando las direcciones de **v** y **r** son perpendiculares (**r** es el vector de posición del punto donde estudiamos **B** respecto a la carga móvil).

En cuanto a la dirección vieron que era perpendicular al plano determinado por **v** y **r** y el sentido coincide con el de avance de un sacacorchos que gire llevando **v** sobre **r** por el camino más corto (si Q es positiva). La expresión que recoge las observaciones experimentales es la siguiente:

$$\vec{B} = K' \frac{Q(\vec{v} \times \vec{u}_r)}{r^2}$$



donde K', es una constante de proporcionalidad que depende del sistema de unidades elegido y de la naturaleza del medio donde se crea el campo.

En el SI y para el vacío:  $K' = K_0' = \mu_0/4\pi$ , siendo  $\mu_0$  la llamada **permeabilidad magnética del vacío, de valor  $4\pi \cdot 10^{-7}$  (N/A<sup>2</sup>)** en unidades del SI. Para otro medio distinto:  $K' = \mu/4\pi$ .

Para otros medios es muy frecuente expresar la permeabilidad como **permeabilidad relativa**:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} ; \quad \mu = \mu_r \mu_0$$

Podemos clasificar los distintos materiales de acuerdo con su permeabilidad magnética en:

Sustancias ferromagnéticas	Sustancias paramagnéticas	Sustancias diamagnéticas
<p><b>Su permeabilidad es muy superior a la del vacío:</b></p> $\mu_r \gg 1$ <p>Son fuertemente atraídas por los imanes.</p> <p>Son fácilmente imantables y mantienen sus propiedades magnéticas durante cierto tiempo. A veces (caso del acero) se convierten en imanes permanentes.</p> <p>Si se someten a un campo magnético externo el campo en su interior es mayor que el externo.</p> <p>Ejemplos: hierro, acero, cobalto, níquel, neodimio...</p>	<p><b>Su permeabilidad es algo superior a la del vacío:</b></p> $\mu_r \geq 1$ <p>Son débilmente atraídas por los imanes.</p> <p>Aunque son imantables no mantienen sus propiedades magnéticas una vez que se suprime el campo magnético exterior.</p> <p>Si se someten a un campo magnético externo el campo en su interior es prácticamente igual que el externo</p> <p>Ejemplos: aluminio, platino, paladio...</p>	<p><b>Su permeabilidad es inferior a la del vacío:</b></p> $\mu_r \leq 1$ <p>Son débilmente repelidas por los imanes.</p> <p>No son imantables.</p> <p>Si se someten a un campo magnético externo el campo magnético en su interior es menor que el externo.</p> <p>Ejemplos: mercurio, plata, cobre, bismuto, agua...</p>

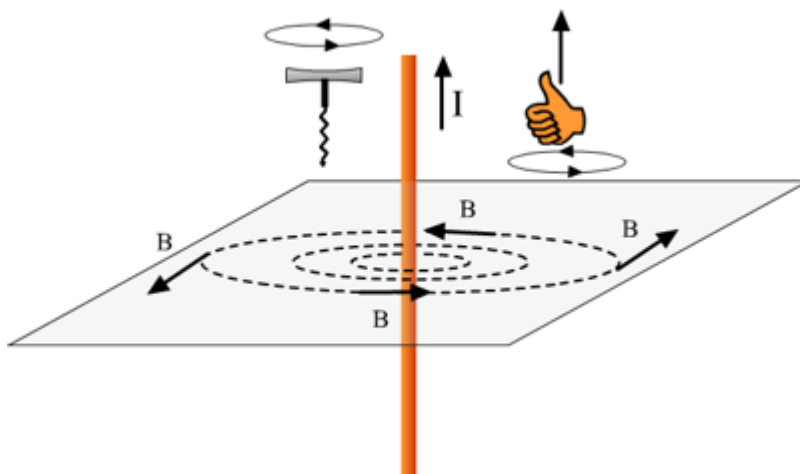
## 5.- CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR CORRIENTES ELÉCTRICAS

### 5.1. Campo magnético creado por una corriente rectilínea

El valor del campo magnético creado por un hilo por el que circula una corriente de intensidad  $I$  en un punto situado a una distancia  $r$  viene dado, por (**fórmula de Biot-Savart**):

$$B = \frac{\mu}{2 \pi} \frac{I}{r}$$

- **Las líneas de campo son circunferencias** concéntricas al hilo, situadas en un plano perpendicular al mismo.
- **El sentido de las líneas de campo** es el de giro de un sacacorchos que avanza en el sentido de la corriente.
- **El vector campo magnético** es tangente a las líneas de campo y de su mismo sentido.
- **La intensidad del campo magnético** es directamente proporcional a la intensidad que circula e inversamente proporcional a la distancia al conductor.



