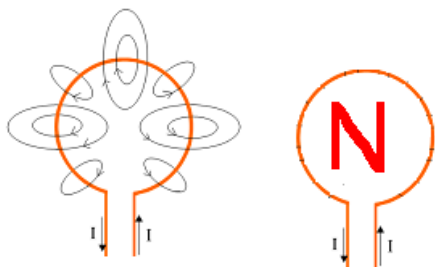


ELECTROMAGNETISMO

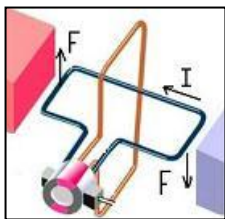
ACCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UNA ESPIRA

El análisis de las líneas del campo magnético que crea una espira recorrida por una corriente eléctrica, permite asimilarla a un imán. Por ejemplo, en la situación que muestra la figura adjunta, las líneas del campo magnético creado por la espira circular rodean al conductor de tal forma que emergen hacia nosotros por el área interior de la espira y se alejan de nosotros por la zona exterior a ella. Por tanto, la cara de la espira que mira hacia nosotros se corresponde con el polo norte del imán-espira y la cara opuesta (detrás) se corresponde con su polo sur.



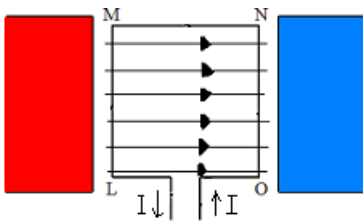
Una consecuencia de esto es que cuando una espira recorrida por una corriente eléctrica se coloca en el seno de un campo magnético (por ejemplo, producido por un imán natural) se orienta en la dirección indicada por dicho campo.

En el dibujo adjunto se representa este hecho. Teniendo en cuenta el sentido de la corriente que recorre a la espira rectangular, en la posición inicial (color azul) su cara norte mira hacia arriba. Por su parte, las líneas del campo magnético del imán se dirigen en el sentido de izquierda a derecha, puesto que salen del polo norte de dicho imán (de color rojo) y se dirigen hacia el polo sur del mismo (de color azul grisáceo). Por tanto, el campo magnético del imán provoca a la espira un giro de 90° hasta que se alinea con él (posición final, de color marrón claro). Para producir este giro, el campo magnético ejerce inicialmente sobre la espira el par de fuerzas que se indican en el dibujo.



LEY DE LA FUERZA DE LORENTZ Y SEGUNDA LEY DE LAPLACE

En la posición indicada en el dibujo adjunto, el campo magnético ejerce sobre la espira rectangular un par de fuerzas que la hacen girar para alinearse con el campo. Tales fuerzas se ejercen sobre los conductores ML y ON: La fuerza magnética sobre el conductor ML es perpendicular al plano de la espira y se dirige hacia nosotros, mientras la fuerza magnética sobre el tramo NO es también perpendicular al plano de la espira y se aleja de nosotros. A medida que la espira va girando, el par de fuerzas va siendo cada vez menor y cuando ha girado 90° cesa, porque en esa posición el campo magnético creado por la espira está alineado con el campo magnético producido por el imán.

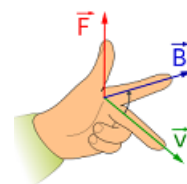


Del análisis de este proceso particular cabe extraer las siguientes conclusiones generales:

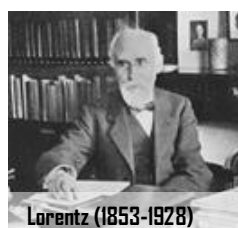
- 1) La fuerza que ejerce un campo magnético sobre corrientes paralelas a él (como, en este ejemplo, los tramos de conductor MN y LO) o, más en general, sobre cualquier carga móvil, cuya velocidad sea paralela al campo, es cero.
- 2) La fuerza que ejerce un campo magnético sobre corrientes perpendiculares a dicho campo (como, en este ejemplo, los tramos de conductor ML y ON) o, más en general, sobre cualquier carga en movimiento, cuya velocidad sea perpendicular al campo es máxima.

3) Por tanto, la magnitud de la fuerza magnética depende del ángulo, α , que formen el vector velocidad, \mathbf{v} , y el vector inducción magnética, \mathbf{B} ; más precisamente es proporcional al seno de dicho ángulo.

4) Además, la dirección de la fuerza magnética es perpendicular al plano que contiene a los vectores \mathbf{v} y \mathbf{B} y su dirección es la que indica la llamada regla del sacacorchos, o regla de la mano izquierda, que se ilustra en el dibujo adjunto. En dicho dibujo el sentido del vector velocidad, \mathbf{v} , es el de la corriente eléctrica, es decir, el del movimiento de cargas positivas. Sobre cargas móviles negativas (por ejemplo, electrones), la fuerza magnética se ejerce en sentido opuesto al representado.



5) Lógicamente, la magnitud de la fuerza magnética sobre una carga móvil, q , o sobre una corriente, de intensidad, I , también es proporcional a dicha carga, q , o a dicha intensidad, I .



Lorentz (1853-1928)

Considerando este conjunto de afirmaciones, la expresión operativa que calcula la fuerza magnética \mathbf{F}_m sobre una carga móvil es: $\mathbf{F}_m = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ Se conoce como ley de la fuerza de Lorentz (1853-1928) en reconocimiento al científico holandés, que investigó las acciones entre campos magnéticos y cargas móviles. En esta ley, $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, es el producto vectorial de los vectores velocidad (de la carga móvil) e inducción magnética. El resultado de dicho producto vectorial es un vector con las propiedades exigidas por las afirmaciones de la 1) a la 4) que se acaban de exponer.

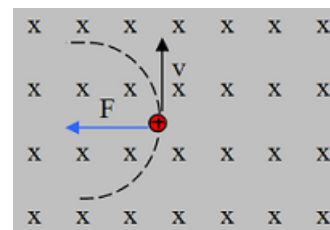
Cuando, en lugar de una carga móvil, se tiene un conductor rectilíneo (de longitud, L), recorrido por una corriente de intensidad, I , la fuerza magnética sobre él es: $\mathbf{F}_m = I (\mathbf{l} \times \mathbf{B})$

Esta expresión se puede deducir de forma muy sencilla a partir de la ley de la fuerza de Lorentz y se conoce como segunda ley de Laplace (1749-1827).

