

La corriente eléctrica y la ley de Ohm

Una corriente eléctrica es un flujo de cargas que pasa por una zona del espacio. El ejemplo más familiar que conocemos es un alambre conductor conectado a las terminales de una pila o batería. En este caso, un haz de electrones fluye desde el polo negativo de la batería hacia el polo positivo, a lo largo del alambre. Cuando el flujo de cargas es constante en el tiempo, se habla de **corriente continua** o *corriente estática*. Las linternas, los aparatos de radio con pilas, el cableado de los automóviles, etc., son ejemplos de dispositivos que trabajan con corrientes continuas. La corriente eléctrica puede detectarse y medirse con unos aparatos que se llaman amperímetros o galvanómetros

La corriente eléctrica i en un conductor se define como

$$i = \frac{dq}{dt}$$

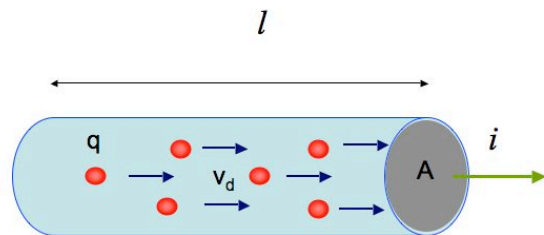
donde dq es la carga que atraviesa una sección transversal del conductor en el intervalo de tiempo dt . La unidad de corriente en el sistema SI es el amperio (A),

$$1 \text{ A} = 1 \text{ C/s.}$$

La corriente en un conductor se relaciona con el movimiento de los portadores de carga a través de la relación

$$i = nqv_d A,$$

donde n es la densidad de portadores de carga, q es su carga, v_d es la velocidad de arrastre y A es el área transversal del conductor.



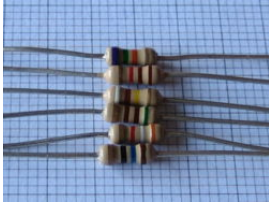
La **resistencia** R de un conductor se define como el cociente entre la diferencia de potencial en el conductor y su corriente

$$R = \frac{\Delta V}{i}$$

La unidad de resistencia en el sistema SI es el volt entre amperio, que se denomina ohm (Ω); $1\Omega = 1\text{V/A}$

La resistencia es una cantidad que determina la corriente que se establece en un circuito simple debido a una diferencia de potencial. Si la resistencia se incrementa, la corriente decrece. Si la resistencia decrece la corriente se incrementa.

Para muchos materiales, incluyendo la mayoría de los metales la resistencia es constante para un amplio rango de diferencias de potencial. Este comportamiento es conocido como **Ley de Ohm** debido a que Georg Simon Ohm (1787-1854) fue el primero en realizar un estudio sistemático de la resistencia eléctrica. Es importante remarcar que la ley de Ohm no es una ley fundamental de la naturaleza sino una relación empírica que es válida solo para ciertos materiales y ciertos aparatos en un rango limitado de condiciones. Se les llama materiales ohmicos a aquellos que obedecen la ley de Ohm.



Una resistencia, o resistor, es un elemento en un circuito eléctrico que presenta una resistencia. El símbolo de una resistencia es una línea quebrada.

De la ley de Ohm

$$\Delta V = iR$$

puede decirse que la diferencia de potencial a través de una resistencia es el producto de la resistencia y la corriente que circula a través de ella.

La resistencia de un alambre conductor ohmico es proporcional a su longitud l e inversamente proporcional a su área transversal. Esto es,

$$R = \rho \frac{l}{A},$$

donde ρ es la **resistividad** del material del que está compuesto el conductor. La función inversa de la resistividad se denomina **conductividad**

$$\sigma = 1/\rho.$$

La resistividad de un conductor varía con la temperatura de una forma aproximadamente lineal, es decir

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$$

donde α es el coeficiente de temperatura de la resistividad y ρ_0 es la resistividad a una temperatura de referencia T_0 .

En un circuito eléctrico típico, la energía se transfiere de una fuente, como la batería, a algún dispositivo, como un foco o un receptor de radio. Como se vio anteriormente, una carga positiva se mueve de una región de potencial alto a otra de menor potencial. Así pues, si se satisface el principio de conservación de la energía, su energía potencial debe transformarse en otras formas de energía. Por ejemplo, en un calentador eléctrico la energía potencial eléctrica se transforma en calor, en un foco se transforma en luz (y calor) y en un motor se transforma en energía mecánica (la energía cinética del rotor). Una corriente alterna se puede utilizar en las comunicaciones como el telégrafo y la televisión y en control como en las computadoras. De hecho todos los aparatos eléctricos y electrónicos utilizan corrientes de un modo u otro. También utilizan corriente los sistemas biológicos. La anguila eléctrica crea una gran corriente para defenderse y ciertos peces navegan por medio de pequeñas corrientes que crean en el agua que les rodea. Las corrientes intervienen en el transporte de impulsos nerviosos a lo largo de una fibra nerviosa.

Es un hecho conocido que cuando una corriente eléctrica está pasando por un cable, éste se calienta. Este fenómeno se conoce como **Efecto Joule** y es tanto más acusado cuanto mayor sea la resistencia eléctrica del cable. Si se mantiene una diferencia de potencial ΔV entre los extremos de un elemento de un circuito, la potencia o ritmo al que se suministra energía al elemento del circuito es

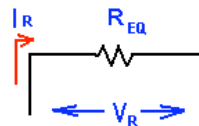
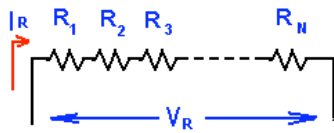
$$P = i\Delta V.$$

Dado que la diferencia de potencial a través de una resistencia es $\Delta V = iR$, podemos expresar la potencia suministrada a una resistencia de la siguiente forma

$$P = i^2 R = \frac{(\Delta V)^2}{R}$$

La unidad para la potencia en el SI es el watt. La compañía eléctrica que suministra energía a nuestros hogares mide la transferencia de energía en unidades de kilowatt-hora, la cual es la cantidad de energía transferida en 1 hora a una velocidad constante de 1kW.