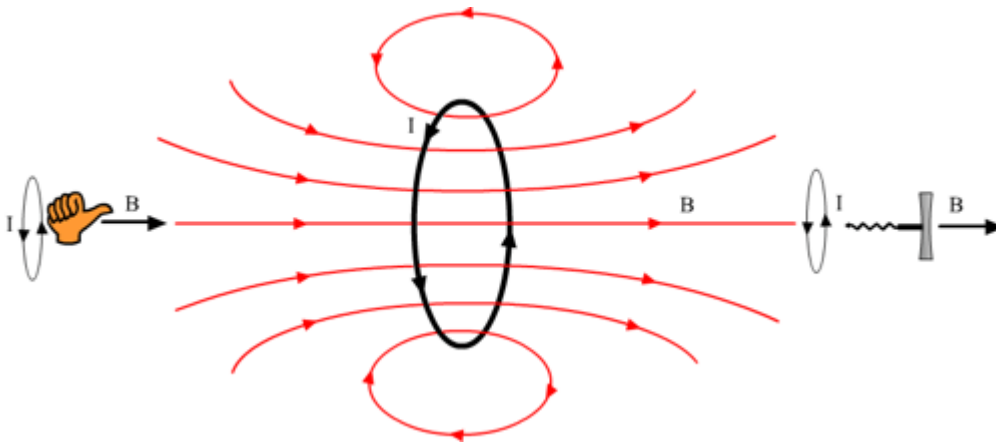
## 5.2. Campo magnético creado en el centro de una espira por la corriente que la recorre

Una espira crea un campo magnético tal como el de la figura. En los puntos situados en el eje de la espira el campo vale:

$$B = \frac{\mu I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

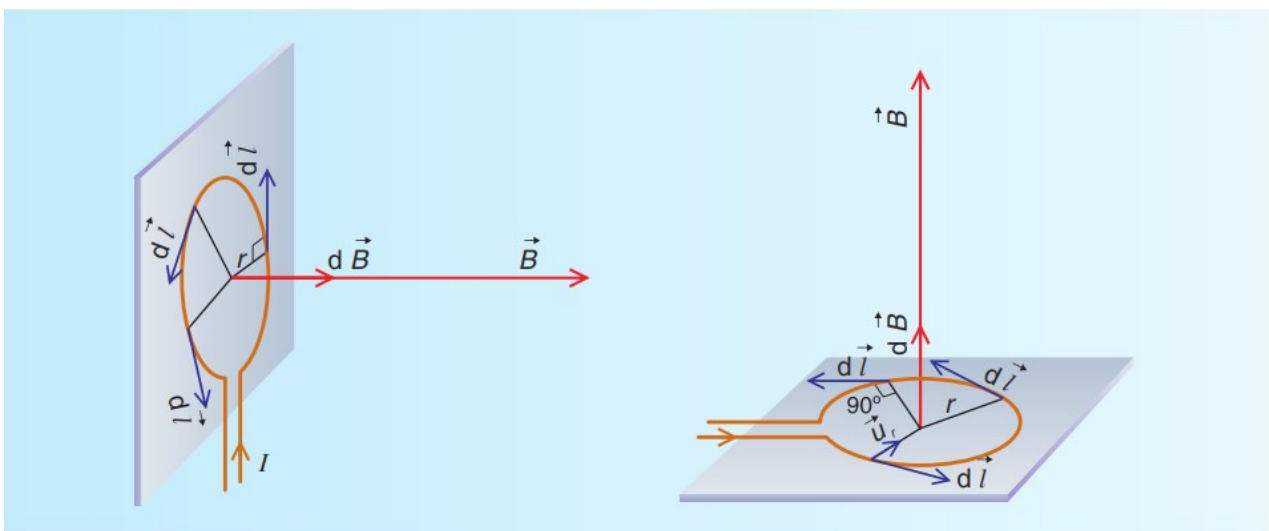
Y en su centro (donde  $x=0$ ):

$$B = \frac{\mu I}{2 R}$$



$$\vec{B} = \int \frac{K' \cdot I \cdot d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

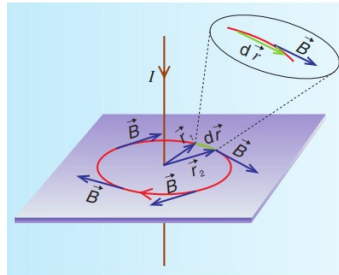
$$B = K' I \int_0^{2\pi r} \frac{dl \sin 90^\circ}{r^2} = \frac{K' \cdot I}{r^2} [l]_0^{2\pi r} = \frac{K' \cdot I}{r^2} 2\pi r = \frac{2\pi K' I}{r}$$



