

---

# INTERACCIÓN MAGNÉTICA

---

## 1.- Introducción

En el tema "Interacción eléctrica" se han estudiado varios aspectos de la Electrostática como son las fuerzas entre cargas eléctricas en reposo y su descripción en términos del campo eléctrico y del potencial. Ahora consideraremos las acciones que sufren las cargas en movimiento. Además de la fuerza representada por el campo eléctrico, una carga en movimiento puede experimentar una fuerza adicional, llamada fuerza magnética, cuando está en presencia de otras cargas en movimiento o de imanes. Las fuerzas magnéticas también se describen convenientemente en términos de un campo vectorial -el campo magnético- a través del cual se puede obtener la fuerza que se ejerce en cualquier punto del espacio sobre una carga en movimiento o sobre una corriente eléctrica.

El origen del conocimiento de la interacción magnética hay que buscarlo varios siglos antes de Cristo, cuando el hombre observó que existen ciertos minerales de hierro, cobalto o manganeso que tienen la propiedad de atraer pequeños trozos de hierro. A esta propiedad se le dió el nombre de magnetismo. La palabra **magnetismo** viene de la región de Magnesia en el Asia Menor, que es uno de los lugares donde se encontraban esos materiales, en particular la **magnetita**. Un material de esta clase recibe el nombre de **imán**, siendo el efecto más pronunciado en ciertas zonas del imán denominadas **polos magnéticos**.

La utilización de una aguja imantada como brújula en navegación se remonta a la Edad Media. Una aguja delgada de acero una vez imantada, es decir, puesta un cierto tiempo en las proximidades de un imán, si se suspende de un hilo de seda, lejos de cualquier imán o de cualquier corriente eléctrica, se orienta en una dirección fija y la conserva dentro de un amplio dominio del espacio. Este hecho nos permite, por una parte, distinguir los extremos de la aguja, o polos; norte y sur, según la orientación que ésta tome en relación a los polos geográficos de la Tierra; y por otra parte, confirmar que la misma Tierra se comporta como un imán.

Existen, pues, dos clases de polos magnéticos que se designan por norte (*N*) y sur (*S*), cumpliéndose que:

*"La interacción entre polos magnéticos del mismo nombre es repulsiva y la interacción entre polos de distinto nombre es atractiva (figura 1)".*

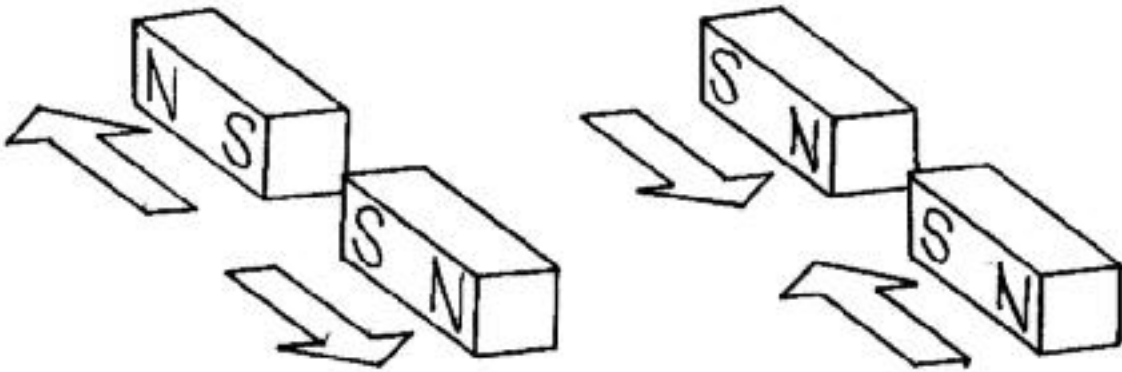


Figura 1

Todo imán tiene un polo norte y un polo sur, de la misma intensidad. Al dividir un imán aparecen dos polos iguales y opuestos en la zona de rotura, de modo que se obtienen dos imanes, ambos con polos de la misma intensidad y de distinta naturaleza (figura 2). Aunque ha sido posible aislar cargas eléctricas positivas y negativas y asociar una carga eléctrica definida con las partículas fundamentales que constituyen todos los átomos, no ha sido posible aislar un polo magnético o identificar una partícula fundamental que tenga sólo una clase de magnetismo, sea el *N* o el *S*. Los cuerpos magnéticos siempre presentan pares de polos iguales y opuestos. Esto se describe con frecuencia diciendo que no existen cargas magnéticas libres o monopolos magnéticos o, al menos, no han sido encontrados.



Figura 2

Aunque la Electricidad y el Magnetismo se desarrollaron paralela e independientemente, el año 1820 representó una fecha crucial para ambos, pues Oersted demostró experimentalmente que existía una relación clara entre los fenómenos eléctricos y magnéticos. Descubrió que una varilla imantada, que podía girar libremente, se desviaba al pasar la corriente eléctrica por un conductor próximo. Es decir, una corriente eléctrica produce efectos magnéticos cambiando la orientación de la varilla imantada. El propio Oersted acuñó el término "**Electromagnetismo**" para la rama de la Física que englobaría desde entonces la Electricidad y el Magnetismo. Experimentos subsiguientes realizados por Ampère demostraron que también dos corrientes eléctricas interactúan, atrayéndose o repeliéndose los respectivos conductores. Ampère propuso la teoría de que las corrientes eléctricas son la causa de todos los fenómenos magnéticos.

En la actualidad se reconoce, en general, que todos los efectos magnéticos observados se deben al movimiento de la carga eléctrica, como en una corriente eléctrica, y a ciertas propiedades magnéticas intrínsecas de los constituyentes microscópicos de la materia, sobre todo las que se asocian con el spín del electrón.

En lo que sigue nos ocuparemos fundamentalmente de describir los efectos magnéticos debidos a las cargas en movimiento.