MOVIMIENTOS DE PARTÍCULAS CARGADAS EN UN CAMPO MAGNÉTICO

La acción del campo magnético sobre cargas en movimiento se puede observar usando un tubo de rayos catódicos y un imán. Si el tubo encierra una pantalla fluorescente donde se muestre la trayectoria de los electrones que emite el cátodo, al acercarle un imán se observa la desviación de los rayos electrónicos. Tal como predice la ley de la fuerza de Lorentz, dicha desviación es máxima cuando la velocidad de los electrones es perpendicular al campo magnético del imán, menor al ir disminuyendo el ángulo que forma la velocidad de los electrones con dicho campo magnético, y nula cuando el haz electrónico es paralelo al campo magnético.

Como la fuerza magnética es perpendicular a la velocidad, el movimiento de una carga sometida únicamente a un campo magnético uniforme sólo tiene aceleración normal. En consecuencia, la trayectoria seguida por la partícula es circular cuando su velocidad \mathbf{v} y el campo magnético \mathbf{B} son perpendiculares. En este caso, el módulo de la fuerza que se ejerce sobre la carga es $F_m = qvB$. Al ser la única fuerza, se cumple la relación:



$$F_m = m \cdot a_n = m \frac{v^2}{R}$$

Por tanto, el radio de la trayectoria circular depende de la masa y de la carga mediante la expresión:

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

Para fines prácticos, esta expresión es muy útil al mostrar que aplicando un campo magnético sobre partículas móviles cargadas, se puede conducir su trayectoria (modificando la orientación del campo y su intensidad). Para practicar este



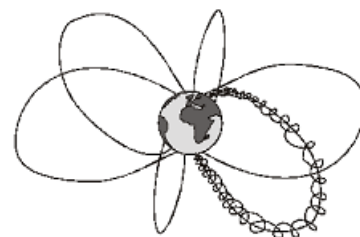
concepto se recomienda usar una animación del Departamento. Representa el movimiento de una carga afectada por un campo magnético perpendicular a la pantalla. Se puede alterar la intensidad del campo magnético, o, invertir su orientación, comprobando el efecto que estas modificaciones tienen sobre el movimiento de la carga. Situando el cursor encima de la partícula también se puede modificar sobre la marcha la velocidad de la partícula.

Un ejemplo en la naturaleza de movimiento de partículas cargadas, cuya trayectoria es afectada por un campo magnético es la aurora polar. Es un fenómeno en forma de brillo o luminiscencia que se observa en el cielo nocturno, casi siempre



en zonas polares. En el hemisferio norte se conoce como aurora boreal (el nombre procede de Aurora, diosa romana del amanecer, y de la palabra griega Boreas, que significa norte), y en el hemisferio sur como aurora austral. Se produce cuando una eyección de masa solar, conformada por partículas cargadas, incide cerca de los polos norte y/o sur del campo magnético terrestre. Cuando esas partículas chocan con los átomos y moléculas de oxígeno y nitrógeno, que constituyen los componentes más abundantes del aire, parte de la energía de la colisión excita esos átomos, que cuando se des-excitan, devuelven esa energía en forma de luz visible de varios colores.

En este caso, la velocidad de las partículas cargadas, **v**, forma un ángulo diferente de 90° con el campo magnético terrestre, **B**, por lo que se ha de considerar una componente de dicha velocidad perpendicular al campo y otra paralela a él. La trayectoria resultante es helicoidal (composición de una trayectoria circular y un avance lineal), un helicoide que siguen las partículas rodeando las líneas del campo magnético terrestre, tal como se indica en el dibujo adjunto.



Además de la Tierra, otros planetas del Sistema Solar, como Júpiter y Saturno (poseen campos magnéticos más fuertes que la Tierra), también muestran amplios cinturones de radiación. Las auroras han sido observadas en ambos planetas, con el telescopio Hubble.

CÁMARAS DE DETECCIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS

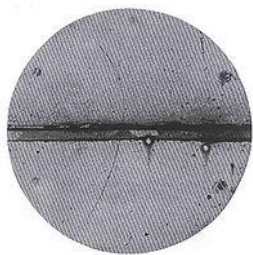
Las cámaras de detección (cámara de niebla, cámara de burbujas y cámara multi-hilos) se usan para observar e identificar partículas de radiación ionizante.

La primera cámara de detección fue la **cámara de niebla**, inventada por el físico escocés Wilson (1869-1959). En su forma más sencilla es un entorno cerrado que contiene vapor de agua super-enfriado y super-saturado. Cuando una

partícula cargada de suficiente energía interacciona con el vapor, lo ioniza, y los iones obtenidos actúan como núcleos de condensación, alrededor de los cuales se forman gotas de líquido que dan lugar a una niebla. Así, al paso de las partículas se va produciendo una estela o traza, debido a los numerosos iones producidos a lo largo de su trayectoria. Wilson recibió el Premio Nobel de física en 1927.

Cuando se aplica un campo magnético vertical a una cámara de niebla, sobre las partículas cargadas se ejerce la fuerza de Lorentz. Su trayectoria se curva, y el radio de la curvatura y el sentido del giro, permiten deducir la masa de la partícula y el signo de su carga.

Estos conceptos se aplicaron en el experimento que descubrió el positrón, antipartícula de electrón. El positrón había sido predicho por Dirac (1902-1984) en 1928, y fue identificado por primera vez por Anderson (1905-1991), en 1932, al fotografiar las huellas de los rayos cósmicos en una cámara de niebla. La fotografía adjunta corresponde al experimento original. La línea gruesa horizontal se debe a una lámina de plomo de 6mm, que separa la mitad superior de la cámara de la mitad inferior. El positrón viaja desde abajo hacia arriba en la fotografía, ya que la parte superior de su traza se dobla de forma más acusada (radio menor) en el campo magnético lo que indica una velocidad menor. Por este descubrimiento, Anderson recibió el Premio Nobel de física en 1936.

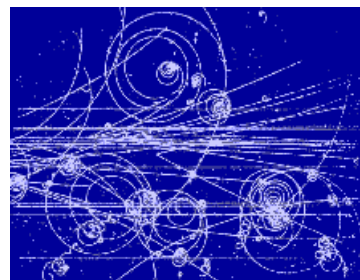


La cámara de niebla de Wilson se llama también de expansión, porque el aire dentro del dispositivo sellado está saturado con vapor de agua y usa un diafragma para expandir el aire dentro de la cámara. Así se enfría el aire, contribuyendo a que el vapor de agua comience a condensarse. En 1936 Langsdorf desarrolló otro tipo de cámara de niebla, llamada de difusión. Difiere de la cámara de niebla de expansión en que es sensible a la radiación de forma continua y que el fondo debe enfriarse a una temperatura baja, generalmente tan fría como el hielo seco. Se usa a menudo vapor de alcohol por tener diferentes temperaturas de transición de fase.

