	INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA CAMPO MAGNÉTICO	IES La Magdalena. Avilés. Asturias

Desde muy antiguo es conocida la curiosa propiedad del *imán natural* o ***magnetita*** [1] (mineral de hierro integrado, fundamentalmente, por Fe_3O_4) de atraer pequeños trozos de hierro o acero.

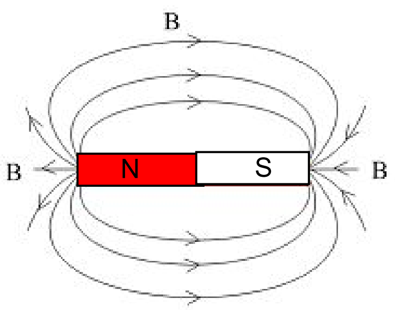
Posteriormente se observó que algunos metales, particularmente el hierro y el acero, podían transformarse en imanes obteniéndose de esta manera los *imanes artificiales.*

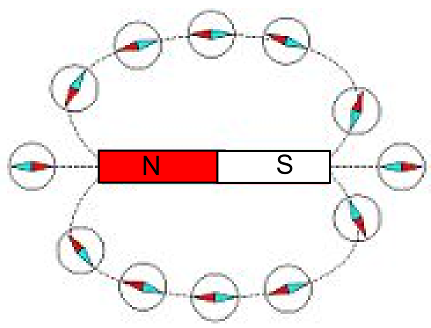
Del estudio de los imanes, y de su efecto asociado, el magnetismo, podemos extraer algunos datos importantes:

- 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 puedan asociárseles un tipo de magnetismo N o S. ***Los cuerpos magnetizados siempre presentan ambos polos.***

> Un imán (de forma similar a lo que ocurre con una masa o una carga eléctrica) produce una alteración de las propiedades del medio que lo rodea, de forma tal que si se coloca otro imán en sus proximidades, éste "siente" una acción (fuerza). Podemos entonces decir que origina un ***campo magnético (B).***

- 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.





La orientación de una aguja imantada en las proximidades de un imán nos suministra información acerca de la forma de las líneas del campo magnético.

---

(1) El nombre proviene de ***Magnesia*** (actual Turquía asiática) donde el mineral era muy abundante.

(2) La aguja imantada no apunta exactamente al Norte geográfico, ya que existe una desviación entre este punto y el denominado norte magnético que se conoce como ***declinación magnética***. La declinación varía, entre otras cosas, con la latitud. Para Avilés (Asturias) la declinación magnética vale 2^0 28 ' W, lo que significa que una brújula apunta 2^0 28 ' a la izquierda del Norte (geográfico).

Campo magnético y cargas

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

Valor del campo magnético

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

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

Valor de la carga

Producto vectorial

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.

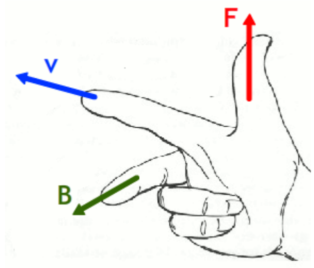
Sentido: el del sacacorchos que gira del primen al segundo vector por el camino más corto.

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

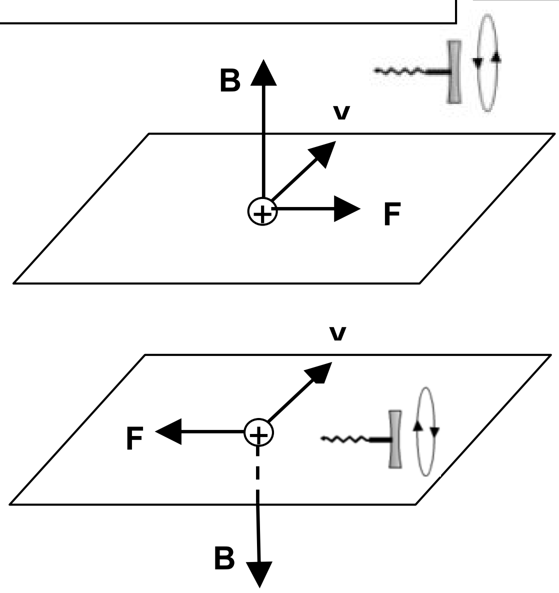
- Que si la carga se desplaza en la misma dirección del campo no experimentará fuerza alguna.
- Que la fuerza adquirirá su máximo valor cuando la carga se mueva en dirección perpendicular al campo (F = q v B)