Podemos concluir diciendo que:

- Las interacciones eléctrica y magnética están íntimamente relacionadas, siendo en realidad sólo dos aspectos diferentes de una misma propiedad de la materia: su **carga eléctrica**. El magnetismo es un efecto del movimiento de las cargas eléctricas.
- Las interacciones eléctrica y magnética deben considerarse bajo la descripción más general de **interacción electromagnética**.

En cuanto a las aplicaciones tecnológicas importantes del magnetismo, éstas son muchas. Por ejemplo, se usan grandes electroimanes para levantar cargas pesadas. También se usan imanes en instrumentos de medida, transformadores, motores, etc. De manera ordinaria se utilizan cintas magnéticas para grabación de sonido y televisión, y en las memorias de los ordenadores. En la actualidad, se están utilizando intensos campos magnéticos generados por

imanes superconductores como un medio para confinar "plasmas" (calentados a temperaturas del orden de  $10^8$  K), los cuales se usan en la investigación de la fusión controlada.

En el tema INTERACCION MAGNETICA se estudia la fuerza magnética que actúa sobre una partícula cargada en movimiento situada en el seno de un campo magnético. Los campos magnéticos que aparecerán a lo largo del tema serán estacionarios.

Los principios básicos de un cierto número de dispositivos, que incluyen el espectrómetro de masas, el ciclotrón, etc., pueden explicarse en función de esta **fuerza magnética**. No nos preocuparemos, sin embargo, de cual es la causa de los campos magnéticos que afectan a esas cargas y corrientes, cuestión que se aborda en el tema siguiente "Corrientes eléctricas".

Por tanto, centraremos nuestro interés en:

- Saber si en una región del espacio existe o no un campo magnético.
- Estudiar como afecta ese campo magnético a las cargas que se encuentran en esa región.
- Mostrar algunas aplicaciones de la fuerza magnética sobre cargas en movimiento.

## **2.- Fuerza magnética sobre una carga en movimiento. Definición del campo magnético**

Cuando se estudió la Electroestática considerábamos la región del espacio cercana a las partículas cargadas como si se modificara en virtud de la existencia de un campo eléctrico. De modo similar, consideramos que existe un **campo magnético** en cada punto del espacio cercano a un imán o una corriente eléctrica. Podemos decir, por analogía con los casos gravitacional y eléctrico, que un imán o una corriente eléctrica producen un campo magnético en el espacio que los rodea.

Se definió el campo eléctrico **E** en un punto del espacio como la fuerza eléctrica por unidad de carga que actúa sobre una carga de prueba colocada en ese punto. También vamos a

intentar definir el campo magnético -que es un campo vectorial que representaremos por un vector  $\mathbf{B}$ -, en algún punto del espacio, en términos de la fuerza magnética que se ejerce sobre un objeto de prueba apropiado. Cuando colocamos una carga en reposo en un campo magnético, no actúa sobre ella fuerza alguna; pero cuando la carga eléctrica se mueve en una región donde hay un campo magnético, se observa una nueva fuerza sobre la carga además de las debidas a sus interacciones gravitacional y eléctrica. El objeto de prueba para definir el campo magnético  $\mathbf{B}$  será una carga puntual  $q$  que se mueve con una velocidad  $\mathbf{v}$ .

Los experimentos realizados sobre el movimiento de diversas partículas cargadas que se desplazan en un campo magnético están de acuerdo con la siguiente ecuación para la fuerza  $\mathbf{F}$  sobre la partícula de carga  $q$  que se mueve con velocidad  $\mathbf{v}$  en una región donde hay un campo magnético,  $\mathbf{B}$ :

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

Esta expresión es experimental, constituye una definición operacional del campo magnético, y se basa en los experimentos que incluyen la observación de las trayectorias de partículas cargadas que se desplazan por la región donde existe el campo magnético.

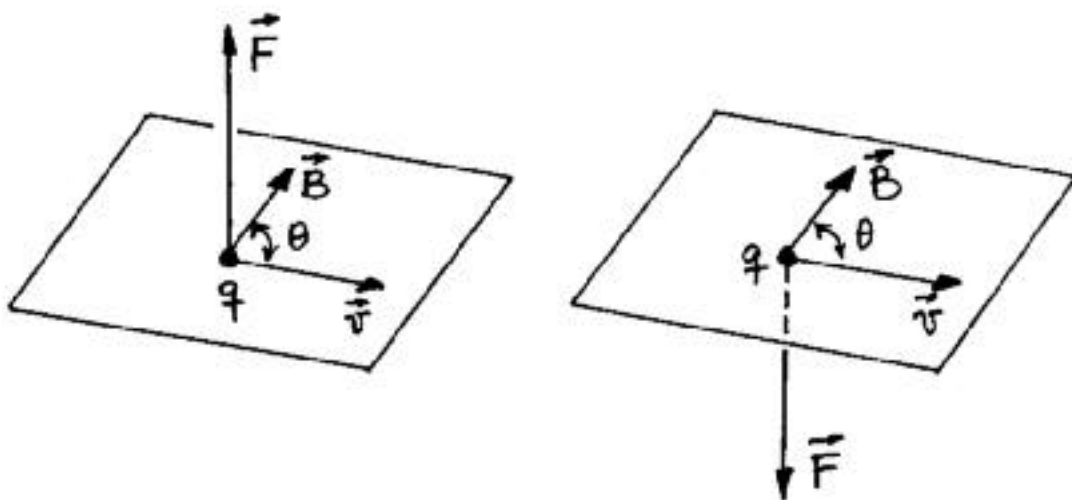


Figura 3

A partir de la ecuación  $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , puede verse que las características de la fuerza  $\mathbf{F}$  magnética son (figura 3):

*módulo:*  $|\mathbf{F}| = |q| |\mathbf{v}| |\mathbf{B}| \sin$

*dirección:* Perpendicular al plano que forman los vectores  $\mathbf{v}$  y  $\mathbf{B}$ .