La fem de una batería es el voltaje entre sus terminales cuando la corriente es cero.

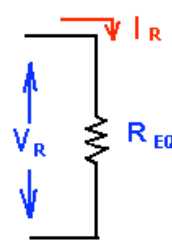
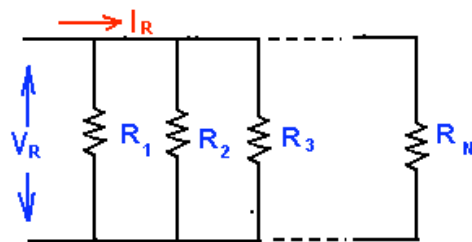


La resistencia equivalente de un conjunto de resistencias conectadas en serie es

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

La resistencia equivalente de un conjunto de resistencias conectadas en paralelo viene dada por

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$



La corriente que obtenemos al conectar un circuito a una batería es corriente directa. Los enchufes de nuestra casa nos proporcionan corriente alterna. Imaginemos que tenemos dos circuitos exactamente iguales, formados por un hilo conductor, un foco y un interruptor. El primero se conecta a una batería, que suministra corriente continua (directa) y el segundo a un enchufe de pared de corriente alterna. En los dos circuitos los electrones libre se mueven, en direcciones aleatorias, con una velocidad media del orden de millones de kilómetros/hora, incluso en circuito abierto. Estos movimientos son debidos a la agitación térmica y son tanto más rápidos cuanto mayor sea la temperatura.

En el caso de corriente continua, al cerrar el interruptor el foco se enciende de inmediato, ya que los electrones libres adquieren una velocidad en el sentido que dicta el campo eléctrico, del orden de 10^{-4} m/s, superpuesta a la de la agitación térmica. Conviene señalar que esta última velocidad (del orden de 10^6 m/s) es muy grande comparada con la otra. Así una velocidad de unos 10^{-4} m/s implica que un electrón tarda unas 3 horas en avanzar 1 metro.

En el caso de corriente alterna, los electrones oscilan hacia delante y hacia atrás.

Se puede afirmar que en un cable conductor los electrones libres ya existen, ya están ahí, antes de cerrar el interruptor. Si se cierra éste se ponen en movimiento, pero no entran ni salen en promedio. Dicho con otras palabras, ni la batería ni la planta generadora de corriente alterna dan electrones al circuito, lo que dan es calor, debido a la resistencia, y energía luminosa. Podemos afirmar que al pagar la factura eléctrica, la empresa suministradora nos vende energía, pero los electrones los ponemos los clientes. De acuerdo con lo anterior, se puede decir que si a través de un cable está pasando una corriente eléctrica, los electrones actúan como portadores móviles de la carga. A su vez, la existencia de electrones libres explica el hecho conocido por muchas personas de que los metales sean buenos conductores del calor y la

electricidad, simultáneamente, ya que en ambos casos son los electrones los responsables.

Casi toda la energía eléctrica que se utiliza en los hogares y las industrias se produce con generadores eléctricos, en forma de corriente alterna. La gran ventaja que tiene la corriente alterna frente a la corriente continua es que, en el caso de la corriente alterna, la energía eléctrica puede ser transportada a grandes distancias, a voltajes elevados y corrientes bajas, con el fin de disminuir las inevitables pérdidas en forma de calor por efecto Joule. Luego, a la entrada de los lugares donde va a ser utilizada, puede ser transformada con ayuda de transformadores con pérdidas mínimas, en voltajes más bajos (para mayor seguridad) e intensidades más altas (para su empleo)

Preguntas

1. ¿A qué nos referimos cuando hablamos de la velocidad de desplazamiento de los electrones?
2. Que factores afectan la resistencia de un conductor
3. Dos alambres A y B de sección circular están contruidos con el mismo metal y tienen la misma longitud, pero la resistencia del alambre A es tres veces mayor que la del B ¿cuál es la relación entre sus áreas transversales? ¿Cuál es la relación entre sus radios?
4. Si la carga fluye muy lentamente a través de un metal, ¿porqué no son necesarias varias horas para que una lámpara comience a iluminar cuando se cierra el interruptor?
5. ¿Cómo funciona una bombilla ordinaria?
6. ¿Qué es un kW-hora?
7. ¿Qué es un diodo?
8. ¿Por qué es posible que un pájaro se pare en un alambre de alta tensión y no se electrocute?
9. Las luces de un coche están conectadas en serie o en paralelo?
10. ¿Por qué se calienta un cable cuando transporta una corriente eléctrica?
11. ¿cuántos amperes fluyen por un foco de 60 watts de voltaje nominal de 120 volts cuando está conectado a un circuito de 120 volts? ¿cuántos amperes fluirían por la bombilla si estuviese conectada a un circuito de 240 volts?
12. Por medio de la relación $P=iV$, determine cuánta corriente consume una secadora de pelo de 1200 watts que opera a 120 volts. Luego determine la resistencia del aparato por medio de la ley de Ohm.
13. ¿Qué es un superconductor?