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

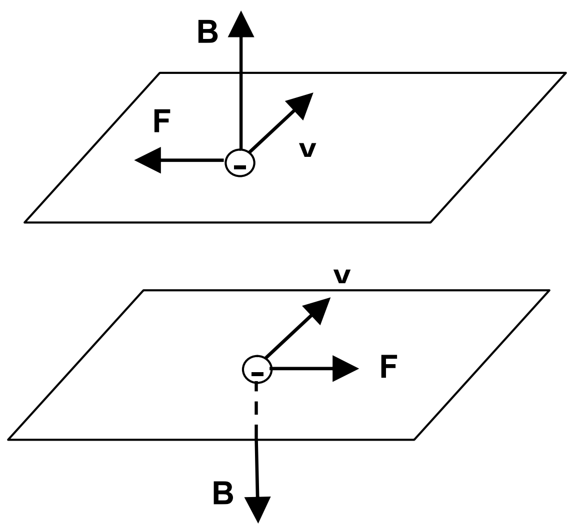
Su sentido es de un sacacorchos que gira de v a B por el camino más corto, si la carga es positiva. Si la carga es negativa, su sentido es opuesto.



Regla de la mano derecha



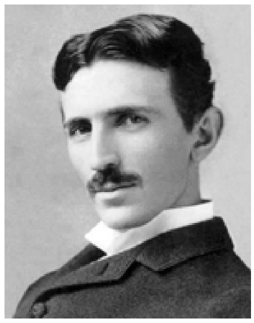
Dirección y sentido del vector fuerza para una carga ***positiva*** que se desplaza con velocidad v



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

Teniendo en cuenta lo anterior podemos definir la unidad de campo magnético en el S.I. llamada ***tesla (T).***

> ***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):

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

$$\text{Unidad S.I : Tesla} = kg.\ A^{-1}\ s^{-2} = \frac{N}{C\ m/s} = \frac{N}{A\ m}$$

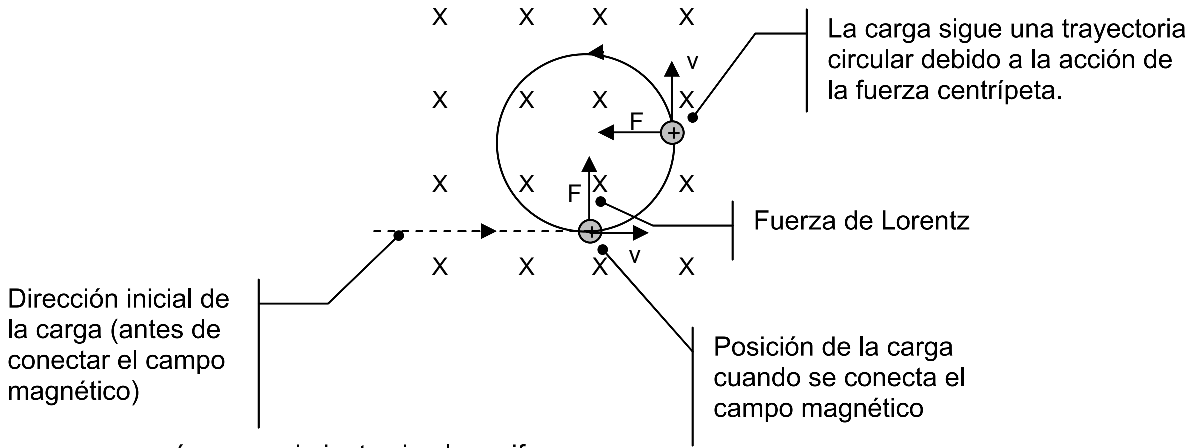
En la práctica el tesla resulta ser una unidad demasiado grande por lo que frecuentemente se emplea el ***gauss (G): 1 T = 10^4^ G.***