*sentido:* El del producto vectorial teniendo en cuenta el signo de la carga  $q$ .

Se cumple que la fuerza es *máxima* cuando  $\mathbf{v}$  y  $\mathbf{B}$  son perpendiculares, y la fuerza es *nula* si los vectores  $\mathbf{v}$  y  $\mathbf{B}$  tienen la misma dirección.

Podemos definir, pues, el campo magnético como un vector  $\mathbf{B}$  de módulo:

$$B = \frac{F}{qv \sin}$$

cuya dirección viene determinada por la dirección de la velocidad de la partícula que da lugar a fuerza nula sobre la misma, y sentido el consistente con el producto vectorial  $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , considerando el signo de la carga.

A partir de la ecuación  $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , es posible definir la unidad de campo magnético. En el Sistema Internacional esta unidad es el tesla (T):

*"Un tesla corresponde al campo magnético que produce una fuerza de un newton sobre una carga de un culombio que se mueve perpendicularmente al campo a razón de un metro por segundo".*

Cuando  $\mathbf{v}$  y  $\mathbf{B}$  son perpendiculares, el módulo de  $\mathbf{F}$  viene dado por la expresión:

$$F = q v B \qquad B = \frac{F}{qv}$$

luego:

$$1 \text{ T} = 1 \text{ N C}^{-1} \text{ s m}^{-1} = 1 \text{ N A}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

es decir:

$$1 \text{ T} = 1 \text{ kg s}^{-1} \text{ C}^{-1} = 1 \text{ kg s}^{-2} \text{ A}^{-1}$$

Esta unidad es más bien grande, como puede apreciarse en la Tabla I donde se dan órdenes de magnitud de campos magnéticos típicos. Por ello se suele utilizar otra unidad, el **gauss** (G), relacionada con el tesla mediante:

$$1 \text{ tesla} = 10^4 \text{ gauss}$$

Tabla I.- Órdenes de magnitud de campos magnéticos típicos

	B (en T)
Espacio interestelar	$< 10^{-9}$
Campo magnético de la Tierra (en la superficie)	$5 \times 10^{-5}$
Superficie de las estrellas	$10^{-2}$ a 5
Imanes permanentes	$10^{-2}$ a 1
Electroimán con núcleo de hierro	$> 3$
Imanes superconductores	$> 20$
Bobinas de alta corriente	$> 20$
Bobinas pulsantes (duración $10^{-3}$ s)	10 a 30

Cuando la partícula se mueve en una región donde hay un campo eléctrico y uno magnético, la fuerza total es la suma de la fuerza eléctrica  $q\mathbf{E}$  y la fuerza magnética  $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , es decir:

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

Esta expresión se denomina **fuerza de Lorentz**.

El campo magnético es un campo vectorial y por tanto puede representarse mediante **líneas de campo**, tangentes en cada punto al vector campo  $\mathbf{B}$ . Las líneas de campo son cerradas sobre sí mismas, debido a la no existencia de cargas magnéticas, y con el sentido del polo norte al polo sur, por el exterior del imán, y del sur al norte por el interior (Figura 4, Tpler, Vol. II). Dichas líneas pueden materializarse utilizando la aguja de una brújula o limaduras de hierro, puesto que estos pequeños imanes se alinean por sí mismos en la dirección y sentido del vector  $\mathbf{B}$ .

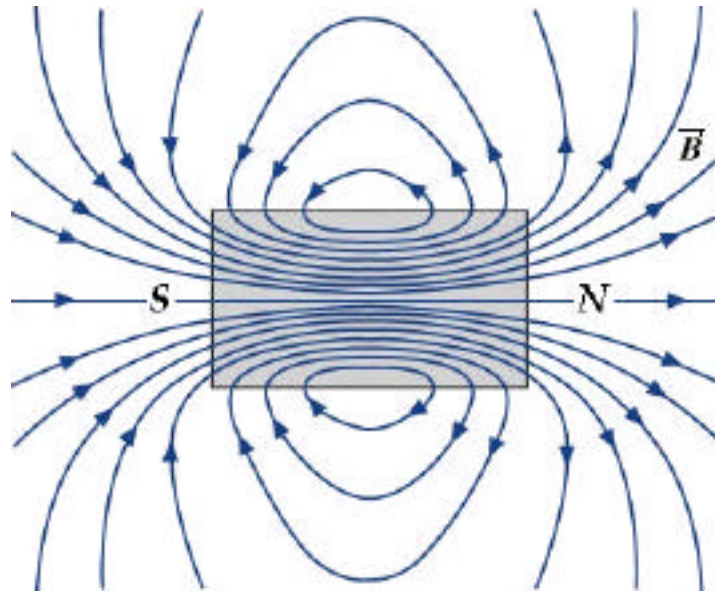


Figura 4

### 3.- Movimiento de una carga en un campo magnético. Ejemplos

La ecuación  $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$  nos ha servido hasta el momento para definir el campo magnético  $\mathbf{B}$  a partir de la fuerza a que se ve sometida una carga  $q$  que se mueve con velocidad  $\mathbf{v}$  en el seno de dicho campo magnético. Sin embargo, esta ecuación también nos permite analizar el movimiento de una partícula cargada en un campo magnético determinado. Vamos a considerar, inicialmente, una partícula cargada que se mueve en una región del espacio donde existe un **campo magnético uniforme** y estacionario, es decir, de valor constante en módulo, dirección y sentido, e independiente del tiempo. Este campo se podrá representar por líneas de campo rectilíneas, paralelas y equidistantes. Como la fuerza magnética  $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$  es perpendicular a la velocidad, su trabajo es nulo y por tanto no produce cambio alguno en la energía cinética de la partícula, es decir, no cambia el módulo de su velocidad, aunque sí puede cambiar su dirección. Por tanto, en todo el movimiento de la partícula se cumplirá que:

$$\vec{\mathbf{F}} \perp \vec{\mathbf{v}} \quad W = E_c = 0 \quad E_c = \text{constante} \quad v = |\vec{\mathbf{v}}| = \text{constante}$$