Problemas

1. Dos alambres A y B de sección circular están contruidos con el mismo material y tienen la misma longitud, pero la resistencia del alambre A es tres veces la del B. ¿Cuál es la razón entre sus áreas transversales? ¿Cuál es la razón entre sus radios?
2. Un cilindro de aluminio, de radio 2cm, tiene una longitud de 1.2m. Obtenga el valor de la resistencia eléctrica entre los extremos del cilindro.

3. Se requiere construir una resistencia con un alambre de hierro que tiene un radio de 0.6 cm. Si la resistencia debe tener el valor de 1.25Ω , ¿qué longitud debe tener el alambre?
4. Una barra cuadrada de aluminio tiene 1 m de longitud y 5mm de lado (a) ¿cuál es la resistencia entre sus extremos? (b) ¿Cuál debe de ser el diámetro de una barra de cobre circular de 1 m de longitud, si su resistencia debe de ser igual a la de la barra de aluminio? (resistividad del cobre $1.7 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, resistividad del aluminio $2.8 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$)
5. Un alambre conductor largo se corta en N porciones de la misma longitud y se utilizan para construir un solo cable trenzado. Si la resistencia del cable es R, ¿qué valor tenía la resistencia del alambre?
6. Un alambre de aluminio de diámetro de 0.1 mm está en un campo eléctrico uniforme de 2 V/m en toda su longitud. La temperatura del cable es de 50°C . Suponiendo que exista un electrón libre por átomo determina: (a) la resistividad, (b) la densidad de corriente en el alambre, (c) la corriente total en el alambre, (d) la velocidad de arrastre de los electrones de conducción. (e) ¿Cuál es la diferencia de potencial que debe de existir entre los extremos del alambre, con una longitud de 2 m, para generar el campo eléctrico indicado?
7. Un calefactor por radiación, de 1250 W, se diseña de tal forma que opera a 115 V. (a) ¿Cuál será la corriente en el calefactor? (b) ¿Cuál será la resistencia de la bobina calefactora?

Magnetismo

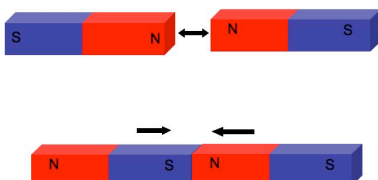
Al igual que con los fenómenos eléctricos, los fenómenos magnéticos se observaron desde la antigüedad. En la Grecia clásica, hace 2500 años aproximadamente, ya se sabía la magnetita tiene la propiedad de atraer piezas de hierro. Este mineral es un ejemplo de lo que ahora llamamos imanes permanentes. Experimentando con ellos, se encontró que los imanes permanentes ejercen fuerzas entre sí y sobre trozos de hierro sin magnetizar. Se descubrió que cuando una varilla de hierro se pone en contacto con un imán natural, la varilla se magnetiza. Cuando esta varilla se hace flotar en agua o se suspende por su parte central, utilizando una cuerda, tiende a alinearse de norte a sur; así funciona la aguja de una brújula común.



Antes de que se entendiera la relación de la interacciones magnética con las cargas en movimiento, la interacción de los imanes permanentes con la agujas de las

brújulas se describió en términos de polos magnéticos.

Si un imán permanente con forma de barra puede girar libremente, uno de sus extremos apuntará hacia el norte. A este extremo se le conoce como polo Norte



mientras que el extremo opuesto es denominado polo Sur. Los polos opuestos se atraen y los polos iguales se repelen. Un objeto que contiene hierro no magnetizado es atraído por cualquiera de los polos de un imán permanente.

En analogía con la interacción eléctrica, se describe a la interacción magnética diciendo que un imán establece un campo magnético en el espacio que lo rodea y que un segundo cuerpo responde a dicho campo. La aguja de una brújula tiende a alinearse con el campo magnético que existe en la posición de la aguja.

En el SI, la unidad del campo magnético es el tesla, abreviado como T. Un tesla está definido como

$$1 \text{ tesla} = 1 \text{ T} = 1 \text{ N/Am}$$

A fin de tener una idea de los órdenes de magnitud, puede decirse que el campo magnético de la Tierra es del orden de 10^{-5} tesla. Un imán de refrigerador genera un campo magnético del orden de 10^{-3} T. Dentro de los átomos existen campos de unos 10 T. Los imanes más potentes pueden tener campos de hasta 45 T y los electroimanes alcanzan valores de 120 T. En la superficie de algunas estrellas de neutrones se tienen campos de 10^8 T.

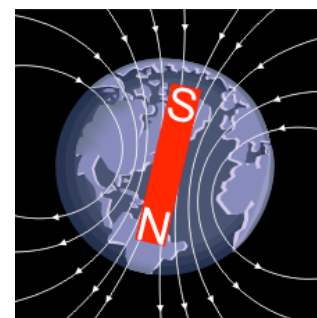
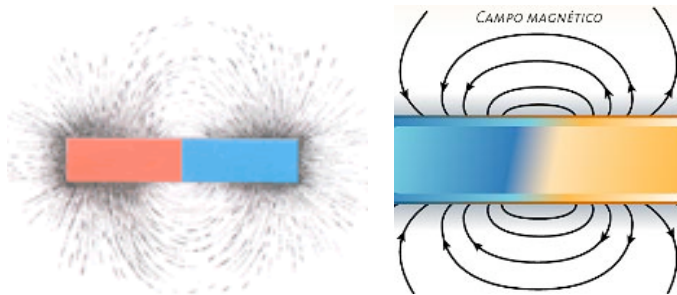
Cuando se analizó el concepto de campo eléctrico se introdujo el concepto de línea de campo eléctrico con el fin de visualizar las características espaciales del campo. De manera análoga se definen las líneas de campo magnético. Debemos recalcar que en el caso del campo eléctrico a las líneas de campo también suele llamárseles líneas de fuerza, para el caso del campo magnético esto no es correcto ya que como se verá más adelante, en este caso la fuerza que experimenta una partícula cargada inmersa en un campo magnético y éste último no son paralelos.