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:

$$\boxed{F = q\,.\left(\vec{v} \wedge \vec{B} + \vec{E}\right)}$$

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:

$$F_N = m\,a_N$$

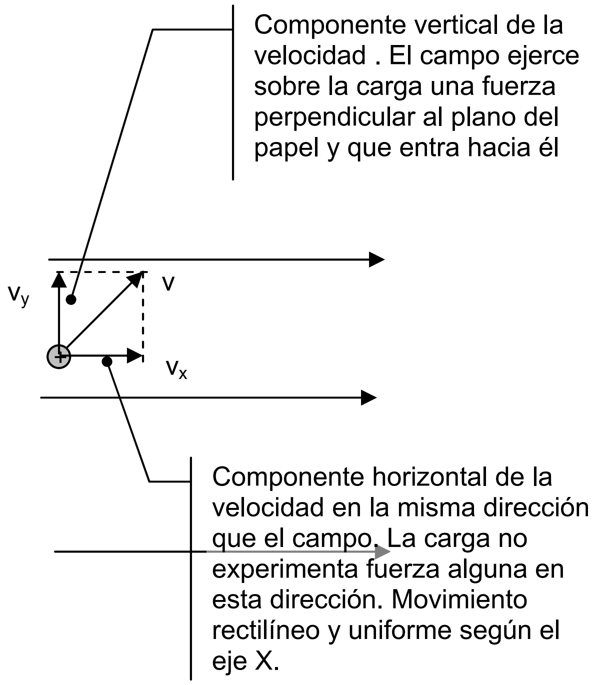
$$q\,v\,B = m\,\frac{v^2}{R}$$

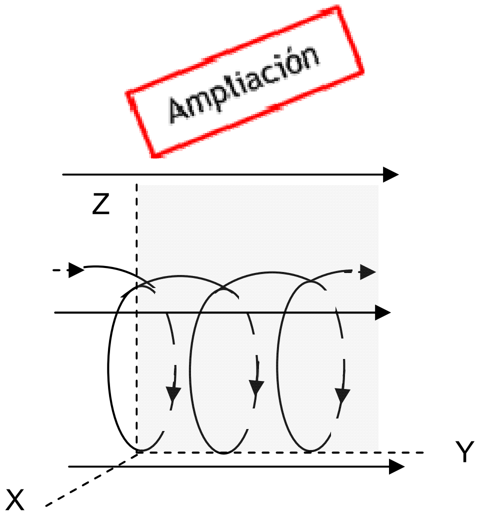
$$R = \frac{m\,v}{q\,B} = \left(\frac{m}{q\,B}\right) v$$

$$v = \omega\,R\ ;\ \omega = \frac{v}{R} = \frac{\frac{R\,q\,B}{m}}{R} = \frac{q\,B}{m}$$

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

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

Ejemplo 1 (Oviedo 2009-2010)

De acuerdo con la ley de Lorentz, ¿qué velocidad debería llevar una partícula cargada para que la fuerza máxima que ejerce sobre ella un campo magnético de 0,15 T sea igual a la que produce un campo eléctrico de 2 kN/C?

Solución:

El valor (módulo) de la fuerza de Lorentz depende del ángulo que el vector velocidad forme con el vector campo magnético, siendo su valor máximo cuando el ángulo formado son 90^0:

$$\vec{F} = q\,.\,\vec{v} \wedge \vec{B}$$
$$F = q\,v\,B\,\mathrm{sen}\,\alpha$$
$$F_{MAX} = q\,v\,B$$

El valor de la fuerza debida a la interacción de la carga con el campo eléctrico viene dada por:

$$F_E = q\,E$$

Por tanto:

$$(F_{MAX})_{mag} = F_E$$
$$q\,v\,B = q\,E$$
$$v = \frac{E}{B} = \frac{2\;10^3\,\frac{\cancel{N}}{\cancel{C}}}{0,15\,\frac{\cancel{N}}{\cancel{C}\,m\,s^{-1}}} = 13\,333,3\,\frac{m}{s}$$