25 años después de la invención de la cámara de niebla, se inventó la **cámara de burbujas**. En 1952 Glaser (1926-....) ideó un dispositivo similar a la cámara de niebla, pero que funciona de manera inversa a ella, donde el material con el que interaccionan las partículas cargadas es un líquido en lugar de un gas y se forman burbujas de vapor al paso de las partículas cargadas en lugar de gotas de líquido. Al estar rellenas con un material más denso, se producen más interacciones, lo que aumenta la probabilidad de detectar nuevas partículas. Además, la cámara de burbujas se reactiva más rápidamente tras su uso que las de niebla. Estos factores hicieron que rápidamente la cámara de burbujas se convirtiera en el detector de partículas preferido, por lo que las cámaras de niebla desaparecieron en la investigación fundamental a comienzos de los años 1960. Glaser recibió el Premio Nobel de Física en 1960.

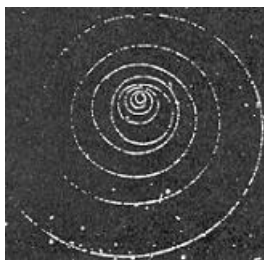


Adjunta se muestra una fotografía histórica obtenida en la cámara de burbujas BEBC del CERN, que estuvo en servicio hasta 1984 (tenía una altura de 3.7m para el espacio del detector y, mientras estuvo en servicio, se hicieron fotos de 6.3 millones de colisiones de partículas). La fotografía muestra el efecto de la colisión entre una partícula llamada pión, perteneciente a un haz que entra por la izquierda y un protón del hidrógeno líquido que llenaba la cámara de burbujas. Se añaden numerosas trazas espirales que pertenecen en



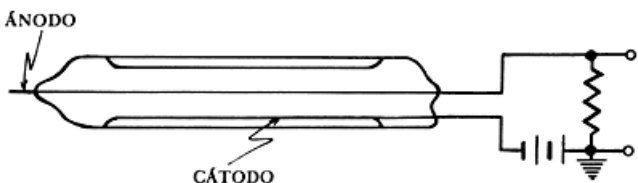
su mayoría a electrones que han sido arrancados de sus átomos. Como se observa su análisis resulta inicialmente complejo y es necesario aislar la traza dejada por la partícula que interesa investigar.

Una vez identificada o aislada la traza dejada por una partícula cargada en la cámara de burbujas, el signo de su carga se conoce inmediatamente, ya que la trayectoria es siempre una espiral de radio decreciente, a causa de que la partícula se va frenando a medida que interacciona con el líquido (en el ejemplo mostrado en la imagen adjunta, el sentido de giro es el contrario a las agujas del reloj). Si también se conoce la velocidad inicial de la partícula cargada, es igual de sencillo obtener la relación entre su carga y su masa, después de medir directamente en la fotografía el radio de curvatura de la mayor circunferencia.

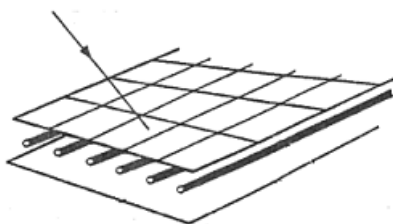
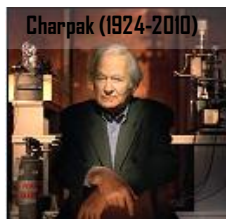


Después de proporcionar excelentes y abundantes resultados, la cámara de burbujas fue reemplazada por la **cámara multi-hilos**, que inventó Charpak (1924-2010) en 1968.

La cámara multi-hilos se basa un dispositivo anterior, llamado contador proporcional, que consiste en un cable delgado situado en el centro de un tubo de un centímetro de diámetro, relleno con un gas especial. Entre el cable y las paredes del tubo se aplica una diferencia de potencial de varios kilovoltios. Cuando una partícula cargada atraviesa el tubo ioniza el gas y los iones (positivos) se desplazan hacia el cable central, que funciona como un ánodo.



En las proximidades del cable el campo eléctrico es muy intenso y provoca una rápida aceleración de los electrones, que adquieren la energía suficiente para ionizar más átomos y liberar más electrones, que vuelven a ser acelerados. Así se genera una avalancha de electrones e iones que produce una señal eléctrica en el cable.



A modo de desarrollo del contador convencional, la cámara multi-hilos está formada por un gran número de cables muy finos dispuestos paralelamente sobre un plano situado entre dos placas paralelas (los cátodos) separadas unos pocos centímetros. Los cables que hacen de ánodos tienen un diámetro de unas décimas de milímetro y están separados entre sí por una distancia de unos pocos milímetros. Charpak se dio cuenta de que cada uno de estos cables podía recoger el paso de cientos de partículas por segundo y funcionar igual que lo hace un contador proporcional, pero con mucha mayor resolución.

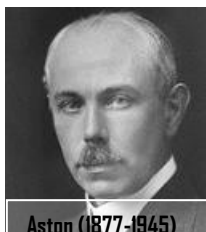
Los avances posteriores en electrónica, permitieron conectar cada cable a un amplificador de señal, llevando las señales registradas y amplificadas a sistemas informáticos que las tratan y almacenan una gran cantidad de datos. Con ello, la cámara multi-hilos, además de aumentar notablemente la precisión respecto de sus antecesoras, también mide otras magnitudes importantes, particularmente las energías de las partículas.

Hoy en día prácticamente cualquier experimento de física de partículas utiliza algún tipo de detector de traza desarrollado a partir de la idea original de Charpak.

Donald A. Glaser (1952). «Some Effects of Ionizing Radiation on the Formation of Bubbles in Liquids». *Phys. Rev.* **87** (4): pp. 665–665. doi:10.1103/PhysRev.87.665. <http://link.aps.org/abstract/PR/v87/p665>

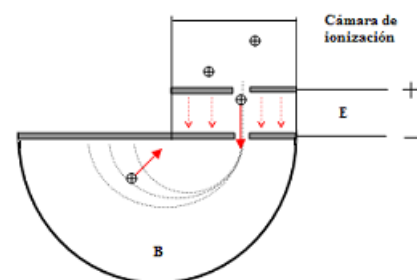
ESPECTRÓGRAFO DE MASAS

El espectrógrafo de masas es un dispositivo experimental que permite separar iones de átomos y/o moléculas en función de su masa. Se compone de una cámara donde se producen los iones, un pequeño acelerador lineal donde un campo eléctrico les aplica una diferencia de potencial, y la zona de detección donde un campo magnético los separa, antes de que incidan sobre una placa de detección (normalmente una placa fotográfica). Lo inventó Aston (1877-1945) en 1919 y lo utilizó para identificar, separándolos en base a la diferencia de sus masas, un gran número de isótopos (hasta entonces desconocidos) de elementos no radiactivos. Así descubrió hasta 212 de los 287 isótopos naturales y aportó la regla que lleva su nombre, que afirma que los elementos atómicos de número impar no pueden tener más de dos isótopos estables. En 1922 recibió el premio Nobel de Química.



eléctrico les aplica una diferencia de potencial, y la zona de detección donde un campo magnético los separa, antes de que incidan sobre una placa de detección (normalmente una placa fotográfica). Lo inventó Aston (1877-1945) en 1919 y lo utilizó para identificar, separándolos en base a la diferencia de sus masas, un gran número de isótopos (hasta entonces desconocidos) de elementos no radiactivos. Así descubrió hasta 212 de los 287 isótopos naturales y aportó la regla que lleva su nombre, que afirma que los elementos atómicos de número impar no pueden tener más de dos isótopos estables. En 1922 recibió el premio Nobel de Química.