Si se tiene un imán y se coloca una pequeña limadura de hierro en la cercanía de éste, el campo magnético del imán hace que la limadura se vuelva

a su vez un pequeño imán con polos N y S. Puesto que los polos opuestos se atraen, la limadura de hierro se alineará en la dirección del campo magnético. En cada punto del espacio la tangente a la línea de campo es la dirección del campo magnético.

En consecuencia, podemos usar limaduras de hierro para observar experimentalmente las líneas de campo magnético.

La Tierra misma es un gran imán; su polo Norte geográfico está cerca de su polo sur magnético; por eso el polo norte de la aguja de una brújula apunta a hacia el Norte. El eje magnético terrestre no es paralelo al eje geográfico, de modo que la de la aguja de la brújula está ligeramente desviada del norte geográfico. Esta desviación, que varía con la posición, se conoce como declinación magnética. Además, el campo magnético no es horizontal en la mayoría de los puntos de la superficie terrestre; el ángulo que forma con la horizontal, hacia arriba o hacia abajo, se conoce como inclinación magnética. En los polos magnéticos el campo



magnético apunta en la dirección vertical.

Los animales sienten el campo magnético. Experimentos han llevado a demostrar que las aves se orientan durante el día por la posición del sol pero por la noche se sirven del campo magnético terrestre. La paloma parece utilizar la inclinación del campo magnético terrestre para distinguir el norte del sur.

El concepto de polo magnético puede parecer similar al de carga eléctrica y los conceptos de polo Norte y polo Sur parecerían similares a los de carga negativa y positiva. Pero la analogía es **errónea** porque, aunque sí existen cargas positivas y negativas separadas, no hay pruebas de que exista de un solo polo magnético aislado; siempre aparecen en pareja. Si se divide un imán en dos partes, cada parte se convierte en un imán con dos polos opuestos. Este hecho se refleja en la llamada Ley de Gauss Magnética dada por la expresión

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

La existencia de un polo magnético aislado o monopolo magnético, tendría difíciles implicaciones en la física teórica, aunque se han hecho importantes intentos por aislar un monopolo magnético sin éxito.

Fuerza sobre una partícula

En lo que sigue, se precisará de que manera una partícula cargada interacciona con un campo magnético externo. Si en una región del espacio donde existe un campo magnético penetra una partícula cargada con una cierta velocidad \mathbf{v} los experimentos muestran lo siguiente:

- La partícula cargada experimenta una fuerza que crece con el valor del campo magnético. Es decir si se duplica el valor de éste, también lo hace la fuerza sobre la partícula.
- La fuerza que experimenta la partícula crece con el valor de su carga. Es decir si se duplica el valor de ésta también lo hace la fuerza sobre la partícula.
- La fuerza que experimenta la carga es proporcional al valor de su velocidad
- La fuerza magnética es perpendicular a la dirección del campo magnético y a la dirección en que se mueve la partícula
- La magnitud de la fuerza depende del ángulo que forman la dirección del campo magnético y la dirección en que se mueve la partícula. Si la dirección del campo magnético y la dirección en que se mueve la partícula coinciden, la partícula no experimenta fuerza alguna, es decir, en este caso parece como si la carga no viese el campo magnético.

Estas observaciones pueden resumirse en la expresión matemática

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

Obsérvese que un campo magnético no realiza trabajo alguno sobre una partícula cargada ya que la fuerza que ejerce es perpendicular a la

velocidad de la carga. Así pues, el campo magnético puede modificar la dirección de la velocidad de la partícula pero no su magnitud.

Los campos magnéticos se utilizan en muchos aparatos para variar y controlar la dirección de un haz de partículas cargadas. Por ejemplo, en el cinescopio de un aparato de televisión un campo magnético dirige el haz de electrones que chocarán contra la pantalla. La óptica de un microscopio electrónico se diferencia de la de un microscopio normal en que, en lugar de lentes de vidrio, se utilizan lentes magnéticas en forma de bobinas recorridas por una corriente. En el espectrómetro de masas, que es un instrumento utilizado para medir la masa de átomos y moléculas individuales, se emplea un campo magnético para dividir un haz de partículas cargadas.



A gran escala, el campo magnético que actúa sobre las partículas cargadas que constituyen los rayos cósmicos se comporta a modo de un gran acelerador cósmico, provocando toda una variedad de impresionantes fenómenos en la atmósfera terrestre. Las emisiones de rayos X, destellos estelares, auroras boreales y australes,

se producen cuando las partículas son atrapadas por el campo magnético de la Tierra y chocan con las moléculas de la atmósfera generando la emisión de luz.

Trayectoria de partículas cargadas sometidas a un campo magnético

Veamos más a detalle lo que ocurre cuando partículas cargadas con velocidad arbitraria ingresan a una zona en donde existe un campo magnético. De la expresión para la fuerza podemos observar que ésta corresponde al producto vectorial entre la velocidad de la partícula y el campo magnético. Así pues:

- La fuerza que experimenta una partícula cargada debido a un campo magnético es perpendicular tanto a la dirección del campo magnético como a la de la velocidad que tiene.
- Si se tiene una partícula en reposo en el interior de un campo magnético externo está no experimentará fuerza alguna.