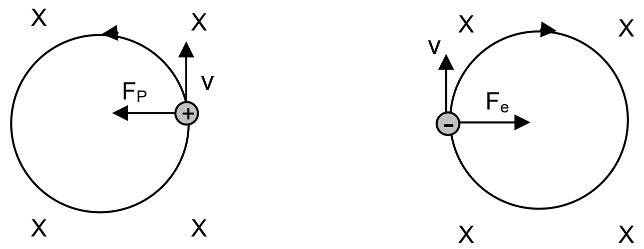
Ejemplo 2 (Oviedo 2006-2007)

En una región del espacio donde existe un campo magnético uniforme, se observa la existencia de un electrón y un protón que tienen trayectorias circulares con el mismo radio. ¿Serán también iguales los módulos de sus velocidades lineales? ¿Recorrerán sus trayectorias con el mismo sentido de giro? Razona tus respuestas.

Datos $Q_P = 1{,}6\ 10^{-19}$ C; $Q_e = 1{,}6\ 10^{-19}$ C; $m_P = 1{,}67\ 10^{-27}$ kg; $m_e = 9{,}1\ 10^{-31}$ kg;

Solución:

Aplicando la expresión que nos da la fuerza de Lorentz: $F = q\ \vec{v} \wedge \vec{B}$, deducimos que para que la trayectoria sea circular la velocidad y el campo magnético han de ser perpendiculares. Además, y debido a que tienen carga de signo opuesto, las trayectorias del protón y del electrón deberán curvarse en sentido contrario:



El radio de la trayectoria lo obtendremos aplicando la ecuación que regula la dinámica del movimiento circular uniforme:

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

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

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

Por tanto si ambos radios son iguales tendremos, y teniendo en cuenta que sus cargas son (en valor absoluto) iguales, tendremos:

$$\left.\begin{aligned} R_P &= \left(\frac{m_P}{q_P\ B}\right) v_p \\ R_e &= \left(\frac{m_e}{q_e\ B}\right) v_e \end{aligned}\right\} \frac{m_P}{q_P\ B} v_p = \frac{m_e}{q_e\ B} v_e$$

$$v_p\ m_P = v_e\ m_e$$

$$v_p = \frac{m_e}{m_P}\ v_e = \frac{9{,}1\ 10^{-31}\ kg}{1{,}67\ 10^{-27}\ kg} v_e = 5{,}5\ 10^{-4}\ v_e$$

$$v_p = 5{,}5\ 10^{-4}\ v_e$$

Ejemplo 3 (Oviedo 2003-2004)

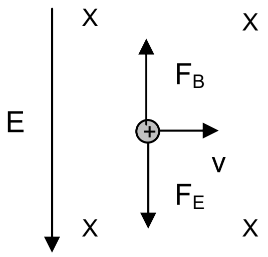
En una región del espacio coexisten un campo eléctrico y otro magnético, ambos uniformes y con líneas de campo perpendiculares entre sí, cuyas magnitudes respectivas son E = 3,4 10^{4} V/m y B = 2 10^{-2} T. Si en esta región se observa que una carga Q que se mueve con velocidad constante v y con una trayectoria perpendicular a las líneas de campo magnético, se pide:

a) Representar gráficamente las orientaciones relativas de los vectores E, v y B.

b) Calcular la velocidad de la carga

Solución:

Suponemos que la carga considerada tiene signo positivo. Para que mantenga una trayectoria rectilínea en el seno de un campo eléctrico y otro magnético cruzados, deberá de cumplirse que las fuerzas resultantes de la interacción con ambos campos sean iguales y de sentidos contrarios:



$$F_B = F_E$$

$$q\,v\,B = q\,E$$

$$v = \frac{E}{B} = \frac{3,4\;10^{4}\;\frac{\cancel{N}}{\cancel{C}}}{2\;10^{-2}\;\frac{\cancel{N}}{\cancel{C}\;m\;s^{-1}}} = 1,7\;10^{6}\;\frac{m}{s}$$

Ejemplo 4 (Oviedo 2001)

Un protón de masa 1,67 10^{-27} kg y carga 1,6 10^{-19} C se mueve según una trayectoria circular estable debido a la acción de un campo magnético de 0,4 T. Deducir la expresión de la frecuencia de dicho movimiento circular y calcular su valor numérico en este caso.