### 5.3. Campo magnético creado por un solenoide. Ley de Ampere

La circulación de la inducción magnética  $\mathbf{B}$  a lo largo de una línea cerrada no es nula, como ocurre en los campos conservativos. El campo magnético  $\mathbf{B}$  no es conservativo:

$$C = \oint \vec{B} \cdot d\vec{r}$$



Calculamos ahora la circulación de  $\mathbf{B}$ , creado por una corriente estacionaria, rectilínea e indefinida,  $I$ , a lo largo de una circunferencia de radio  $r$ , que tiene por centro un punto del conductor.  $\mathbf{B}$  es siempre tangente a la circunferencia elegida en el punto considerado, con que el producto  $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{r}$  es igual a  $B \cdot dr$ . Además  $B$  -módulo de  $\mathbf{B}$  - es constante – recordemos la ley de Biot y Savart:  $B = 2 \cdot K' \cdot I / r$ –, con lo que:

$$C = \oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \oint B \cdot dr = B \int_0^{2\pi r} dr = B \cdot [r]_0^{2\pi r} = B \cdot 2 \cdot \pi \cdot r$$

resultando:

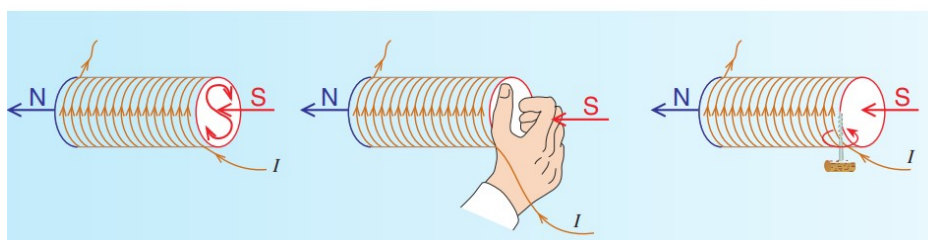
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \frac{2 K' I}{r} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = \frac{2 \frac{\mu}{4\pi} I}{r} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = \mu I$$

Esta expresión se conoce como Ley de Ampère. Si son varias las corrientes ( $I_1, I_2, \dots$ ) encerradas por la línea cerrada, la ley de Ampère es:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu(I_1 + I_2 + \dots)$$

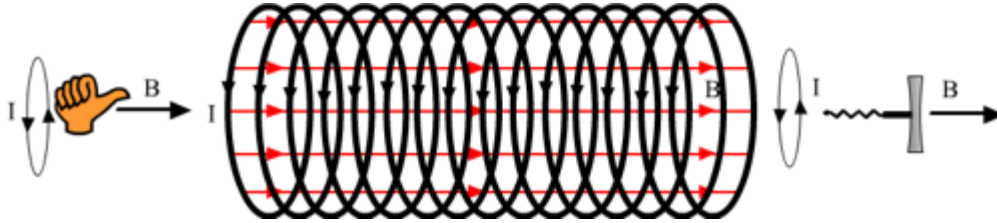
Vemos que la circulación de  $B$  a lo largo de una línea cerrada es distinta de cero, lo que nos dice que el campo magnético es no conservativo. La ley de Ampère es equivalente al teorema de Gauss para el campo eléctrico.

Un solenoide consiste en un gran número de espiras muy próximas, de un hilo conductor, enrolladas alrededor de un cilindro de radio muy pequeño en comparación con su longitud, por las que circula la misma intensidad de corriente. Ya sabemos que una espira recorrida por una corriente  $I$  se comporta como un imán rectilíneo que tiene por tamaño el de la espira. Las caras sur y norte de este imán –espira– son función del sentido de la corriente, pudiendo reconocerlas con la regla de las letras S y N, la regla del sacacorchos o de la mano derecha



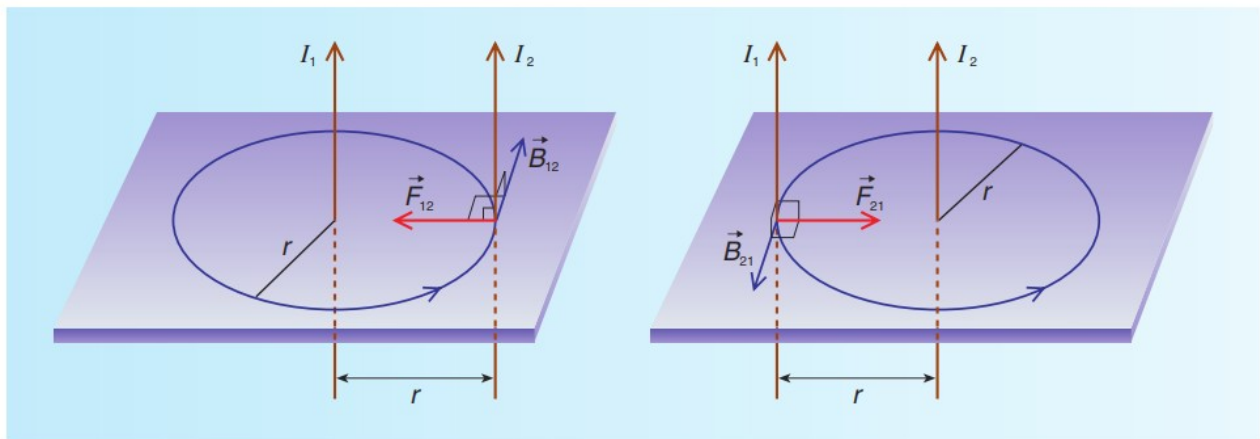
Si consideramos un solenoide largo y con las espiras lo suficientemente juntas, podemos considerar que el campo en el exterior es nulo y uniforme en su interior:

$$B = \frac{N \mu I}{L} \quad B = n \mu I \quad \left( \text{Donde } n = \frac{N}{L} \right)$$