Consideremos un campo magnético homogéneo, es decir uno que tiene la misma magnitud y dirección para todo punto del espacio, y una partícula cargada con una velocidad perpendicular a la dirección del campo magnético. Observemos que en este caso la magnitud de la fuerza corresponde a

$$F = qvB$$

y su dirección es perpendicular a la de la velocidad de movimiento, cuya magnitud no cambia ya que el campo magnético no realiza trabajo, y a la dirección del campo magnético externo. Si recordamos el módulo de mecánica observamos que el tipo de movimiento que describe la partícula cargada es totalmente análogo al movimiento circular uniforme, que describen en una primera aproximación los objetos estelares en presencia de una fuerza de tipo central, es decir la partícula cargada en presencia del campo magnético describirá una órbita circular con una aceleración centrípeta dada por

$$a = \frac{v^2}{r},$$

con v la magnitud de la velocidad y r el radio de la trayectoria.
Así pues:

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

de donde es posible obtener el radio de curvatura

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

o bien una frecuencia de rotación

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

De aquí podemos deducir que es posible generar haces de partículas cargadas que son aceleradas mediante campos eléctricos y cuya trayectoria puede ser dirigida utilizando campos magnéticos.

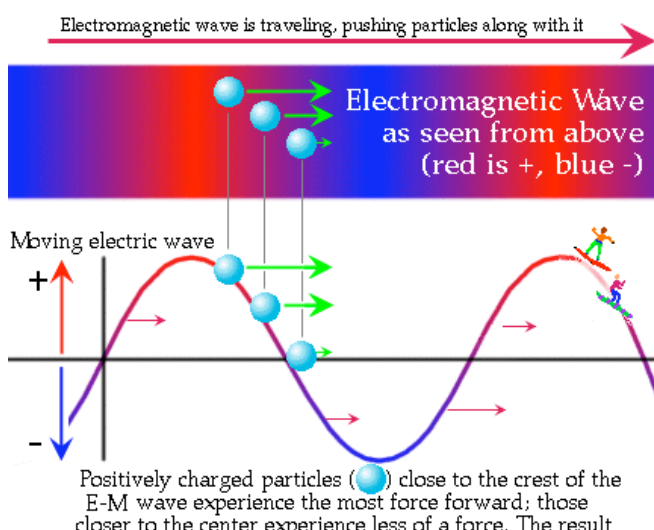
Tubo de televisión.

Un tubo de televisión es muy parecido a un tubo de rayos catódicos excepto en que el haz es desviado magnéticamente más que eléctricamente. La imagen está compuesta de 525 líneas horizontales individuales y cambia 30 veces por segundo. Esto quiere decir que el haz barre horizontalmente la pantalla $525 \times 30 = 15750$ veces por segundo. Mientras el haz es barrido horizontalmente, también lo hace verticalmente a una velocidad de 60 veces por segundo. Para formar una imagen hacen falta dos barridos verticales porque solo la mitad de las líneas son exhibidas en cada barrido. Los barridos horizontales y verticales son producidos por los circuitos electrónicos que hay en el aparato, pero están sincronizados con la señal transmitida por la emisora. Esta señal controla también la intensidad del haz electrónico y por lo tanto el brillo del punto luminoso producido cuando el haz barre la pantalla.

Lo que produce una imagen determinada es la variación de la intensidad del haz que recorre la pantalla de un lado a otro.

El ojo ve una sola imagen, porque el ojo retiene la imagen de una línea alrededor de $1/20$ s después de que la línea a desaparecido (persistencia) de la visión. Así pues, el ojo todavía ve la primera línea de una imagen concreta cuando la última línea se forma $1/30$ s más tarde.

Aceleradores de partículas

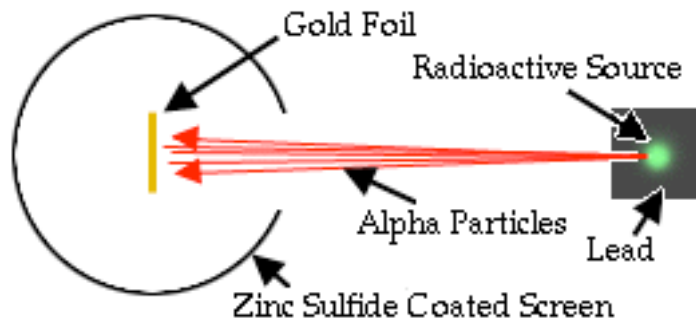


Como ya mencionamos en los grandes aceleradores el objetivo es acelerar partículas que chocarán con un blanco u otras partículas. Hay varios tipos de aceleradores. En el acelerador lineal el campo eléctrico que se utiliza es el que está asociado a una onda electromagnética viajera. Las partículas positivas

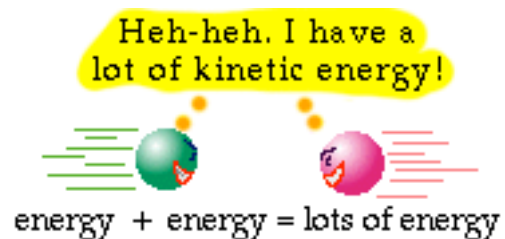
más cercanas a la cresta de la onda electromagnética experimentan la mayor fuerza hacia adelante mientras que las más cercanas a nodo experimentan menos fuerza, el resultado es que las partículas tienden a moverse con la onda.