A la derecha se muestra un esquema simplificado del espectrógrafo de masas. Para investigar sus isótopos naturales se introduce un elemento, previamente vaporizado, en la cámara de ionización, donde se le inyectan electrones que ionizan sus átomos. Los iones obtenidos (positivos) son acelerados por el campo eléctrico E y, después de pasar por el orificio de la placa negativa del acelerador, entran en la zona de detección, donde se les aplica un campo magnético B , perpendicular a su velocidad. La fuerza magnética de Lorentz curva su trayectoria, dependiendo el radio de curvatura de la relación entre la masa y la carga de los iones. Así, por ejemplo, si el elemento analizado tiene tres isótopos naturales, el ión de cada uno (con masa diferente) se detectará en un lugar diferente de la placa, tal como se representa en el dibujo adjunto.

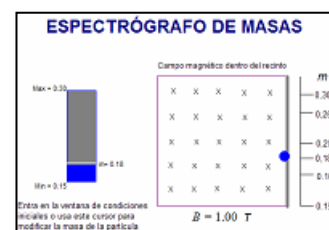


Las ecuaciones relevantes en este proceso son la expresión que relaciona la energía cinética que adquieren los iones en el acelerador con el potencial eléctrico que se les aplica ahí ($mv^2/2=qV$) y la expresión que calcula el radio de curvatura de la trayectoria circular que siguen los iones en la zona de detección ($R=mv/qB$). Combinando ambas, se obtiene la siguiente expresión para la relación entre la masa y la carga del ión:

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

En esta ecuación, el potencial, V , aplicado en el acelerador, y el campo magnético, B , son manipulables, y también se conoce la carga de los iones (igual a la de los electrones arrancados a cada átomo en la cámara de ionización). El lugar de la placa de detección donde inciden aporta experimentalmente el radio, único dato que falta para obtener su masa.

En la Web se puede descargar una animación del Departamento que simula el comportamiento de iones en una zona semejante a la zona de detección del espectrógrafo,



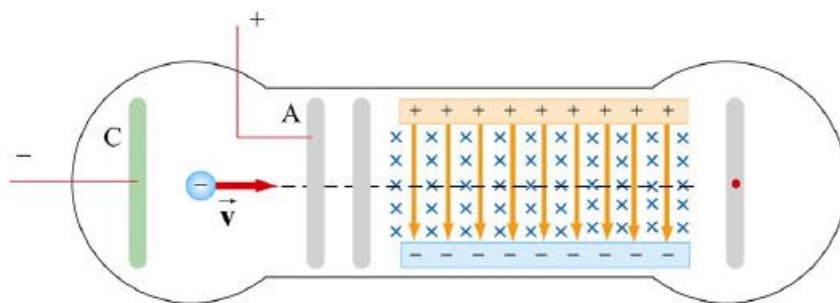
por tanto, afectada por un campo magnético perpendicular al movimiento de los iones. Permite elegir el valor de la masa del ión (en unidades arbitrarias) para así comprobar que la fuerza que le ejerce el campo magnético le lleva a incidir sobre la pantalla de detección en el lugar que corresponde.

Actualmente la espectrometría de masas es el mejor método para analizar cualitativa y cuantitativamente iones atómicos y también moleculares, si bien el análisis de los segundos resulta más complejo porque las moléculas previamente se han de "atomizar" o al menos, se deben fragmentar. Así, mientras los espectros atómicos de masas son muy sencillos y fáciles de interpretar (mucho más que los espectros atómicos ópticos), los espectros de masas moleculares requieren aplicar algunas reglas de inferencia. A pesar de ello se considera la mejor técnica actual para resolver las estructuras de moléculas desconocidas.

SELECTOR DE VELOCIDADES DE PARTÍCULAS CARGADAS

En presencia de un campo eléctrico (\mathbf{E}) y un campo magnético (\mathbf{B}) la fuerza total electromagnética que se ejerce sobre una carga (q) es: $\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$. Por ello, combinando adecuadamente los dos campos (\mathbf{E} y \mathbf{B}), se puede seleccionar a las partículas cargadas que tengan un valor determinado de la velocidad (\mathbf{v}).

A la derecha se expone un dibujo de un **selector de partículas** aplicado a electrones. Tales electrones son emitidos por un cátodo (C) y aceleran hacia el ánodo (A). A continuación se les aplica un campo eléctrico \mathbf{E} y un campo magnético \mathbf{B} (ambos uniformes). Tal como muestra el dibujo, la orientación de tales campos es



adecuada para ejercer sobre los electrones fuerzas de sentido opuesto. En estas condiciones la selección de electrones en función de su velocidad se basa en que la intensidad de los campos sea la precisa para que la fuerza total sobre ellos sea cero. Los electrones que cumplen esta condición no se desvían de su trayectoria y, por tanto, inciden exactamente en el lugar indicado por el punto de color rojo.

Como el módulo de la fuerza eléctrica es $F_e = e \cdot E$ y el de la fuerza magnética es $F_m = e \cdot v \cdot B$, al igualar ambas, se deduce que la velocidad de los electrones seleccionados es:

$$v = E/B \quad (1)$$

Los electrones adquieren esa velocidad (v) y/o la energía cinética correspondiente ($E_c = mv^2/2$) en su camino entre el cátodo y el ánodo, a lo largo del cual se les aporta una energía eléctrica ($W = e \cdot \Delta V$):

$$e \cdot \Delta V = mv^2/2 \quad (2)$$

Por tanto, (combinando las ecuaciones 1 y 2) se cumple la siguiente relación entre la carga y la masa de los electrones:

$$\frac{e}{m} = \frac{E^2}{2(\Delta V)B^2}$$



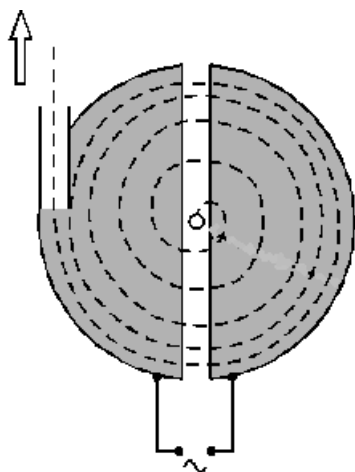
Esta fue la relación que usó Thomson para establecer la masa del electrón, a partir de los valores experimentales de la intensidad del campo eléctrico (E), el campo magnético (B) y la diferencia de potencial eléctrico (ΔV).