Por sencillez supondremos que la partícula de masa  $m$  y carga  $q$  incide en dicho campo con una velocidad  $\mathbf{v}$  perpendicular al campo  $\mathbf{B}$  (figura 5). Puesto que los vectores  $\mathbf{v}$  y  $\mathbf{B}$  son perpendiculares se tendrá:

$$F = q v B$$



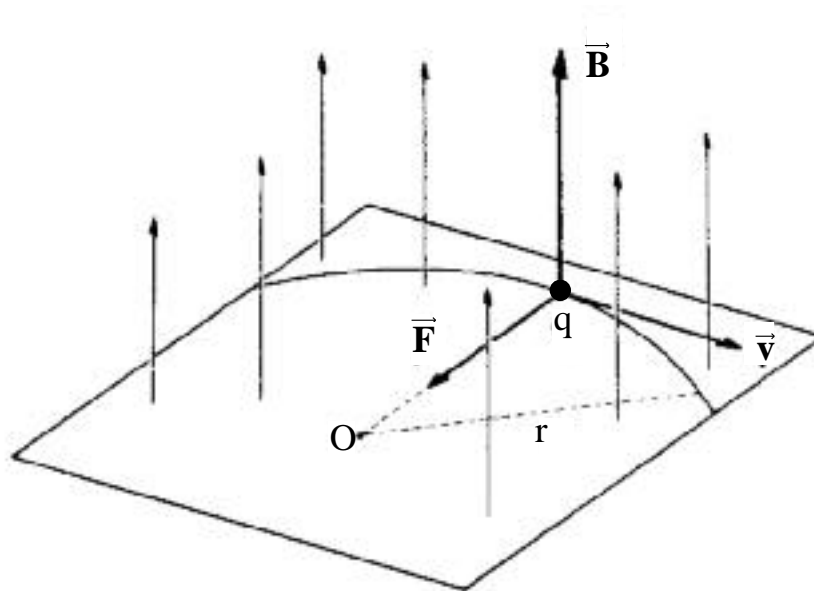


Figura 5

Aplicando la segunda ley de Newton,  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ , y teniendo en cuenta que al ser  $v$  constante la aceleración tangencial es nula ( $a_T = dv/dt$ ), sólo tendremos aceleración normal,  $a_N$ :

$$F = ma_N$$

es decir, el movimiento de la partícula será un **movimiento circular uniforme**. Por aplicación de la segunda ley de Newton:

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

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

$$F = q v B$$

ecuación que nos permite obtener el *radio de la trayectoria circular de la partícula*:

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

Sabemos que, en un movimiento circular, existe una relación entre las velocidades lineal,  $v$ , y angular,  $\omega$ , que es  $v = \omega r$ , entonces:

$$r = \frac{m \omega r}{qB}$$

de donde podemos despejar la *velocidad angular de la partícula* como:

$$\vec{\omega} = \frac{q}{m} \mathbf{B}$$

La velocidad angular es independiente de la velocidad lineal  $v$  y depende solamente del cociente  $q/m$  y del campo  $B$ . La velocidad angular recibe el nombre de **frecuencia ciclotrónica**. Para calcular la dirección y sentido del vector  $\vec{\omega}$ , recordemos que en un movimiento circular la aceleración normal se escribe:

$$\vec{a}_N = -\vec{\omega} \times \vec{v}$$

y de las ecuaciones  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}_N$  y  $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ , queda:

$$m(-\vec{\omega} \times \vec{v}) = q \vec{v} \times \mathbf{B}$$

es decir,

$$\vec{\omega} \times \vec{v} = -\frac{q}{m} \mathbf{B} \times \vec{v}$$

lo cual implica que:

$$\vec{\omega} = -\frac{q}{m} \mathbf{B}$$

El vector  $\vec{\omega}$  tiene la misma dirección que el vector  $\mathbf{B}$ , indicando el signo menos que tiene sentido opuesto a  $\mathbf{B}$  para una carga positiva y el mismo sentido para una carga negativa (figura 6).

La curvatura de la trayectoria de una partícula cargada permite:

(1) Determinar si la carga es negativa o positiva, si sabemos cuál es el sentido del movimiento (método que se utiliza en física de partículas).

(2) Estimar la energía de una partícula pues cuanto mayor es la energía (mayor  $mv$ ), mayor es el radio de la trayectoria ( $r = mv/qB$ ) y menor la curvatura.