Existen varios tipos de aceleradores que proveen colisiones de dos tipos:

- Los aceleradores de blanco fijo en los cuales partículas cargadas, como electrones o protones, son acelerados por un campo eléctrico y chocan contra un blanco, que puede ser sólido, líquido o gas. Un detector determina la carga, momento, masa, energía, etc. de las partículas resultantes de la colisión. chocan contra un blanco fijo . Un ejemplo de este tipo de procesos es el que como ya mencionamos realizó Rutherford, en donde el haz estaba constituido por partículas alfa de gran energía, el blanco era una lámina de oro fija y el detector una pantalla de sulfuro de zinc.



- Los aceleradores de haces que colisionan. En este tipo de experimento dos haces de partículas viajando en direcciones contrarias se encuentran en un punto del acelerador dándose la colisión. La ventaja de este tipo de arreglo es que ambos haces tienen una gran energía cinética de forma que se cuenta con mayor energía, suficiente para producir partículas mucho más masivas que las que se obtendrían en la colisión de un solo haz contra un blanco fijo.



Los aceleradores tienen dos formas posibles:

- Linacs: aceleradores lineales en donde las



partículas inician su viaje en un extremos y terminan en el otro. Este tipo de aceleradores son utilizados en las colisiones de blanco fijo haciendo colisionar el haz contra un blanco fijo en el extremo final del acelerador, o bien para inyectar partículas en un acelerador circular , o bien en una colisión de haces conectando dos aceleradores lineales.

- Los sincrotrones: que son acelerados construidos en círculos en donde las partículas dan vueltas y vueltas. En estos pueden diseñarse experimentos de haces que colisionan al tener a dos haces circulando en direcciones contrarias y haciéndolos colisionar en un punto del acelerador. También es posible extraer partículas de éste para realizar una colisión de blanco fijo, o bien en algún momento introducir un blanco en el acelerador de forma que el haz colisione contra él.



En el acelerador circular o sincrotrón es necesario mantener a las partículas viajando en círculos, sabemos que para que esto suceda es necesario contar con una fuerza constante en la dirección radial. En un acelerador circular las partículas son aceleradas utilizando un campo eléctrico mientras que grandes imanes proporcionan la fuerza para hacer que las partículas circulen en círculos. La presencia del campo magnético no afecta la energía de las partículas ya que como recordamos este no realiza trabajo. El campo magnético solo mantiene al haz de partículas circulando dentro de la estructura del acelerador. Los imanes también son necesarios para dirigir a los haces hacia los blancos, es decir para “enfocar” el haz de partículas de la misma forma que los lentes se utilizan con la luz.



Si un campo magnético hace que los electrones se muevan en la dirección de las manecillas del reloj ¿En qué dirección se moverán los positrones?

La ventaja de los aceleradores circulares sobre los aceleradores lineales es que las partículas en éste último dan muchas vueltas recibiendo una mayor aceleración y con ello energía. Así los sincrotrones pueden proporcionar partículas mucho más energéticas sin necesidad de hacerlas viajar una distancia enorme. Más aún, el echo de que las partículas pasen muchas veces por el mismo punto hace que haya mayor probabilidad de colisiones en un punto. Sin embargo, los aceleradores lineales son mucho más fáciles de construir porque no se necesitan los grandes campos magnéticos para mantener a las partículas viajando en círculos. Los sincrotrones también necesitan tener radios enormes para obtener altas energías, esto los hace muy costosos de construir. Por ejemplo el acelerador de Fermilab tiene un radio de -----, mientras que el del CERN un radio de -----

Los aceleradores con los que actualmente se cuentan son:

SLAC: Stanford Linear Accelerator Center, en California. Se descubrió el cuark charm (también descubierto en Brookhaven) y el leptón tau.

Actualmente producen un gran número de mesones B.

Fermilab: Fermi National Laboratory Accelerator, en Illinois.

Descubrieron los cuarks b y t y el neutrino tau.

CERN: European Laboratory for Particle Physics. Se encuentra en la frontera entre Suiza y Francia. Aquí se descubrieron las partículas W y Z.

BNL: Brookhaven National Lab, en New York, simultáneamente con el SLAC descubrieron el cuark c.

CESR: Cornell Electron-Positron Storage Ring, en New York. CESR realiza estudios detallados sobre el quark b.

DESY: Deutsches Elektronen-Synchrotron, en Alemania. Aquí se descubrieron los gluones.

KEK: High Energy Accelerator Research Organization, en Japón, actualmente esta produciendo un gran número de mesones B.

IHEP: Institute for High-Energy Physics, en China, realiza experimentos detallados sobre el lepton tau y el cuark c.

Uno de los resultados más conocidos de la electrodinámica clásica es el hecho de que las partículas cargadas que se encuentran aceleradas emiten radiación electromagnética, es decir energía en forma de ondas electromagnéticas. En el caso de un movimiento circular uniforme, las ondas electromagnéticas que se emiten tienen la misma frecuencia que la frecuencia de rotación y la pérdida de energía es mayor que en un acelerador lineal. Así pues, en el caso de una partícula que realiza una trayectoria circular en presencia de un campo magnético uniforme tendremos que se emitirán ondas electromagnéticas con una frecuencia dada por la expresión anterior. Esta radiación se conoce como radiación de sincrotrón y tiene muchas aplicaciones sobre todo en el mundo de la medicina dado que su alta frecuencia y por consiguiente la energía que portan es capaz de atacar a las células cancerosas

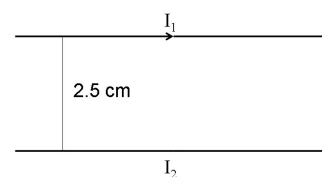
Preguntas

1. Dos partículas cargadas se proyectan hacia la región donde existe un campo magnético perpendicular a la dirección de sus velocidades. Si las cargas son desviadas en direcciones opuestas ¿qué puede concluirse sobre ellas?
2. Un campo magnético puede desviar un haz de electrones pero no puede acelerarlos ¿por qué?
3. Una partícula cargada se dirige a una región del espacio en la que hay un campo magnético uniforme, pero su velocidad no es perpendicular a la dirección del campo magnético. ¿Qué trayectoria describe?
4. ¿Cómo podría utilizarse una espira de corriente para determinar si existe un campo magnético presente?
5. La cámara de burbujas es un dispositivo utilizado para detectar partículas elementales ¿cómo funciona?
6. ¿Cómo funciona un espectrómetro de masas? ¿y un selector de velocidades?