## 6.- FUERZAS MAGNÉTICAS ENTRE CORRIENTES ELÉCTRICAS PARALELAS: DEFINICIÓN DE AMPERE

Ya vimos que una corriente eléctrica crea un campo magnético, que ejerce una fuerza sobre otra corriente eléctrica (cargas en movimiento). Por tanto, si ponemos dos conductores rectilíneos paralelamente y separados una distancia  $r$ , recorridos por las corrientes eléctricas  $I_1$  e  $I_2$ , se observa entre ellos una fuerza atractiva o repulsiva, según que las corrientes tengan el mismo sentido o sentido contrario, respectivamente.



El valor de la fuerza ejercida por el primer conductor sobre el segundo es:

$$\vec{F}_{12} = I_2 \vec{l} \times \vec{B}_{12}$$

siendo  $\vec{B}_{12}$  el valor del campo magnético creado por la corriente  $I_1$  donde se encuentra el segundo conductor, a una distancia  $r$ . Como el campo magnético creado por una corriente rectilínea indefinida  $I_1$  a la distancia  $r$  es:  $B_{12} = 2 \cdot K' \cdot I_1 / r$ , resulta:

$$F_{12} = \frac{2 \cdot K' \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r}$$

De igual manera, el segundo conductor ejerce otra fuerza sobre el primero, siendo de igual valor numérico y dirección y de sentido contrario. La fuerza entre corrientes

eléctricas se utiliza para definir la unidad de intensidad de corriente en el SI, que es el ampere (A).

La fuerza por unidad de longitud es:

$$\frac{F}{l} = \frac{2 \cdot K' \cdot I_1 \cdot I_2}{r}$$

Si sustituimos  $K'$  por su valor en el vacío ( $K_0' = 10^{-7}$  unidad del SI) y  $r$  por 1 m, se define el ampere de la siguiente forma:

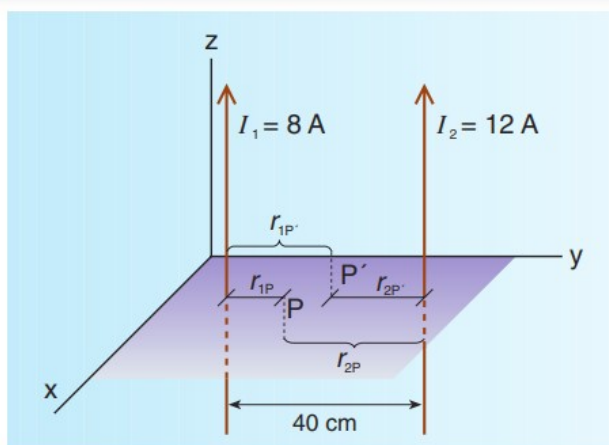
Ampere, A, es la intensidad de corriente eléctrica que, al circular en el mismo sentido por dos conductores rectilíneos, paralelos, indefinidos, separados 1 m y situados en el vacío, se atraen con una fuerza de  $2 \cdot 10^{-7}$  N por metro de longitud.

## EJERCICIO

► Para o caso da figura calcula:

- O punto P para o cal o  $\vec{B}_{\text{total}}$  é nulo.
- O valor de  $\vec{B}$  no punto P', equidistante dos dous condutores.
- A forza magnética, que a corrente  $I_1$  exerce sobre o condutor 2, por unidade de lonxitude.

Nota: os condutores están no baleiro.



### Solución:

$$a) \vec{B}_{\text{total}} = \vec{B}_{1P} + \vec{B}_{2P} = \vec{0} \rightarrow \vec{B}_{1P} = -\vec{B}_{2P}$$

$$\left. \begin{aligned} B_{1P} &= \frac{2 K_0' I_1}{r_{1P}} \\ B_{2P} &= \frac{2 K_0' I_2}{r_{2P}} \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 8}{r_{1P}} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 12}{r_{2P}} \rightarrow r_{1P} = 0,16 \text{ m}$$

$$r_{1P} + r_{2P} = 0,4$$

$$b) \vec{B}_{1P'} = \frac{2 K_0' I_1}{r_{1P'}} \vec{u}_1, \text{ sendo } \vec{u}_1 \text{ o vector unitario de } \vec{B}_{1P'}.$$

$$B_{1P'} = \frac{2 K'_0 I_1}{r_{1P'}} \rightarrow B_{1P'} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 8}{0,2} \rightarrow B_{1P'} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

$$\vec{B}_{1P'} = -8 \cdot 10^{-6} \vec{i} \text{ (T)}$$

$$\vec{B}_{2P'} = \frac{2 K'_0 I_2}{r_{2P'}} \vec{u}_2, \text{ sendo } \vec{u}_2 \text{ o vector unitario de } \vec{B}_{2P'}.$$