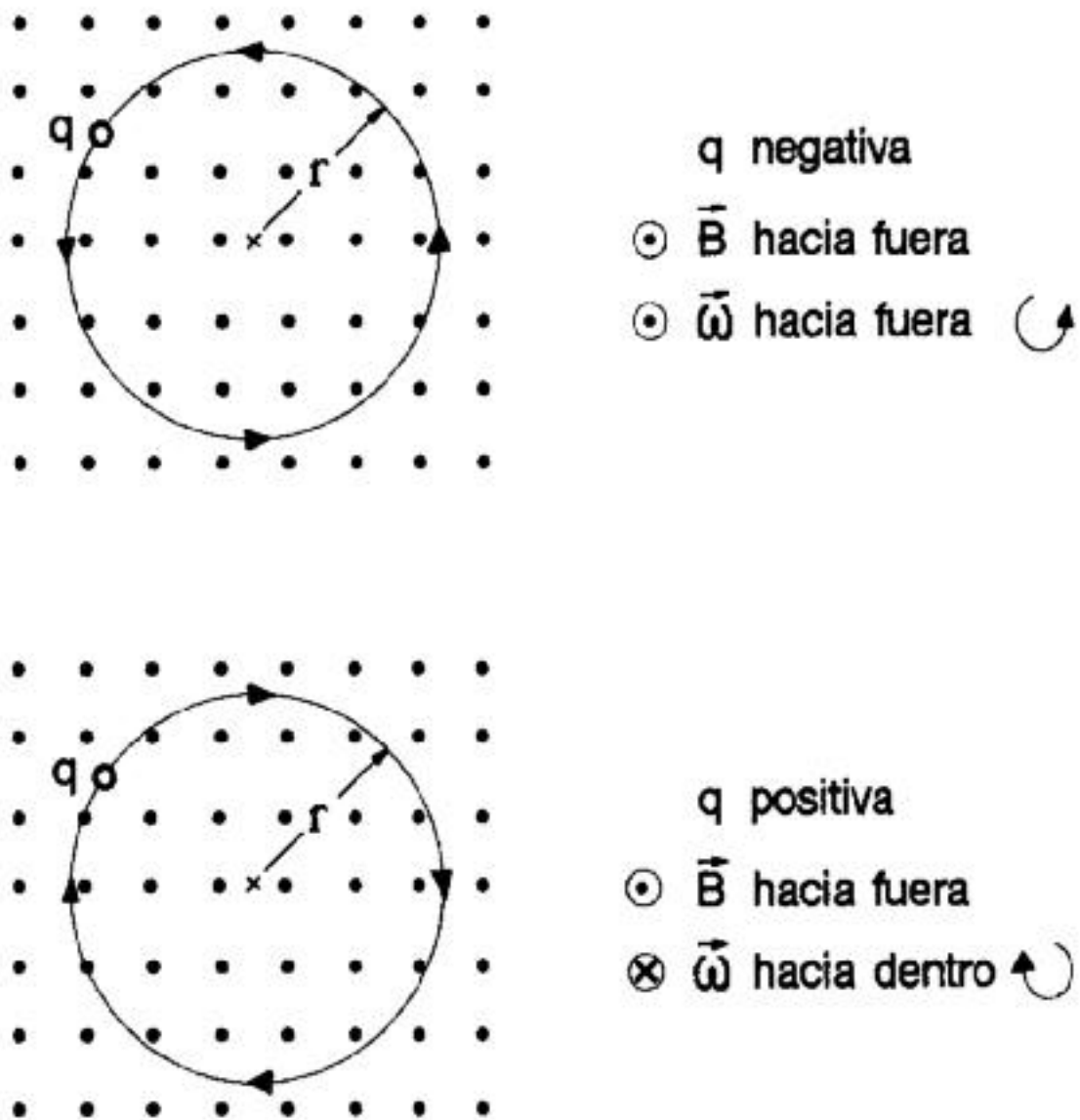


Figura 6

La aplicación de estas propiedades del movimiento de una carga en un campo magnético uniforme condujo a Anderson, en el año 1932, al descubrimiento del positrón. El positrón es una partícula fundamental que tiene la misma masa que el electrón pero una carga positiva  $+e$ . La figura 7 muestra una fotografía típica de una cámara de niebla en la que aparece la creación de un par electrón-positrón a partir de la materialización de un fotón. La existencia del positrón había sido predicha teóricamente por Dirac años antes.

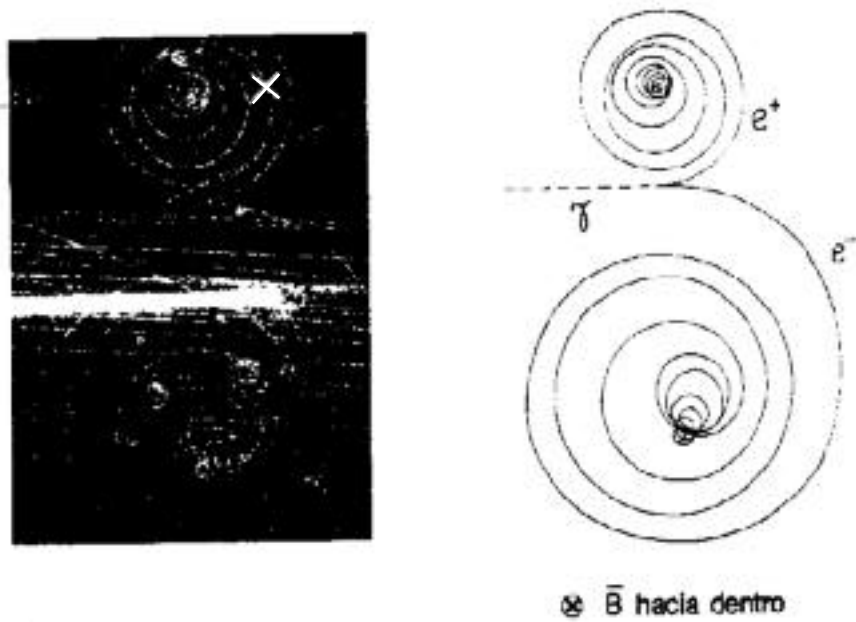


Figura 7

■ Si la velocidad inicial de la partícula no es normal al campo magnético uniforme  $\mathbf{B}$ , la partícula describe una hélice (figura 8). Es posible descomponer  $\mathbf{v}$  en una componente paralela al campo,  $\mathbf{v}_{||}$ , y otra perpendicular,  $\mathbf{v}_{\perp}$  :

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_{||} + \mathbf{v}_{\perp}$$