- ¿Cuánto vale la fuerza magnética sobre un alambre de forma arbitraria que se encuentra en un campo magnético uniforme?
- ¿Cuánto vale la fuerza magnética neta sobre una espira cerrada en un campo magnético uniforme?
- Si un rayo está constituido por un haz de partículas negativas que se mueven rápidamente de una nube a la tierra. ¿En qué dirección se desvía el rayo por acción del campo magnético terrestre?
- ¿Es posible orientar una espira de corriente en un campo magnético uniforme de forma que no tienda a rotar?
- Se pueden usar campos magnéticos para confinar plasmas en “botellas magnéticas” pero sólo si el plasma está en movimiento ¿Por qué?

PROBLEMAS

- Encuentra el radio de curvatura de la trayectoria que seguiría una partícula en presencia de un campo magnético
- Se coloca una espira de corriente con momento magnético dipolar μ en presencia de un campo magnético uniforme \mathbf{B} de forma que μ y \mathbf{B} forman un ángulo θ entre ellos. Eligiendo arbitrariamente $U=0$ para $\theta=90^\circ$ demuestre que la energía potencial del sistema dipolo-campo es $U = -\mu \cdot \mathbf{B}$
- Se tienen un campo eléctrico $\mathbf{E} = 1500 \mathbf{j}$ V/m, un campo magnético $\mathbf{B} = 0.44 \mathbf{k}$ T y una partícula con carga $q = -8 \times 10^{-6}$ C que viaja a lo largo del eje x. ¿cuál debe de ser la velocidad de la partícula para que la fuerza sobre ella sea cero? Un protón viaja con una velocidad de 3×10^6 m/s en una dirección que forma un ángulo de 37.0° con un campo magnético de 0.3 T de magnitud y que apunta en la dirección +y. ¿Cuál es (a) la magnitud de la fuerza magnética sobre el protón y (b) su aceleración?
- Un protón de los rayos cósmicos en el espacio interestelar tiene una energía de 10 MeV y describe una órbita circular que tiene un radio igual al de la órbita de Mercurio alrededor del Sol (5.8×10^{10} m). ¿Cuánto vale el campo magnético en esta región del espacio?
- Investigue y describa con cuidado el funcionamiento de los ciclotrones y los sincrotrones.
- Un alambre transporta una corriente estacionaria de 2.4 A. Una sección recta del alambre tiene 0.75 m de largo y está situada en la dirección del eje x dentro de un campo magnético uniforme, $\mathbf{B}=1.6 \text{ T } \mathbf{k}$. Si la corriente está orientada en la dirección +x ¿cuál es la fuerza magnética sobre la sección de alambre?
- Dos alambres paralelos largos están separados una distancia de 2.50 cm y se repelen mutuamente. La magnitud de la fuerza, por unidad de longitud, que cada alambre ejerce sobre el otro es de 4.00×10^{-5} N/m. La corriente I_1 es de 0.600 A. a) ¿Cuál es la corriente I_2 en el segundo alambre? ¿Cuál es el sentido de dicha corriente? (recuerde que $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N/A²)



8. Dos alambres rectos, largos, pasan cerca uno del otro formando un ángulo recto. Si los alambres pueden moverse con libertad, indica lo que les ocurre cuando circulan corrientes eléctricas por ellos.

Ondas electromagnéticas y sus aplicaciones

En 1864 James Clerk Maxwell demostró que es posible describir a la luz como ondas electromagnéticas. En ese entonces había grandes controversias sobre la naturaleza de la luz. Había quien creía que la luz se originaba en los ojos de una persona y que los ojos enviaban haces que buscaban los objetos a ver. De hecho Superman ve en esta forma, excepto que su visión es particularmente penetrante debido a que envía rayos X por lo que puede ver a través de las paredes. Isaac Newton no consideraba que los ojos enviaran haces de luz sino que creía que la luz era un río de corpúsculos que hacían visibles a los objetos al ser dispersados por estos hacia nuestros ojos. Finalmente en el siglo XIX los experimentos inclinaron la balanza a favor de la teoría ondulatoria de la luz, la cual se volvió aceptada universalmente.

Las ondas electromagnéticas, deducidas a partir de las ecuaciones de Maxwell,

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q}{\epsilon_0},$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0,$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A},$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A},$$

tienen las siguientes características:

- El campo eléctrico y el campo magnético satisfacen ecuaciones de onda

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla^2 \mathbf{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{B} = 0$$

- Las ondas electromagnéticas viajan a través del vacío con una velocidad c , donde

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

- Los vectores de campo eléctrico y campo magnético de una onda electromagnética son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Es decir, las ondas electromagnéticas son ondas transversales.
- Las magnitudes instantáneas de \mathbf{E} y \mathbf{B} en una onda electromagnética están relacionadas por la expresión

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

- Una onda electromagnética transporta energía. La razón de flujo de energía que cruza una unidad de área está descrita por el vector de Poynting \mathbf{S} , donde

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}$$

- Las ondas electromagnéticas transportan momento lineal y por lo tanto pueden ejercer presión sobre las superficies. Si una onda cuya intensidad es I es absorbida completamente por una superficie sobre la cual incide normalmente, la presión de radiación sobre la superficie es

$$P = \frac{I}{c}$$

Si la superficie refleja totalmente una onda electromagnética que incide normalmente sobre ella, la presión de radiación se incrementa al doble.