$$B_{2P'} = \frac{2 K'_0 I_2}{r_{2P'}} \rightarrow B_{2P'} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 12}{0,2} \rightarrow B_{2P'} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

$$\vec{B}_{2P'} = 12 \cdot 10^{-6} \vec{i} \text{ (T)}$$

$$\vec{B}_{\text{total}} = \vec{B}_{1P'} + \vec{B}_{2P'} \rightarrow \vec{B}_{\text{total}} = -8 \cdot 10^{-6} \vec{i} + 12 \cdot 10^{-6} \vec{i} \rightarrow \vec{B}_{\text{total}} = 4 \cdot 10^{-6} \vec{i} \text{ (T)}$$

$$\text{c) } \vec{F}_{1-2} = I_2 \vec{l} \times \vec{B}_{1-2}$$

$$\vec{B}_{1-2} = \frac{2 K'_0 I_1}{r_{1-2}} \vec{u}_{1-2} \rightarrow \vec{B}_{1-2} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 8}{0,4} (-\vec{i}) \rightarrow \vec{B}_{1-2} = -4 \cdot 10^{-6} \vec{i} \text{ (T)}$$

$$F_{1-2}/l = 12 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot \text{sen } 90^\circ = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ N}$$

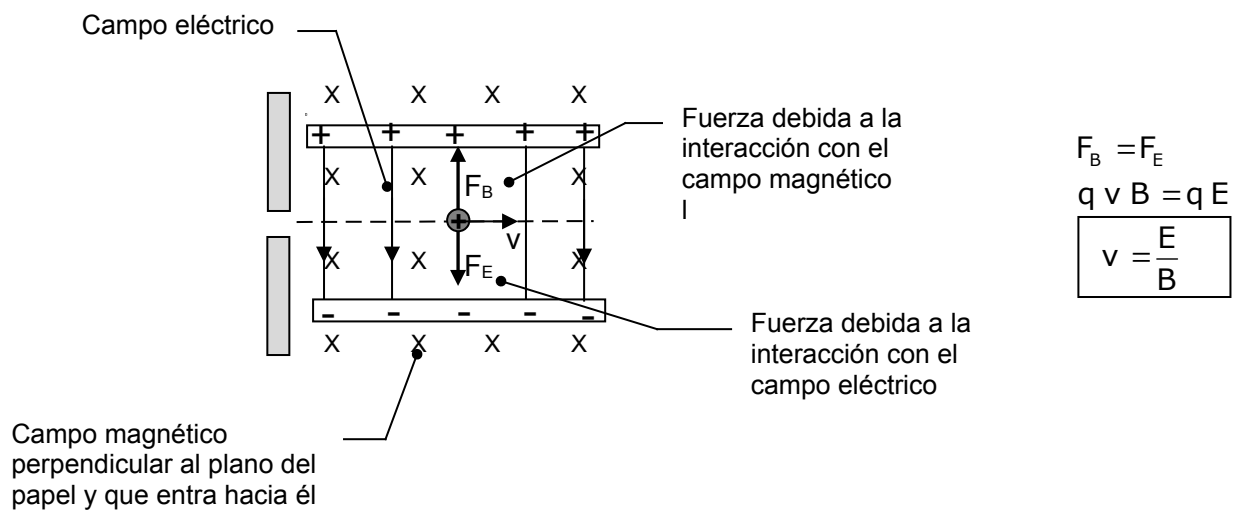
$$\vec{F}_{1-2}/l = -4,8 \cdot 10^{-5} \vec{j} \text{ (N m}^{-1}\text{)}$$