[Artículo original del trabajo de Thomson \[Philosophical Magazine, 44, 293 \(1897\)\].](#)

CICLOTRÓN

Un **ciclotrón** es un tipo de acelerador de partículas cargadas que combina la acción de un campo eléctrico alterno, que les proporciona sucesivos impulsos, con un campo magnético uniforme que curva su trayectoria y las redirige una y otra vez hacia el campo eléctrico. Fue inventado en el año 1934 por los físicos estadounidenses Livingston (1905-1986) y Lawrence (1901-1958) (por este motivo, este último recibió en 1939 el premio Nobel).

El ciclotrón consta de dos cámaras metálicas huecas con forma de semicírculo (se llaman "des", D, a causa de su forma),



contenidas en una cámara de vacío para que las partículas que viajen por ellas no sean dispersadas en choques con moléculas de los gases que forman el aire. Sobre las "des" actúa un campo magnético uniforme y perpendicular, generado por un potente electroimán, y entre ambas se aplica un campo eléctrico alterno, para que la fuerza eléctrica siempre actúe en el sentido del movimiento de las partículas. Desde una fuente de iones, situada cerca del centro del campo magnético, las partículas cargadas se inyectan al ciclotrón inicialmente a una velocidad moderada. La fuerza magnética les proporciona una aceleración normal y, por lo tanto, tienen un movimiento circular por una de las "des". Al salir de ahí, se les aplica el campo eléctrico que las acelera y las lleva a la otra mitad del ciclotrón a una velocidad superior. A esa velocidad recorren otra semicircunferencia de radio mayor que la

primera y vuelven a acceder a la zona entre las "des", donde se les aplica de nuevo el campo eléctrico (ahora en sentido contrario al anterior), que las vuelve a acelerar. El proceso se repite una y otra vez hasta que las partículas salen finalmente del ciclotrón a una velocidad muy elevada, tras haber realizado en el interior del orden de 50 a 100 revoluciones.

Cuando las partículas tienen una velocidad pequeña comparada con el límite superior de velocidades (la velocidad de la luz), se les puede aplicar la mecánica de Newton y tienen un movimiento circular y uniforme dentro de cada "D". Al tener en cuenta que el campo magnético ejerce sobre ellas la fuerza de Lorentz, se obtiene que la velocidad y el radio se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$F = qvB = m \frac{v^2}{R} \rightarrow v = \frac{qBR}{m}$$

Con lo que la velocidad angular del movimiento ($\omega = v/r$) vale:

$$w = \frac{qB}{m}$$

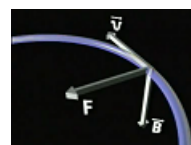
La frecuencia correspondiente a esta velocidad angular ($f=w/2\pi$) se llama frecuencia de resonancia del ciclotrón y es la misma que se tiene que aplicar a la oscilación del campo eléctrico para sincronizarse con las partículas, de forma que cada vez las acelere. Como vemos, no depende de la velocidad del ión, ni del radio de la circunferencia que describe, por lo que resulta muy sencillo obtener la sincronía en este caso. Sin embargo, cuando la velocidad de las partículas se eleva haciéndose comparable con el límite superior de velocidades (velocidades desde $0.9c$ o energías por encima de unos $12MeV$), se ha de aplicar la mecánica relativista. En este caso, la frecuencia necesaria viene dada por la siguiente expresión:

$$f = \frac{Bq}{2\pi m} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Como vemos, depende de la velocidad, lo que convierte en un difícil problema conseguir la sincronía entre la frecuencia de oscilación del campo eléctrico y la del movimiento circular de las partículas aceleradas. El "problema" se corrige mediante un sistema automático que varía el período del campo eléctrico alternante empleado para transferir energía a las partículas, de manera que sea siempre igual al período del movimiento de los iones acelerados. Para ello se conecta a las "des" un oscilador de radio frecuencias, cuya función es precisamente desplazar a la banda de frecuencias de oscilación del campo eléctrico, para que satisfaga la condición de resonancia magnética de una partícula con energía creciente. El dispositivo resultante se denomina **sincro-ciclotrón** o "**ciclotrón sincronizado**".

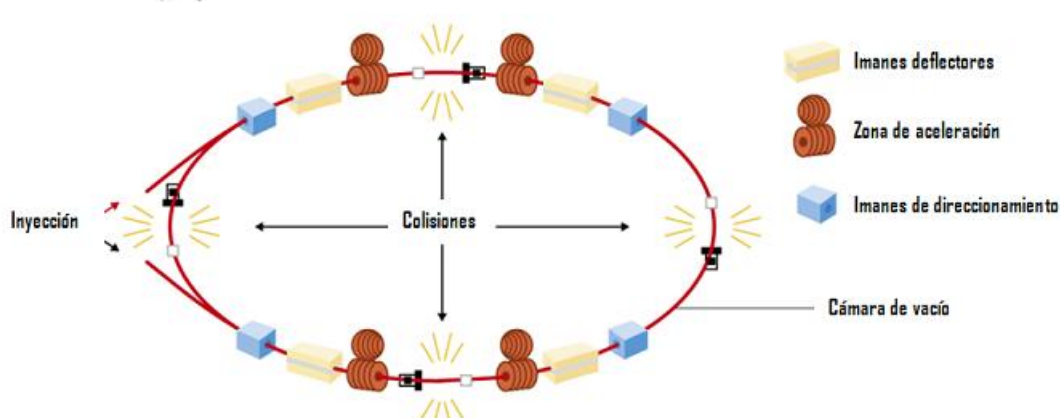
SINCROTRÓN

Básicamente, un **sincrotrón** es un acelerador de partículas cargadas que viajan en un tubo con forma toroidal (a lo largo del tubo se usan imanes para que la fuerza magnética de Lorentz mantenga la trayectoria curvada de las partículas). Por debajo de esta denominación genérica se han de considerar diferentes tipos de aceleradores: sincrotrón de electrones, sincrotrón de protones o tevatrón, anillos de almacenamiento, colisionadores de partículas, etc.