Solución:

El campo magnético suministra la fuerza centrípeta necesaria para que exista una trayectoria circular:

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

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

$$v = \frac{q}{m}\,R\,B$$

Para un movimiento circular uniforme:

$$v = \omega\,R\;;\;\omega = \frac{v}{R} = \frac{\frac{q\,R\,B}{m}}{R} = \frac{q}{m}\,B$$

Como :

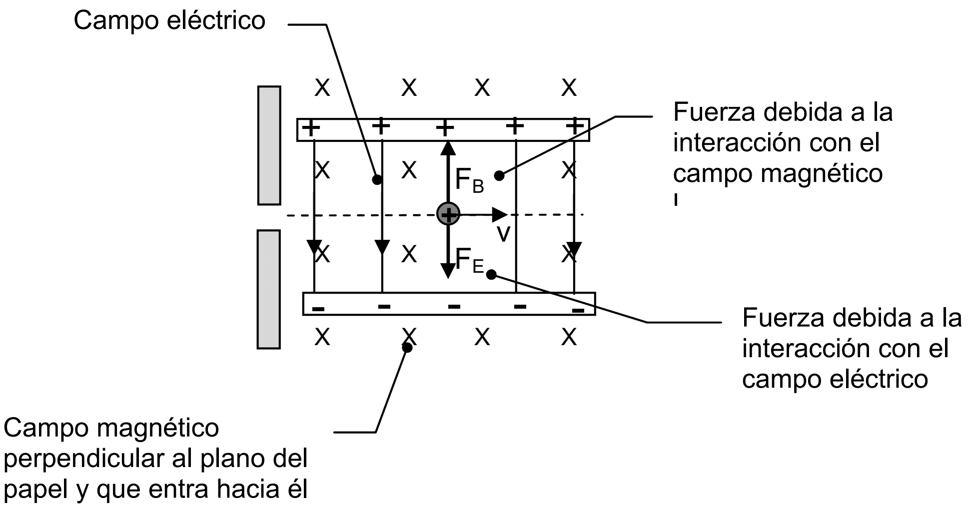
$$\omega = 2\,\pi\,f\;;\;f = \frac{\omega}{2\,\pi} = \frac{\frac{q}{m}\,B}{2\,\pi} = \frac{q\,B}{2\,\pi\,m}$$

$$f = \frac{q\,B}{2\,\pi\,m} = \frac{1,60\;10^{-19}\;\cancel{C}\;0,4\;\frac{N}{\cancel{C}\;m\;s^{-1}}}{2\,\pi\,1,67\;10^{-27}\;kg} = 3,83\;10^{7}\,s^{-1} = 3,83\;10^{7}\,Hz$$