## 7.- APLICACIONES DEL CAMPO MAGNÉTICO

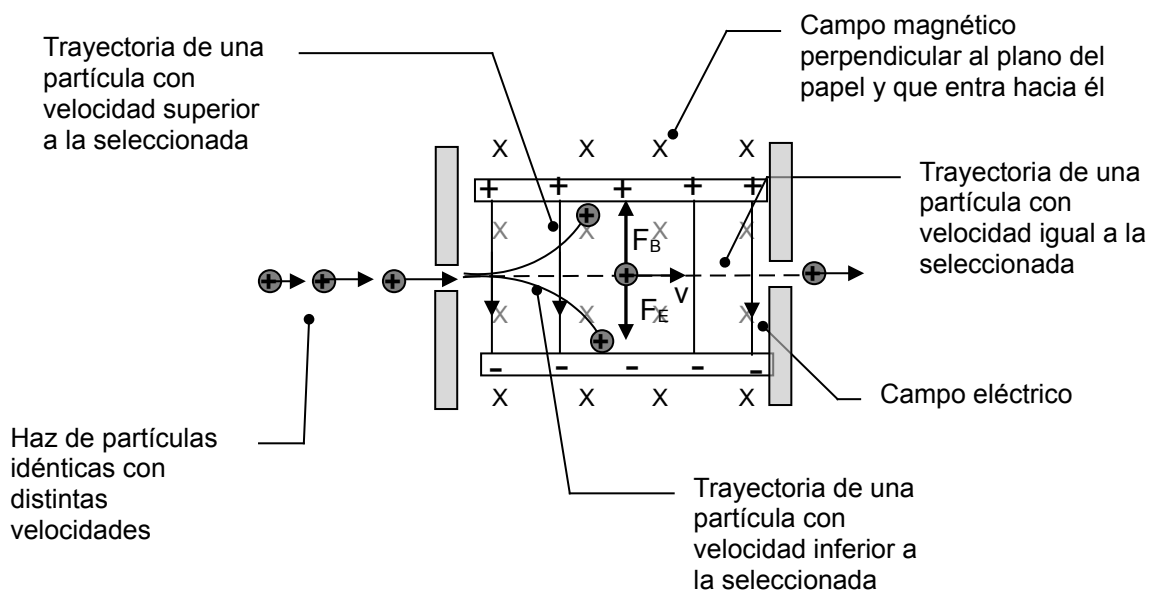
### Selector de velocidades

Como su propio nombre indica el selector de velocidades es un aparato que permite seleccionar haces de partículas con idéntica velocidad.

Su funcionamiento se basa en la interacción de las partículas con campos eléctricos y magnéticos cruzados (perpendiculares). Como se observa en la figura el campo eléctrico ejerce una fuerza hacia abajo y el magnético en sentido justamente opuesto a él. Si regulamos el valor del campo magnético y del eléctrico de forma que  $F_E$  y  $F_B$  sean iguales la carga seguirá una trayectoria recta



Si la velocidad de la partícula es superior a la seleccionada la fuerza magnética será superior a la eléctrica y la trayectoria se curvará hacia arriba. Si ocurre lo contrario la trayectoria se curva hacia abajo impidiendo que estas partículas emerjan del selector.



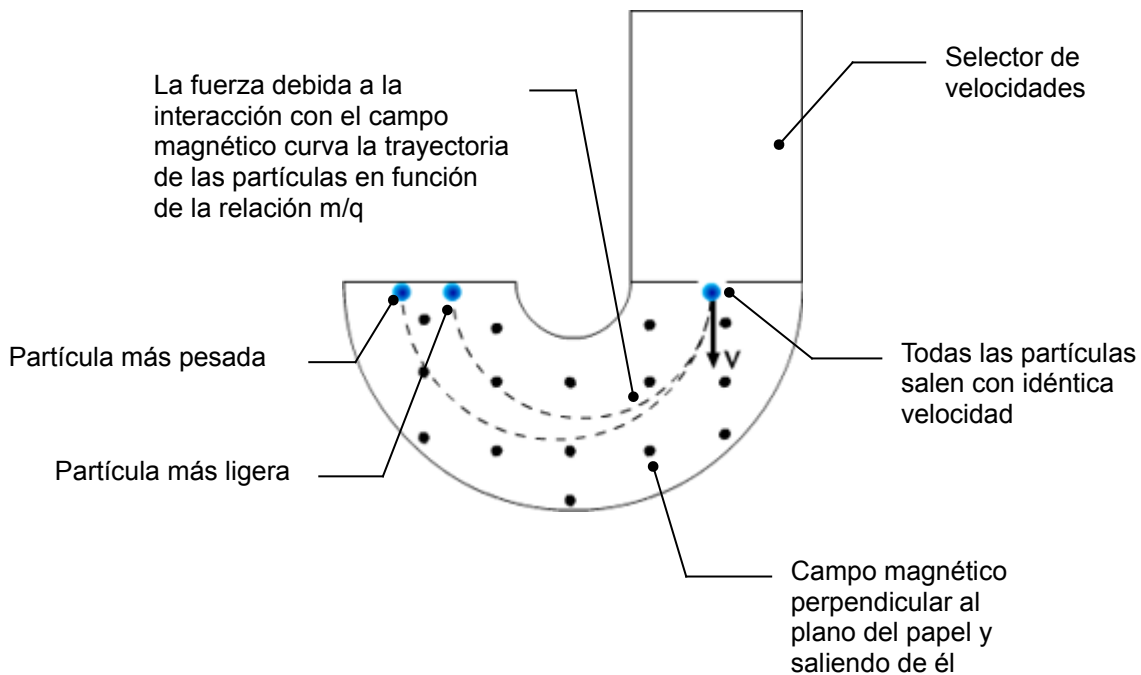
## Espectrógrafo de masas

El espectrógrafo de masas permite separar partículas con idéntica carga y distinta masa (por ejemplo) aprovechando la interacción de las partículas cargadas con un campo magnético perpendicular:

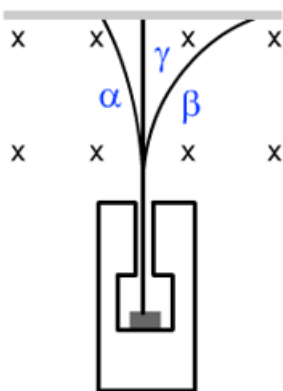
$$F_N = m a_N = m \frac{v^2}{R}$$

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

$$R = \frac{m v}{q B} = \left( \frac{m}{q} \right) \frac{v}{B}$$



El espectrógrafo de masas permite evaluar masas atómicas con gran precisión y la separación de isótopos de un mismo elemento.