Los principios del sincrotrón fueron descritos en 1945 casi simultáneamente por McMillan (1907-1991) en la Universidad de California y Veksler (1907-2006) en la antigua Unión Soviética. El primer sincrotrón, fue construido en California por McMillan.

El dibujo adjunto es un esquema simplificado del sincrotrón ALICE del LHC o Gran Colisionador de Hadrones (en inglés Large Hadron Collider, LHC). El anillo requerido para trabajar a altas energías es

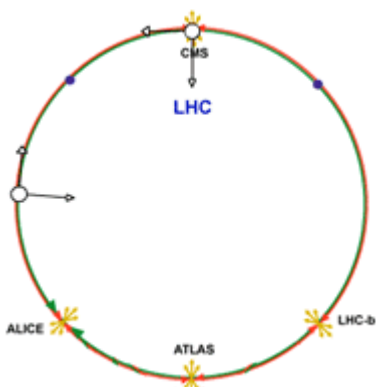


de gran diámetro (en este caso, son 27.3 km de circunferencia) y las partículas (en este caso protones) lo recorren por el interior de un tubo metálico mantenido en ultra vacío. A lo largo del recorrido se disponen imanes superconductores de dos tipos: unos aplican campos magnéticos adecuados para mantener la trayectoria curva (imanes de direccionamiento di-polares), y otros concentran y enfocan el haz (imanes deflectores cuadri-polares). Entre los imanes se intercalan las zonas de aceleración, formadas por cavidades de radiofrecuencia (RF) y campos eléctricos, que dan impulsos sucesivos con el mismo procedimiento que lo hacen los aceleradores lineales.

En los grandes laboratorios de partículas actuales se incluyen normalmente varios sincrotrones y otros aceleradores y detectores con finalidades diversas. Hay que tener en cuenta que un sincrotrón no puede trabajar en un rango de energías pequeño, por lo que el rayo de partículas tiene que ser pre-acelerado antes de ser "inyectado" en el sincrotrón. Además, se deben reservar zonas para la "observación" de las colisiones entre partículas (cuyo estudio resulta de enorme trascendencia para el avance en los conocimientos actuales sobre la estructura interna de la materia) y para la producción de experimentos variados, con aplicación en física, química, biología, medicina, etc. En consecuencia, los sincrotrones en el mundo se vienen construyendo en centros complejos, que normalmente se dotan de un conglomerado de aceleradores de partículas y que suelen formar parte de proyectos internacionales para la investigación científica multidisciplinar.

SINCROTRONES EN EL MUNDO

Laboratorio	Localización
LHC (Large Hadrón Colider)	CERN en Ginebra (Suiza)
DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron)	Hamburgo y Berlín (Alemania)
SOLEIL (Soleil Synchrotron)	París (Francia)
ESRF (European Synchrotron Radiation Facility)	Grenoble (Francia)
APS (Advanced Photon Source)	Argonne (EE.UU)
ALS (Advanced Light Source)	Berkeley (EEUU)
ELETTRA (Elettra Synchrotron Light Source)	Trieste (Italia)
SPring 8 (Super Photon Ring - 8 GeV)	Hyogo (Japón)
SLS (Swiss Light Source)	Instituto Paul Scherrer (Suiza)
CLS (Canadian Light Source)	Universidad de Saskatchewan (Canadá)
LNLS (Laboratório Nacional de Luz Sincrotrón)	Campinas (Brasil)
MAX-Lab (Laboratorio IV MAX)	Universidad de Lund (Suecia)
DIAMOND (Diamond Light Source)	Oxfordshire (Reino Unido)
ALBA	Universidad Autónoma de Barcelona (España)



Seguidamente se dan algunos datos sobre el LHC ilustrativos de la envergadura de estos proyectos. Como se ha dicho, el anillo principal tiene 27.3 km de longitud, y cuenta con 16 cavidades de aceleración, y más de 9000 imanes superconductores que trabajan a una temperatura del orden de -271 K . Los protones dan en el anillo mayor 11.000 vueltas por segundo, produciendo colisiones de 2 billones de protones cada segundo. Entre el conglomerado de aceleradores, se consideran seis zonas principales diferentes, nombradas por las siglas de grandes experimentos, que se realizan en cada una de ellas: ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, TOTEM y LHCf.

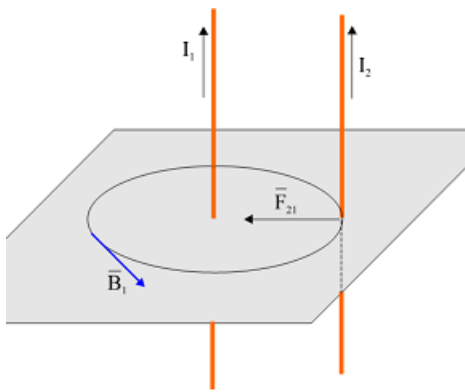


Este enorme y complejo laboratorio requiere un alto coste para funcionar adecuadamente. A modo de ejemplo de ello, comentamos que el Consejo de Administración del CERN ha previsto que el LHC realice a finales de 2012 una parada técnica,

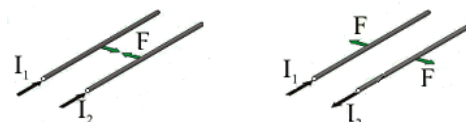
para preparar el acelerador con objeto de realizar experimentos en los que aumentará la energía a la que viajan las partículas por el anillo mayor. Se prevé que la parada tendrá una duración de más de un año, simplemente porque habrá que ajustar los imanes para que sigan confinando a los protones en su trayectoria a esa mayor energía. El tiempo estimado para ajustar cada imán es relativamente pequeño (del orden de 15 minutos), pero el tiempo total requerido para los 9000 imanes será de esa magnitud.

FUERZA MAGNÉTICA ENTRE CORRIENTES. DEFINICIÓN DE AMPERIO

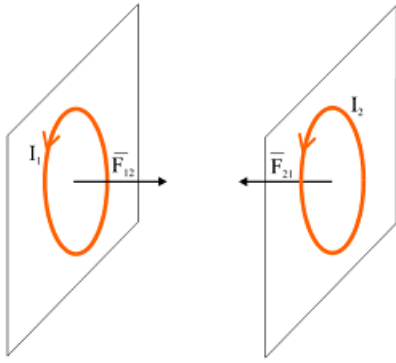
Puesto que las corrientes eléctricas producen y "sienten" la acción del campo magnético, interesa estudiar las fuerzas magnéticas ejercidas directamente entre ellas. El caso más sencillo es el de dos conductores rectilíneos, paralelos e indefinidos. En el dibujo de la izquierda se ha representado una línea del campo magnético generado por una corriente rectilínea 1. Dicho campo actúa sobre una segunda corriente 2, paralela a la primera, en una dirección perpendicular a ella y también perpendicular a la pantalla. Para deducir el sentido de la fuerza magnética que actúa sobre dicha corriente 2, se aplica la segunda ley de Laplace, lo que da una fuerza, \vec{F}_{21} , perpendicular al conductor 2 y dirigida hacia el 1. Razonando igual se puede deducir la orientación de la fuerza magnética que se ejerce sobre el conductor 1, debida al campo generado por el conductor 2 (dibujaríamos las líneas del campo magnético producido por la corriente 2, y usaríamos la misma ley para deducir el sentido de la fuerza, \vec{F}_{12} , que se ejerce sobre el conductor 1). Haciéndolo, se obtiene que esa fuerza es perpendicular al conductor 1 y se dirige hacia el conductor 2.