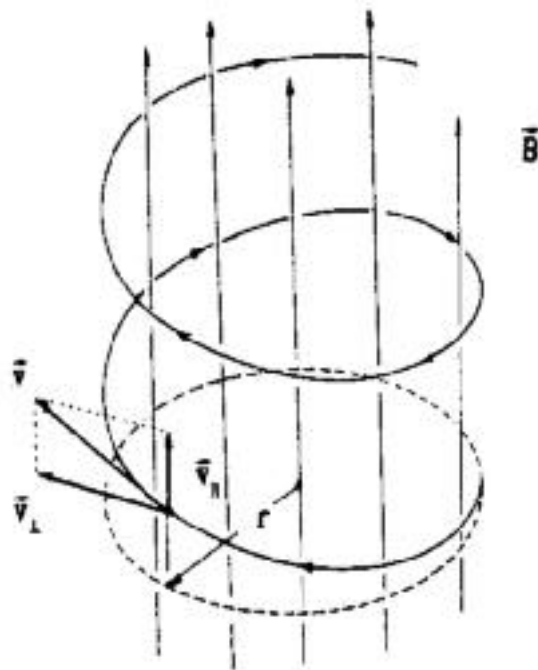


Figura 8

La componente paralela de la velocidad permanece constante y la perpendicular cambia de dirección pero no de módulo, resultando un **movimiento helicoidal**: La superposición de un movimiento rectilíneo y uniforme, en la dirección del campo  $\mathbf{B}$ , con un movimiento circular uniforme de velocidad angular la frecuencia ciclotrónica, alrededor del campo. La fuerza sobre la carga dependerá únicamente de la componente perpendicular de la velocidad, ya que  $\mathbf{v}_{||} \times \mathbf{B} = 0$  al ser dos vectores paralelos:

$$\vec{\mathbf{F}} = q \vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}} = q \vec{\mathbf{v}}_{\perp} \times \vec{\mathbf{B}}$$

y se cumplirá:

$$r = \frac{m v_{\perp}}{q B} = \frac{q}{m} B$$

■ Si el campo magnético *no es uniforme* el estudio del movimiento de partículas cargadas inmersas en él es más complicado. Lo cierto es que como:

$$r = \frac{m v_{\perp}}{q B}$$

cuanto mayor es el valor del campo, menor es el radio de la trayectoria de la partícula. La figura 9 muestra un campo magnético dirigido de izquierda a derecha con su intensidad aumentando en ese sentido. Una partícula inyectada por el extremo izquierdo del campo, describirá una hélice cuyo radio decrece continuamente. También puede comprobarse que la componente de la velocidad paralela al campo no permanece constante sino que disminuye conforme el campo aumenta. Esto hace que el paso de la hélice también vaya disminuyendo conforme la partícula se mueve en el sentido en que el campo aumenta. Es posible que la velocidad paralela llegue a anularse, y la partícula se vea forzada a volver, o sea, a moverse antiparalelamente al campo magnético. Por lo tanto, a medida que un campo magnético aumenta en intensidad comienza a actuar como reflector de partículas cargadas o como **espejo magnético**. Este efecto se utiliza para contener gases ionizados y plasmas en las llamadas **botellas magnéticas** formadas por un campo no uniforme como el de la figura 10. La partícula puede quedar atrapada describiendo una hélice de radio y paso variable de un extremo a otro del campo.

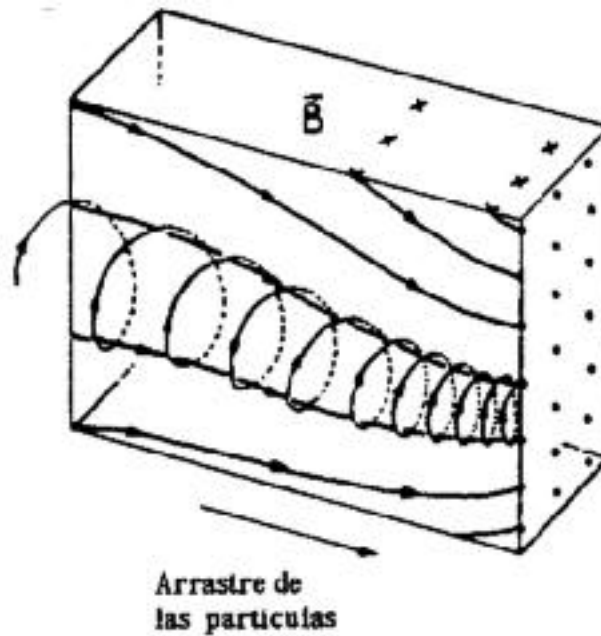


Figura 9

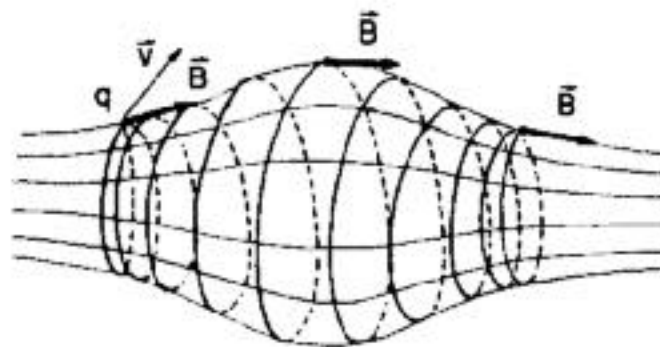


Figura 10

El efecto de botella magnética es el ejercido por el campo magnético terrestre sobre los protones y otras partículas de la radiación cósmica que inciden sobre la Tierra provenientes del espacio exterior, constituyendo los cinturones de Van Allen (figura 11). Estos cinturones están compuestos de partículas cargadas rápidas, principalmente electrones y protones, atrapados en el campo magnético terrestre. El primer cinturón se extiende aproximadamente entre los 800 y los 4000 km de la superficie de la Tierra, mientras que el segundo se extiende a unos 60000 km de la Tierra. Fueron descubiertos en 1958 por el satélite "Explorer" e investigados por la sonda lunar "Pioneer III".