Dispositivo usado por Rutherford (en 1903) para analizar la emisión radiactiva del radio.

La aplicación de un campo magnético permitió resolver la radiación en tres tipos distintos que fueron denominados como **radiación alfa, beta y gamma**.

La radiación alfa estaba formada por partículas pesadas y con carga positiva (núcleos de He)

La radiación beta consistía en un chorro de partículas muy ligeras y con carga negativa (electrones)

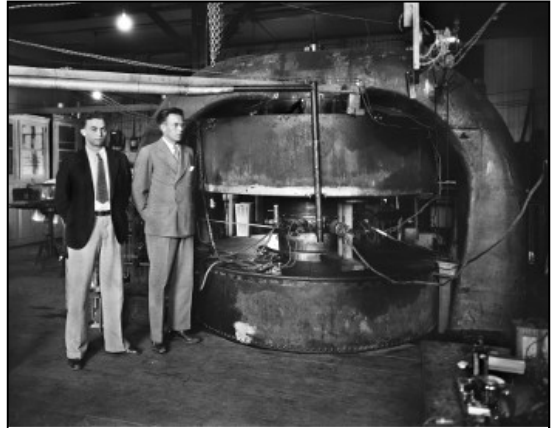
La radiación gamma no poseía ningún tipo de carga, ya que no eran desviadas por el campo magnético.

## Ciclotrón. Sincrotrón

El ciclotrón se usa para acelerar partículas cargadas que después se hacen colisionar con blancos para producir reacciones nucleares u obtener información sobre el interior de los núcleos.

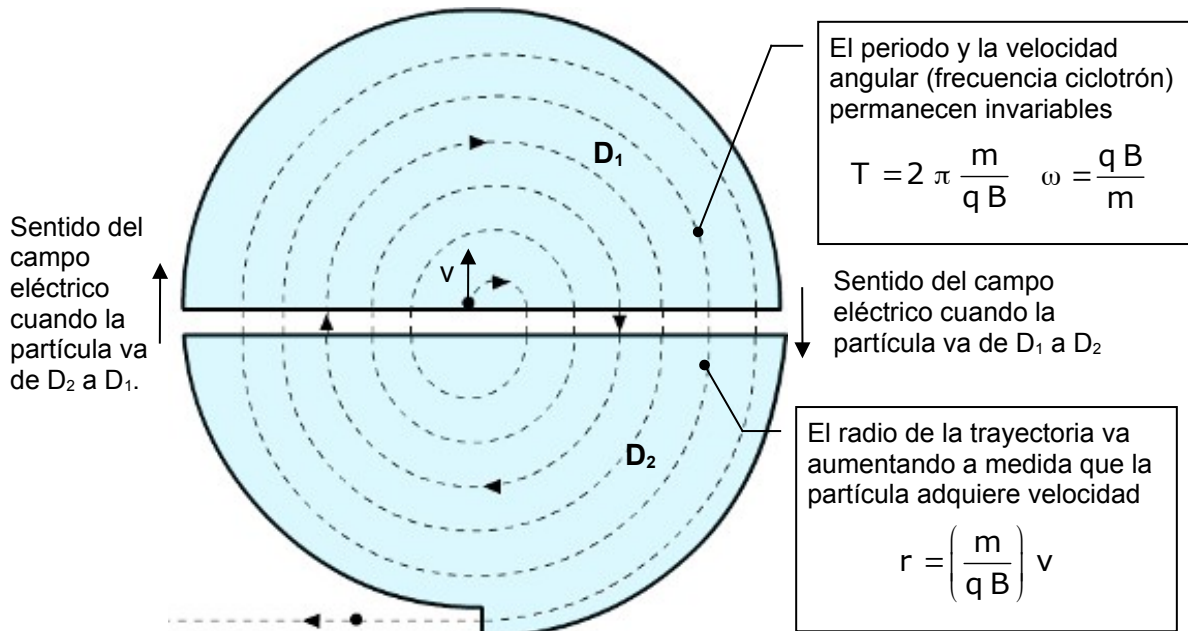
El primer ciclotrón fue construido por E. O. Lawrence (1901-1958) y M.S. Livingston (1905-1986) en 1934 y utiliza campos magnéticos para confinar las partículas y campos eléctricos para acelerarlas.

Las piezas fundamentales de un ciclotrón son las "des" (llamadas así por su forma), dos recipientes metálicos semicirculares (en cuyo interior se ha hecho el vacío), en los que las partículas describen trayectorias circulares de radio creciente. Están situadas entre los polos de un electroimán (en la figura el campo magnético es perpendicular al plano del papel y saliente) y están sometidas a una diferencia de potencial alterna.