Por tanto, se concluye que **dos conductores rectilíneos e indefinidos, por los que circulan corrientes eléctricas en el mismo sentido, se atraen**, mientras que **dos conductores rectilíneos e indefinidos, por los que circulan corrientes eléctricas en sentidos opuestos, se repelen**.



Para ver que este resultado es lógico es útil extrapolarlo al caso de dos espiras enfrentadas. Cuando circulan por ellas corrientes del mismo sentido las espiras se atraen (cada dos conductores paralelos enfrentados así lo hacen), lo que resulta coherente con el hecho de que, consideradas como imanes, las espiras están enfrentadas por sus polos magnéticos opuestos (la cara que corresponde al polo sur de una de ellas está enfrentada a la cara que corresponde al



polo norte de la otra). La situación es similar si en lugar de dos espiras, se consideran dos bobinas. Como ya se ha visto, las bobinas son equiparables a imanes rectangulares, que, de acuerdo con el mismo razonamiento, también se atraerían por sus polos opuestos. Evidentemente, si las corrientes rectilíneas, las espiras o las bobinas se enfrentan en la posición contraria (es decir, estando sus corrientes dirigidas en sentidos opuestos) la fuerza magnética de interacción entre ellas es de repulsión, en lugar de atracción.

En cuanto a la expresión que calcula del módulo de esta fuerza de interacción magnética entre dos corrientes rectilíneas, para deducirla se comienza aplicando la ley de Biot y Savart, según la cual el módulo del campo magnético que crea una corriente rectilínea 1, a la distancia r a que se encuentra la segunda corriente 2 (también rectilínea), es:

$$B_1 = \frac{\mu I_1}{2\pi r}$$

A partir de aquí, el módulo de la fuerza magnética F_{12} que se ejerce sobre la corriente 2 (debida al campo que produce la corriente 1) se obtiene aplicando la segunda ley de Laplace:

$$F_{12} = I_2 L_2 B_1 \sin 90^\circ = \frac{\mu I_1 I_2 L_2}{2\pi r}$$

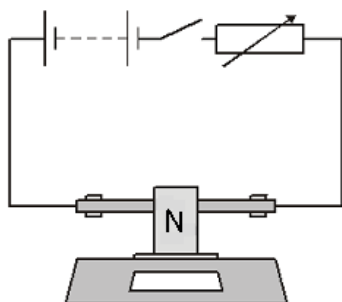
Para obtener el módulo de la fuerza F_{21} que se ejerce sobre el conductor 1 debido al campo magnético que genera el conductor 2, razonaríamos igual y llegaríamos a la misma expresión, pero cambiando la longitud de conductor 1, L_1 , por la longitud de conductor 2, L_2 . Por tanto, se concluye que dos conductores rectilíneos y paralelos se atraen (cuando son recorridos por corrientes de la misma orientación) o se repelen (cuando son recorridos por corrientes de orientaciones opuestas) con una fuerza, cuyo módulo por unidad de longitud es:

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu I_1 I_2}{2\pi r}$$

Esta expresión, que proporciona la **fuerza de interacción entre dos corrientes**, tiene una evidente analogía formal con las leyes fundamentales que calculan respectivamente la fuerza de interacción gravitatoria entre dos masas (ley de gravitación de Newton) y la fuerza de interacción electrostática entre dos cargas (ley de Coulomb). Es, por tanto, una **ley fundamental del electromagnetismo**, aunque tardó en presentarse como tal debido a que el magnetismo fue un hecho físico rodeado de misterio y que sólo se asimiló a las interacciones entre corrientes eléctricas cuando el experimento de Oersted mostró que los imanes se orientan sometidos a la acción de una corriente. Para entonces, bastantes conceptos, como por ejemplo el concepto de polo magnético, ya estaban establecidos. Pero, fue Ampere quien, muy poco después de conocer el resultado del experimento de Oersted, demostró que dos corrientes eléctricas se repelen si circulan en sentidos opuestos y se atraen si lo hacen en el mismo sentido. Por ello, una vez establecida esta ley, que calcula la fuerza de interacción entre corrientes, se adoptó la intensidad de corriente como una de las magnitudes fundamentales de la física y se definió su unidad, llamada amperio, en relación con esta ley (El amperio es la intensidad de una corriente constante que manteniéndose en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y situados a una distancia de un metro uno de otro en el vacío, produciría una fuerza igual a $2 \cdot 10^{-7}$ newton por metro de longitud).

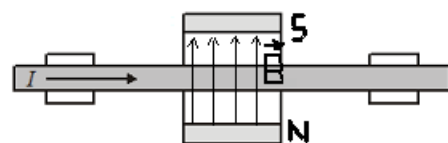
APLICACIONES I. Báscula electrónica, tren de levitación magnética y timbre eléctrico

Las fuerzas magnéticas entre imanes, entre ellos y corrientes o directamente entre corrientes, tienen bastantes aplicaciones prácticas.



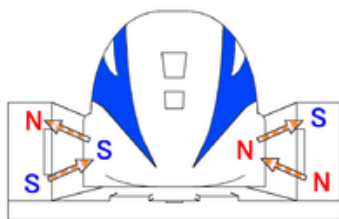
Una de ellas es la báscula electrónica. El dibujo adjunto representa una báscula tradicional, en la que un tubo metálico (por ejemplo, de aluminio), conectado a un circuito eléctrico, se fija entre los polos de un imán que produce un campo magnético horizontal. Con el circuito cerrado fluye por el tubo una corriente, y entre el imán y el conductor se ejerce una fuerza magnética vertical, dependiente de la intensidad de la corriente [$F=I(l \times B)$]. Después de colocar la muestra en la base de la báscula, su peso se determina compensando la fuerza magnética ejercida sobre el imán con dicho peso.