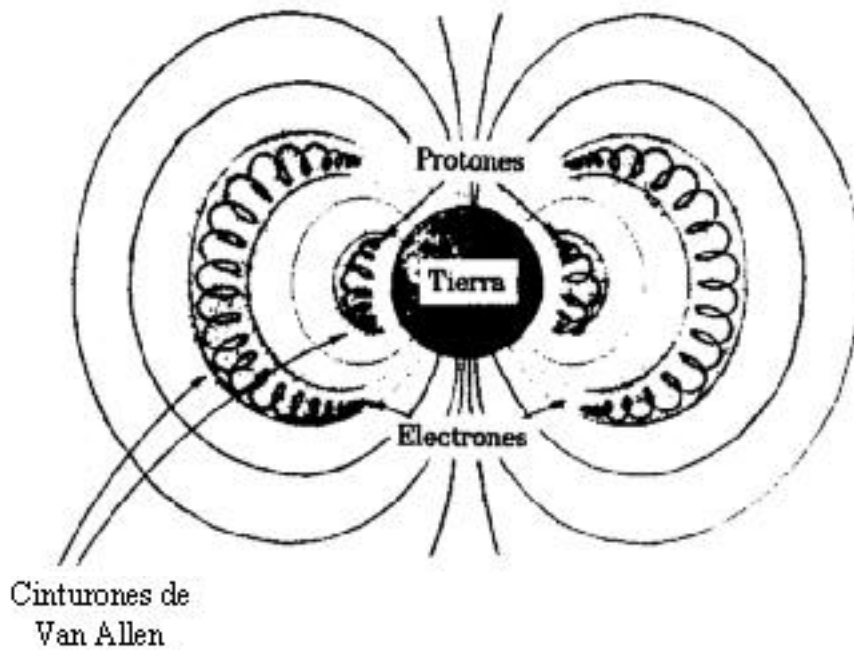


Figura 11

■ A continuación analizaremos algunos dispositivos en los que se han aplicado los principios que hemos visto hasta el momento y que constituyen aplicaciones específicas del movimiento de partículas cargadas en campos magnéticos. Los ejemplos que consideraremos son tres:

- El espectrómetro de masas.
- La determinación de la relación carga/masa del electrón, y
- El ciclotrón.

## 2.1.- ESPECTRÓMETRO DE MASAS

El espectrómetro de masas (figura 12) es un dispositivo capaz de separar partículas de diferente relación carga/masa. Consta de una fuente de iones (I) que pasan a través de dos rendijas estrechas  $S_1$  y  $S_2$  que tienen una d.d.p.  $V$ . Se cumplirá:

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV$$

por lo que la velocidad de salida de las partículas será:

$$v^2 = 2 \frac{q}{m} V$$

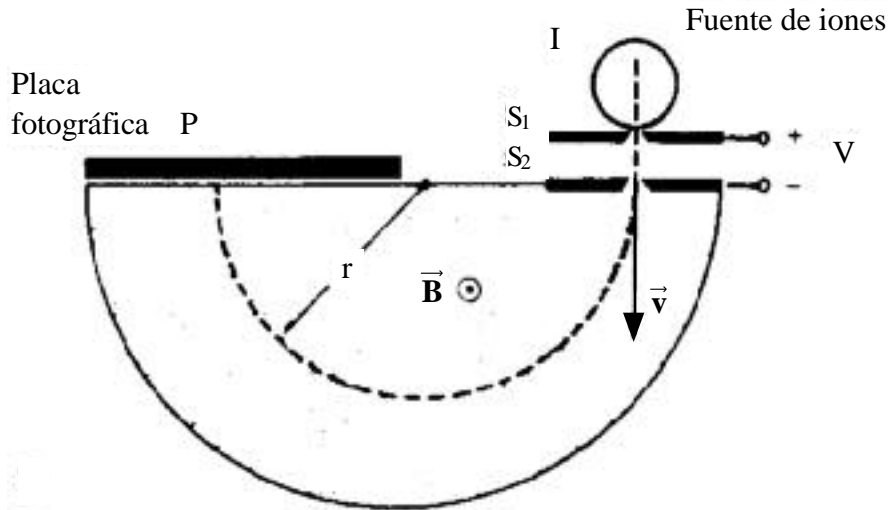


Figura 12

Seguidamente las partículas pasan por una región en la que hay un campo magnético uniforme  $\vec{B}$ , en donde se moverán siguiendo una semicircunferencia de radio  $r$  antes de chocar sobre una placa fotográfica P que las detectará. El radio  $r$  de la órbita viene dado por la ecuación:

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

luego, despejando  $v^2$ :

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

y como la velocidad con la que se mueven las partículas es:

$$v^2 = 2 \frac{q}{m} V$$

queda para la relación  $q/m$ :

$$\frac{q}{m} = \frac{2V}{r^2 B^2}$$

Con este dispositivo es posible separar isótopos, es decir, núcleos atómicos de un mismo elemento que poseen la misma carga (igual número de protones) pero distinta masa (diferente número de neutrones). Es fácil ver que los distintos isótopos incidirán en puntos diferentes de la placa fotográfica.



## 2.2.- DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN $q/m$ PARA EL ELECTRÓN

También se utilizaron campos magnéticos en la determinación de la relación carga/masa del electrón llevada a cabo por Thomson en 1897 utilizando un tubo de rayos catódicos (figura 13). Cuando sólo actuaba el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  se observaba que las partículas se desviaban al punto  $O'$ , por lo que su carga debe ser negativa. La desviación de una partícula de carga  $q$ , masa  $m$  y velocidad  $v$ ,  $d = OO'$ , se obtiene de la ecuación:

$$d = \frac{q E a}{m v^2} L$$

siendo la fuerza eléctrica  $qE$ .