Livingston (izquierda) y Lawrence (derecha) y el ciclotrón de 27 pulgadas (1934).

El proceso comienza cuando una partícula con carga (supongamos un protón) se inyecta cerca del centro de una de las des ( $D_1$  en la figura). Debido al campo magnético la partícula curvará su trayectoria describiendo una circunferencia con velocidad angular y periodo independientes de la velocidad lineal de la partícula y del radio de la trayectoria, por lo cual tardará siempre lo mismo en su recorrido:



Cuando sale de la primera D el campo eléctrico entre ambas (en el plano del papel y hacia abajo) la acelera aumentando su energía cinética ( $qV = \frac{1}{2}mv^2$ ). Como consecuencia de ese aumento de velocidad el radio de la trayectoria descrita en  $D_2$  aumentará. Cuando abandona  $D_2$  la polaridad de las des se invierte y el campo eléctrico apuntará ahora hacia arriba incrementando nuevamente su energía cinética.

En un ciclotrón típico el ciclo se repite entre 50 y 100 veces y al final la partícula se eyecta fuera del ciclotrón con la energía deseada.

Si la velocidad que alcanza la partícula no se acerca a la velocidad de la luz los cálculos anteriores son correctos, pero para velocidades próximas a las de la luz deberían de aplicarse consideraciones relativistas, ya que la masa de la partícula irá aumentando al hacerlo su energía. Es necesario entonces sincronizar el periodo de cambio en la polaridad de las des. Los ciclotrones que trabajan teniendo en cuenta esta sincronización reciben el nombre de **sincrotrones**.

## 8. ANALOGÍAS Y DIFERENCIAS ENTRE EL CAMPO ELÉCTRICO Y EL CAMPO MAGNÉTICO

Las analogías que podemos destacar entre los campos eléctrico y magnético son:

- Las partes escalares de los vectores campo eléctrico y campo magnético son inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia que separa el punto donde se calcula el campo del punto donde está el elemento que lo causa.
- La intensidad de la interacción depende del medio.
- Existen dipolos eléctricos y dipolos magnéticos.
- Los dipolos, ya sean eléctricos o magnéticos, si tienen libertad para moverse, se orientan en el sentido del campo.

Las diferencias que subrayamos son:

- La presencia de una carga eléctrica (esté en reposo o en movimiento) dota a la región del espacio en que se encuentra de cierta propiedad, creándose un campo eléctrico. Para que aparezca un campo magnético es necesario que la carga esté en movimiento.
- Una carga eléctrica, ya esté en reposo o en movimiento, situada en un campo eléctrico está sometida a una fuerza eléctrica. Sin embargo, para que sobre una carga que está en un campo magnético actúe una fuerza magnética es necesario que la carga esté en movimiento.
- El campo eléctrico es un campo de fuerzas centrales. Por lo contrario, el campo magnético no es central: en un punto la dirección del vector intensidad de campo no coincide con la dirección que une ese punto con el elemento que lo crea (su dirección es perpendicular a la dirección radial).
- El campo eléctrico es conservativo y se define una energía potencial eléctrica y un potencial eléctrico (y la variación del potencial permite obtener el valor de la intensidad de campo). Estas magnitudes no se pueden definir en el campo magnético porque no es conservativo.
- La fuerza eléctrica tiene la dirección del vector campo eléctrico (es radial), mientras que la fuerza magnética es perpendicular al vector campo magnético.
- En el campo eléctrico las líneas de campo son líneas de fuerza (tienen la dirección de la fuerza eléctrica) y son abiertas, es decir: empiezan en algún punto y terminan en algún otro. En el campo magnético las líneas de campo no son líneas de fuerza, ya que no tienen la dirección de la fuerza magnética; se llaman líneas de inducción y son cerradas.
- En el campo magnético el flujo a través de una superficie cerrada es nulo, mientras que en el campo eléctrico se obtiene con la expresión  $Q/\epsilon$ .

- En el campo eléctrico la intensidad de la interacción es mayor en el vacío que en los medios materiales, mientras que en el campo magnético, según el tipo de material, puede ser mayor o menor que en el vacío.
- Existen cargas eléctricas separadas (+ o -) pero los polos magnéticos son inseparables. Hacemos la comparación de las expresiones de distintas magnitudes correspondientes a ambos campos:

	CAMPO ELÉCTRICO	CAMPO MAGNÉTICO
FUERZA	$\vec{F} = Q \vec{E}$	$\vec{F} = Q \vec{v} \cdot \vec{B}$
INTENSIDAD DE CAMPO	$\vec{E} = k \frac{Q}{r^2} \vec{u}_r$	$\vec{B} = K \frac{Q \vec{v} \times \vec{u}_r}{r^2}$
CIRCULACIÓN	$C = \oint \vec{E} \cdot d\vec{r} = 0$	$C = \oint \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu I$
FLUJO	$\Phi_{S \text{ pechada}} = \frac{Q}{\epsilon}$	$\Phi_{S \text{ pechada}} = 0$