A la derecha se muestra una vista aérea del montaje, indicando la dirección del campo magnético de forma que la fuerza entre la corriente y el imán, se dirige hacia abajo sobre el conductor (hacia dentro de la pantalla en el dibujo) y hacia arriba (hacia nosotros en el dibujo) sobre el imán.



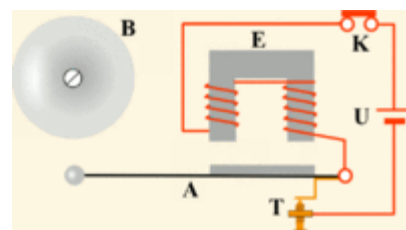
Las básculas electrónicas actuales funcionan de un modo diferente. Utilizan unos sensores de alta precisión, conocidos como células de carga o celdas de carga, que consisten en una pieza de metal a la que se adhieren *galgas extensométricas*. Estas galgas cambian su resistencia eléctrica al estirarse o comprimirse cuando se deforma la pieza metálica que soporta el peso del objeto. El metal se calcula para que trabaje en su zona elástica, es decir, para que recupere su estado tras cada deformación.

La atracción-repulsión entre dos campos magnéticos también está en la base del funcionamiento de los trenes de levitación magnética. Estos trenes van dotados con unos potentes electroimanes, que son repelidos por otros que se encuentran a lo largo de la vía, lo que eleva al tren unos centímetros del suelo. Una vez en "modo de levitación", el tren utiliza la interacción de sus electroimanes con los de las vías para crear fuerzas de atracción en la parte delantera del tren y de repulsión en la parte trasera. De esta forma se acelera el tren hasta alcanzar velocidades de hasta 500-600Km/h.



Existen varias líneas de trenes de levitación magnética en activo en el mundo y, en cuanto a proyectos, se publicó que Japón está desarrollando la tecnología de levitación magnética hasta sus últimas consecuencias y pretende materializarla construyendo el tren más rápido de la Tierra (con una velocidad punta del orden de 700 kilómetros por hora). Se estima que tanto la máquina como la vía especial que necesita podrían funcionar para el año 2025. En nuestro país, en 2007 los medios de comunicación publicaron que la Comunidad de Madrid pretende realizar un par de líneas de tren de levitación magnética (conocidas como tren bala), una entre el aeropuerto de Madrid-Barajas y la zona oeste de la ciudad; la otra entre Alcalá y la zona norte de Madrid.

Terminamos con otra aplicación de las fuerzas entre imanes y corrientes: el timbre eléctrico tradicional. Al pulsar el interruptor de un timbre eléctrico, circula una

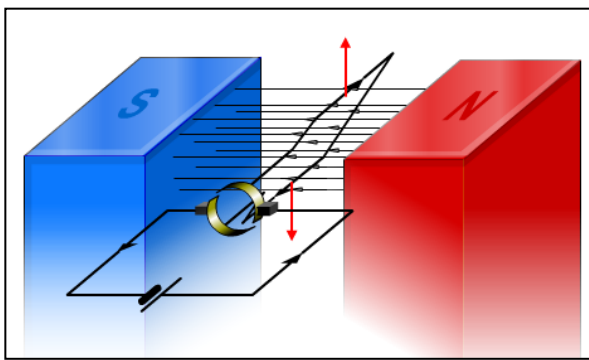


corriente eléctrica por un electroimán, cuyo campo magnético atrae a un pequeño martillo. Cuando el martillo golpea una campanilla se interrumpe el circuito, lo que hace que el campo magnético desaparezca y la barra vuelva a su posición. Este proceso se repite rápidamente y se produce el sonido característico del timbre.

Modernamente, muchos timbres no tienen interruptor, basándose en golpear la campana al doble de la frecuencia de la red. Algunos no tienen ni campana, bastando la vibración de los contactos transmitida a la caja del timbre.

APLICACIONES II. Motor electromagnético

Un motor eléctrico o electromagnético es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica. Aprovecha el hecho de que cuando un conductor por el que circula una corriente eléctrica se encuentra dentro de la acción de un campo magnético, tiende a desplazarse perpendicularmente a las líneas de acción de dicho campo magnético.



En la Web se dispone de una simulación que enseña el fundamento de un motor. Cuando circula corriente por la espira, sobre cada conductor se ejerce una fuerza magnética, que, siguiendo la ley de Lorentz, es perpendicular al plano que forman el campo magnético y el conductor. Sobre los dos conductores paralelos a las líneas del campo magnético, la fuerza es nula, y sobre los conductores perpendiculares a dichas líneas, las fuerzas componen un par que provoca el giro de la espira para llevarla a la posición vertical (donde el campo magnético que produce la espira se alinea con el campo magnético del imán).

Si se mantuviera la corriente, desde que la espira pasa por dicha posición, el par de fuerzas se opondría a la rotación. Por eso, la corriente se traslada del circuito exterior a la espira mediante un conmutador formado por dos chapas de metal con forma de media luna, denominadas delgas. Los extremos de la espira o escobillas hacen contacto primero con una delga y después con la otra, lo que provoca que, mientras la corriente por el circuito exterior tiene siempre el mismo sentido, la corriente en la espira invierta su sentido de circulación cada medio ciclo. Así, el par de fuerzas siempre impulsa la rotación.

El uso de los motores eléctricos se ha generalizado a todos los campos de la actividad humana desde que sustituyeran en la mayoría de sus aplicaciones a las máquinas de vapor. Tienen múltiples aplicaciones y se fabrican en tamaños de las más variadas dimensiones, desde los pequeños motores fraccionarios empleados en pequeños instrumentos hasta potentes sistemas, como los de las grandes locomotoras eléctricas.



Puesto para recargar las baterías de un coche eléctrico junto a la Puerta de Alcalá, en Madrid

El inconveniente es que las baterías son los únicos sistemas de almacenamiento de electricidad, y ocupan mucho espacio. Además, cuando se gastan, necesitan varias horas para recargarse antes de poder funcionar otra vez, mientras que en el caso de un motor de combustión interna basta sólo con llenar el depósito de combustible. Como se sabe, este problema es una de las causas de que no se haya impuesto aún el coche eléctrico. En el ferrocarril, en cambio, el problema se resuelve tendiendo un cable por encima de la vía, que va conectado a las plantas de generación de energía eléctrica. La locomotora obtiene la corriente del cable

por medio de una pieza metálica llamada patín, y no son necesarios sistemas de almacenamiento de electricidad.

Todos los materiales de este tema se pueden descargar en: <http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Electromagnetismo\Electromagnetismo.htm>, página dedicada al Electromagnetismo dentro de la Web del Departamento de Física y Química del IES "Leonardo Da Vinci" de Alicante (<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/fisica.htm>)