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

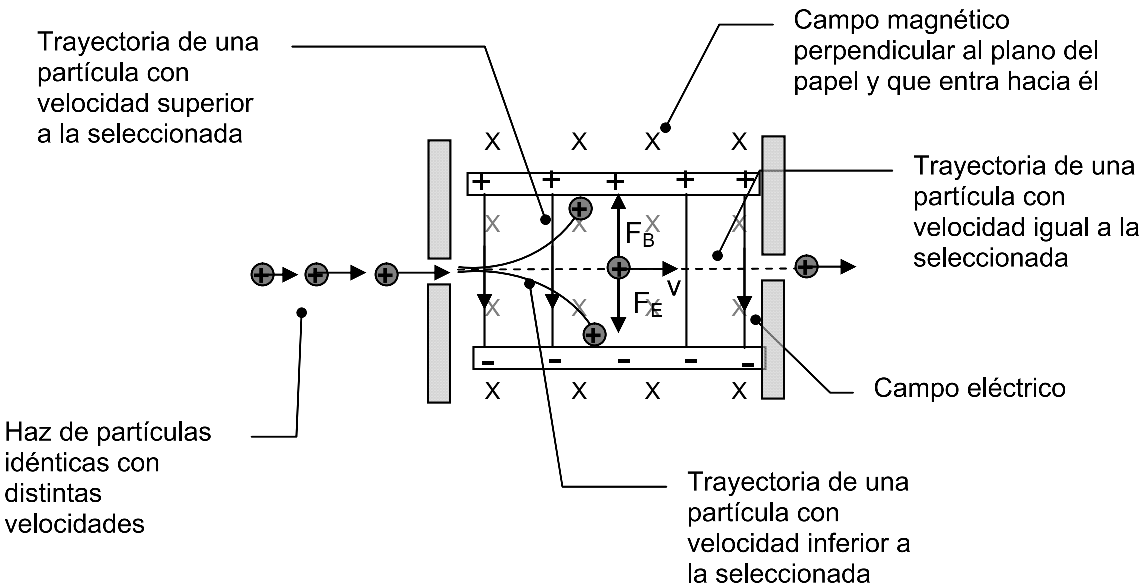


$$F_B = F_E$$

$$q\,v\,B = q\,E$$

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

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 los contrario la trayectoria se curva hacia abajo impidiendo que estas partículas emerjan del selector.



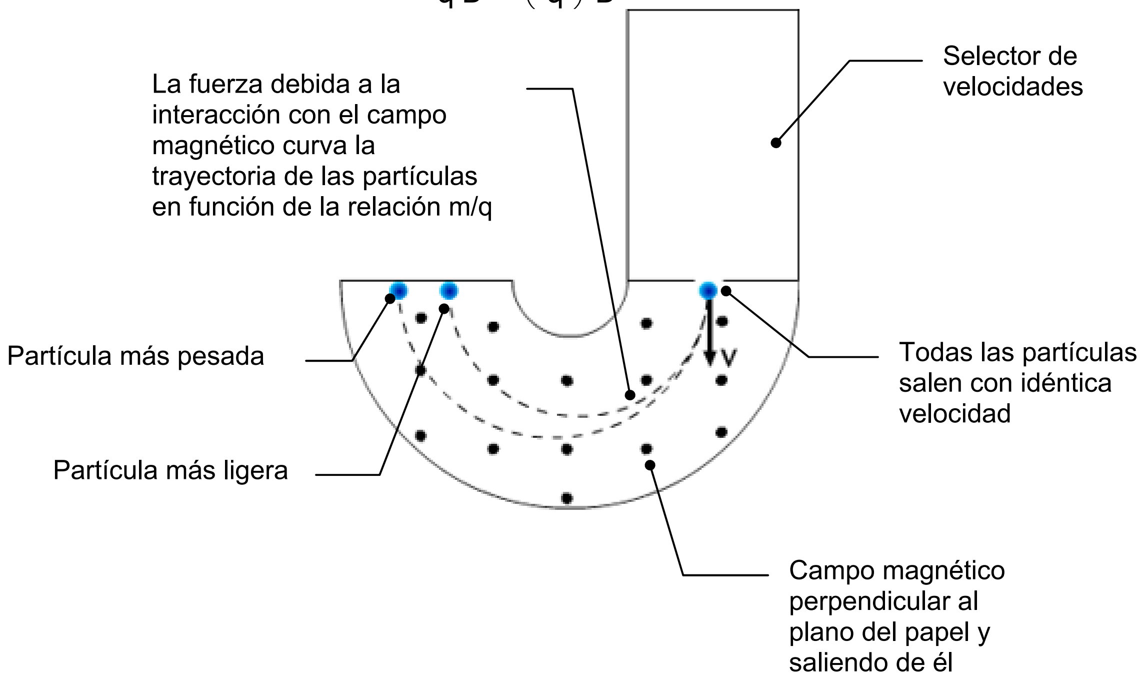
Espectrógrafo de masas

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:

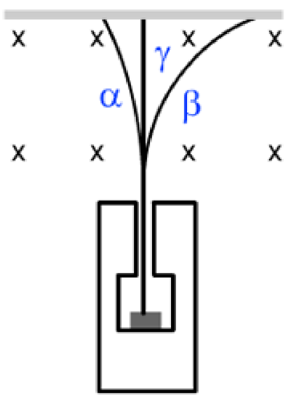
$$F_N = m\,a_N = m\,\frac{v^2}{R}$$

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

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



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)

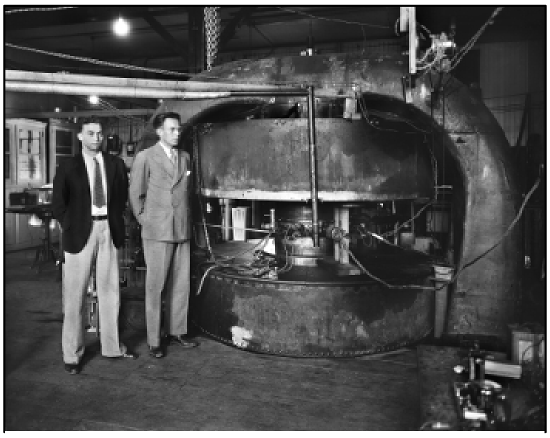
La radiación beta consistía en un chorro de partículas muy ligeras y con carga negativa (electrones)

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

Ciclotrón. Sincrotrón

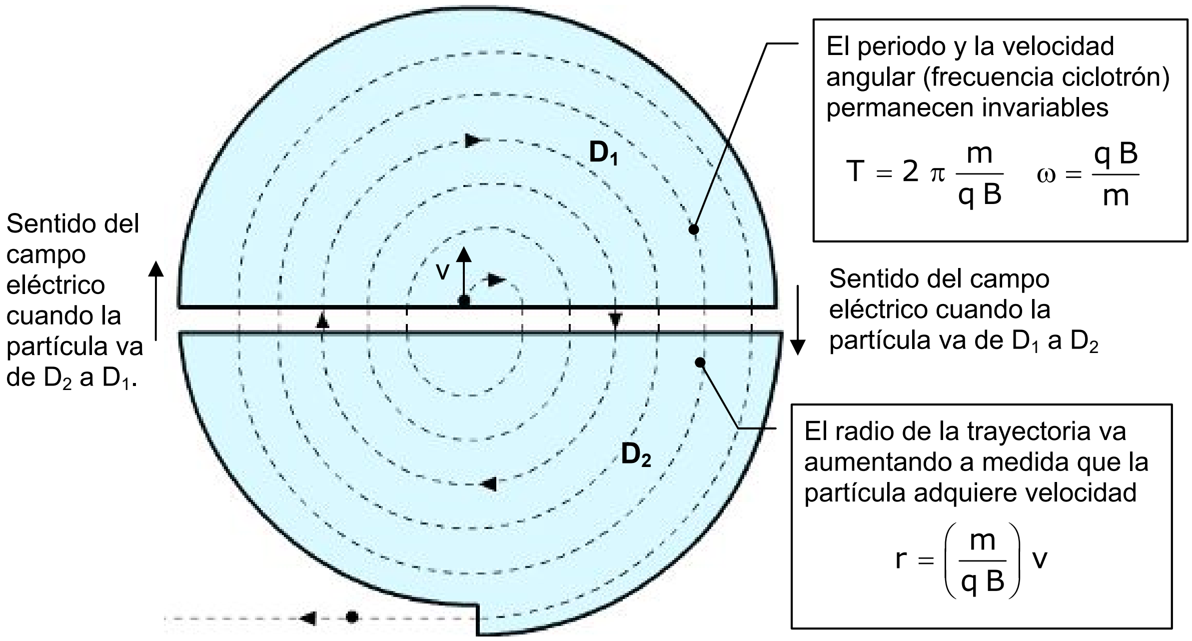
El ciclotrón se usa para acelerar partículas cargadas que después se hacen colisionar con blancos para producir reacciones nucleares u obtener información sobre el interior de los núcleos.

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.


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

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.

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 ($q\,V = \frac{1}{2}\,m\,v^2$). 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***.