- Una de las características que describe a una onda electromagnética puede ser la distancia entre crestas sucesivas, **la longitud de onda**. Las longitudes de onda en las ondas de agua puede variar de unos cuantos centímetros a decenas o centenas de metros. La longitud de onda de las ondas sonoras audibles en el aire tienen valores en un intervalo de unos cuantos centímetros a unos cuantos metros. En cambio la longitud de onda de una onda electromagnética está comprendida desde cero hasta infinito. Sin embargo, las longitudes de onda de la luz a la cual nuestros ojos son sensibles son bastantes cortas
- Otra propiedad característica de las ondas es su **frecuencia**. El número de crestas por segundo que pasan por un punto dado conforme la onda se propaga. La luz visible tiene una frecuencia de 500 millones de millones de crestas por segundo. Multiplicando la frecuencia por la longitud de onda se obtiene la **velocidad de propagación** de la onda.
- El campo eléctrico y el campo magnético de una onda plana propagándose a lo largo del eje x pueden expresarse como

$$E = E_{\max} \cos(kx - \omega t),$$

$$B = B_{\max} \cos(kx - \omega t),$$

donde ω es la frecuencia angular de la onda y k el número de onda. Estas ecuaciones representan una solución particular a la ecuación de onda para E y B .

- La naturaleza ondulatoria de la luz es también responsable por la aparición de colores en la luz reflejada en las burbujas de jabón o en las capas de aceite en las calles después de llover. Los colores resultan de un efecto llamado **interferencia**. La naturaleza ondulatoria de la luz también se manifiesta en un efecto llamado difracción, el cual es responsable de los colores que se ven en la rejilla de difracción cuando la luz se refleja en los discos compactos.

Hasta el trabajo de Maxwell se pensó que las ondas de luz eran transmitidas a través de un éter especial. Una onda debía viajar en algún medio; sin agua no puede haber ondas en el agua, sin aire no puede haber sonido,

entonces para la luz debía existir un éter que llenara el espacio. Hoy en día sabemos que las ondas electromagnéticas pueden transmitirse en el vacío.

Uno de los resultados importantes de la teoría de Maxwell era la demostración de que la luz en el visible es solo una pequeña porción de las ondas electromagnéticas que pueden generarse. El conjunto de ondas electromagnéticas se les conoce como espectro electromagnético.

Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) realizó, en 1888, una de las demostraciones experimentales más trascendentales de la teoría electromagnética al demostrar la existencia de la radiación electromagnética.



Una de las grandes aplicaciones del electromagnetismo en el siglo XIX fue la telegrafía. Así la física y en especial el electromagnetismo pasaron a generar un gran servicio social al dar un giro al mecanismo de comunicación. Guglielmo Marconi, un ingeniero Italia, inventó el telégrafo sin alambres y envió mensajes utilizando ondas electromagnéticas con frecuencias en el rango del radio. El primer mensaje

trasatlántico utilizó ondas de una frecuencia de 200000 vibraciones por segundo en una longitud de onda de casi una milla.

¿Qué pasa cuando una onda electromagnética incide sobre una partícula?

PREGUNTAS

1. ¿Cómo se generan las ondas electromagnéticas?
2. ¿Un alambre conectado a las terminales de una batería genera ondas electromagnéticas?
3. Enliste las similitudes y diferencias entre las ondas de sonido y las ondas electromagnéticas
4. Cuando la luz viaja a través de una región del espacio ¿qué es lo que se mueve?
5. La luz del Sol tarda aproximadamente 8.33 minutos en alcanzar la Tierra. Durante este tiempo la Tierra ha continuado su movimiento alrededor del Sol. ¿Qué tan lejos está la localización del Sol de su imagen en el cielo?

PROBLEMAS

1. Investigue y explique como funciona una antena
2. Con sus propias palabras, describa el significado físico del vector de Poynting
3. La amplitud del campo magnético de una onda electromagnética es 5.4×10^{-7} T. Calcule la amplitud del campo eléctrico si la onda se propaga en a) el vacío y b) en un medio donde la rapidez de la onda es de $0.8c$.
4. Una onda electromagnética plana tiene una frecuencia de 6.4×10^{14} Hz y una amplitud de campo eléctrico de 320 N/C. Escriba las funciones que describen al campo eléctrico y al magnético. De los valores numéricos para la amplitud del campo magnético, el número de onda k y la frecuencia angular ω .

5. El campo magnético de una onda electromagnética linealmente polarizada está descrito por la ecuación

$$B = (1.5 \times 10^{-6} T) \text{sen} \left[2\pi \left(\frac{x}{20} - \frac{t \times 10^8}{6.7} \right) \right],$$

donde x está en m y t en s. (a) Calcule la velocidad de la onda y (b) escriba la expresión para el campo eléctrico.

6. Un láser de helio-neón para la enseñanza tiene una potencia de operación de 5 mW. a) Determine el valor máximo del campo eléctrico en un punto donde la sección transversal del haz es de 4 mm^2 . (b) Calcule la energía electromagnética a 1 m de distancia del haz.