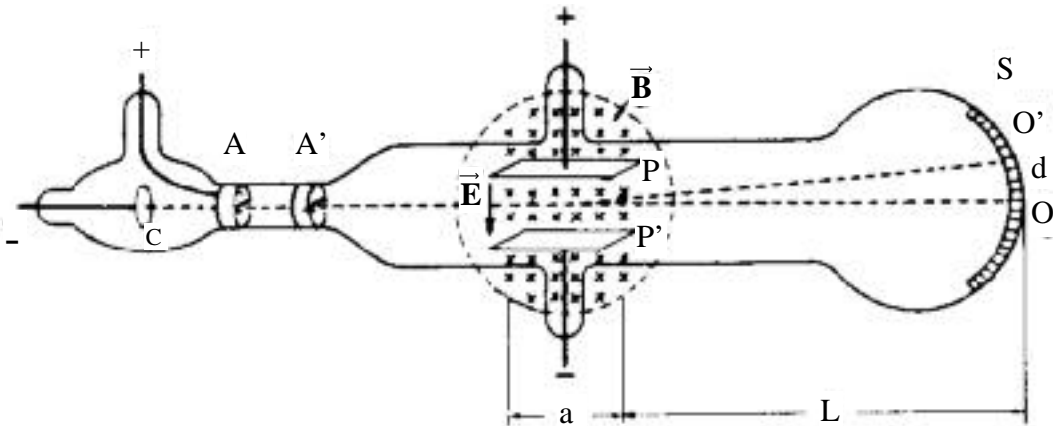


Figura 13

Si a continuación se aplica un campo magnético  $\mathbf{B}$  perpendicular a  $\mathbf{E}$ , la fuerza magnética será  $qvB$  dirigida hacia abajo por ser la carga negativa. Ajustando  $\mathbf{B}$  en forma adecuada se consigue que las fuerzas eléctrica y magnética sean iguales en módulo, dando resultante nula y volviendo el punto de incidencia de  $O'$  a  $O$ , es decir,

$$qE = qvB$$

de donde, la velocidad de los electrones será:

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

Por lo que la relación  $q/m$  para el electrón podrá calcularse mediante la ecuación:

$$\frac{q}{m} = \frac{E d}{B^2 L a}$$

### 2.3.- CICLOTRÓN

El último ejemplo que vamos a considerar es el ciclotrón, inventado por Lawrence en 1932. El ciclotrón sirve para acelerar partículas cargadas como protones y deuterones. El ciclotrón (figura 14) consiste en una cavidad cilíndrica dividida en dos mitades (cada una de ellas llamada "de" por su forma), la cual se coloca en un campo magnético uniforme paralelo al eje. Las dos cavidades están aisladas eléctricamente una de otra. En el centro del espacio comprendido entre las "des" se coloca una fuente de iones S y se aplica entre las mismas una d.d.p. alterna del orden de  $10^4$  V.

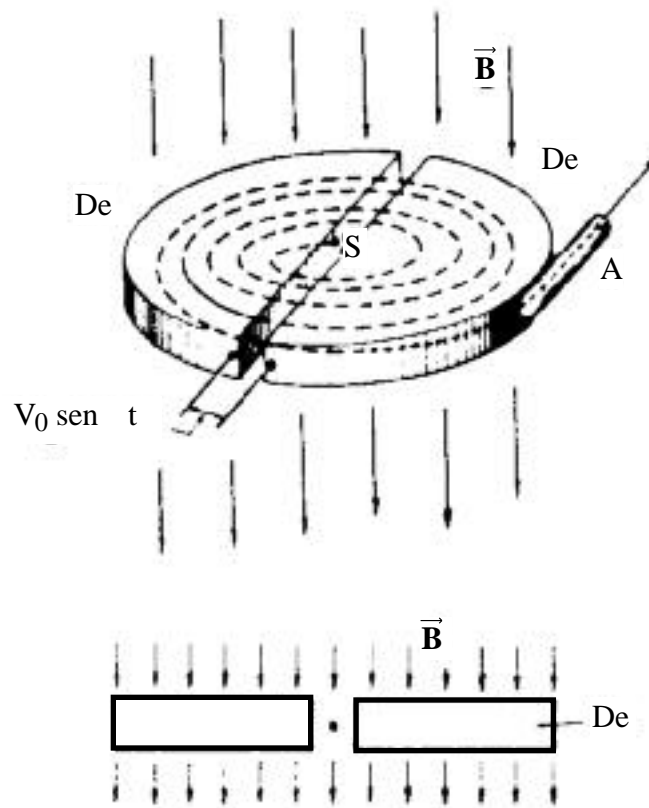


Figura 14

Una vez que la partícula penetra en una "de", no experimenta fuerza eléctrica alguna, porque el campo eléctrico es nulo en el interior de un conductor. Sin embargo, el campo magnético obliga a las partículas a describir una órbita circular de radio:

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

y una velocidad angular igual a la frecuencia ciclotrónica de las partículas, dada por la ecuación:

$$= \frac{q}{m} B$$

La frecuencia de oscilación de la tensión alterna aplicada entre las dos "des" se elige igual a esta frecuencia ciclotrónica, de esta manera, la d.d.p. entre las "des" está en resonancia con el movimiento circular de las partículas.

Cuando la partícula llega a la zona de separación entre las "des", ésta se acelera debido a la d.d.p. Al llegar a la otra "de" sigue describiendo una trayectoria circular, pero de mayor radio, al ser mayor la velocidad. Después que la partícula ha descrito media revolución, se invierte la polaridad de las "des" y cuando cruza el espacio entre ellas, recibe otra pequeña aceleración. El proceso se va repitiendo hasta que el radio alcanza el valor máximo R prácticamente igual al radio del ciclotrón. El campo magnético se anula en el borde de las "des" y la partícula se mueve tangencialmente, escapando a través de la abertura A. La máxima velocidad de las partículas está relacionada con el radio del ciclotrón mediante:

$$R = \frac{mv_{\text{máx}}}{qB}$$

es decir,

$$v_{\text{máx}} = \frac{q}{m} B R$$

La energía cinética de las partículas que emergen de A es:

$$E_c = \frac{1}{2} m v_{\text{máx}}^2 = \frac{1}{2} \frac{q^2}{m} B^2 R^2$$

dependiendo de las características de la partícula (q, m), del radio del ciclotrón (R) y del campo magnético (B), pero es independiente del potencial acelerador (V).