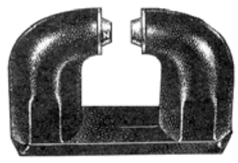
Tema 4

Campo Magnético

Antecedentes

- La palabra magnetismo viene de la región de Magnesia

$F_{e_3}O_4$



El magnetismo comenzó a ser bien comprendido en el transcurso de los dos últimos siglos.

Petrus Peregrinus, (1270)

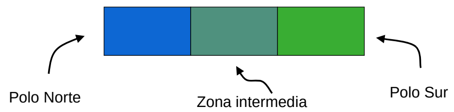
Hans Christian Oested (1819)

Michael Faraday (1850) y Joseph Henry (1848)

James Clerk Maxwell (1860)

Imanes y Magnetismo. El magnetismo de los imanes

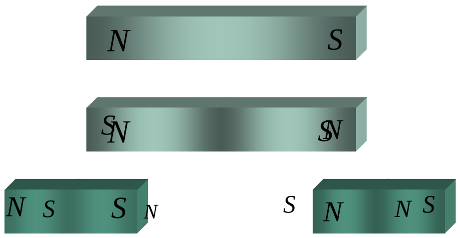
- Cuando se estudian las acciones entre barras imantadas se observan fuerzas de atracción y repulsión, para tratar de explicar estos fenómenos se imagino que en los extremos de la barra imantada masas, cargas o polos magnéticos.
- El estudio del comportamiento de los imanes pone de manifiesto la existencia en cualquier imán de dos zonas extremas o polos en donde la acción magnética es más intensa, siendo prácticamente nula en el centro



Imanes y Magnetismo. El magnetismo de los imanes

- Las experiencias con imanes ponen de manifiesto que polos del mismo tipo se repelen y polos de distinto tipo se atraen
- Otra propiedad característica del comportamiento de los imanes consiste en la imposibilidad de aislar sus polos magnéticos.
- Si se corta un imán recto en dos mitades se reproducen otros dos imanes con sus respectivos polos norte y sur. Y lo mismo sucederá si se repite el procedimiento nuevamente con cada uno de ellos.
- No es posible, entonces, obtener un imán con un solo polo magnético semejante a un cuerpo cargado con electricidad de un solo signo

Imanes y Magnetismo. El magnetismo de los imanes



Características de las fuerzas magnéticas

- Un imán sólo ejerce fuerzas magnéticas sobre cierto tipo de materiales, en particular sobre el hierro
- Las fuerzas magnéticas son fuerzas de acción a distancia, es decir, se producen sin que exista contacto físico entre los dos imanes.
- La intensidad de la fuerza magnética de interacción entre imanes disminuye con el cuadrado de la distancia que los separa:

$$F_m \propto \frac{1}{r^2}$$

Características de las fuerzas magnéticas

- Mediante experiencias similares a las realizadas por Coulomb se pudo expresar la siguiente ecuación

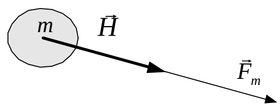
$$F_m = \frac{1}{4\pi\mu_0}\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

- Donde m_1 y m_2 son las masas magnéticas y μ_0 es una constante llamada permeabilidad magnética del vació.

Características de las fuerzas magnéticas

- Así como vimos el concepto de campo eléctrico, podemos asociar la acción a distancias que producen las masas magnéticas , con el concepto de un campo.
- El vector que representa este campo es el vector $\vec{H}$, llamado *vector intensidad de campo magnético* y se lo define en dirección, sentido y modulo mediante la relación

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}_m}{m}$$

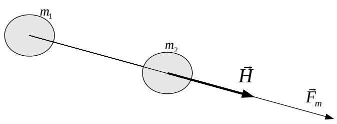


Características de las fuerzas magnéticas

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}_m}{m} \qquad \rightarrow \qquad F_m = \frac{1}{4\pi\mu_0}\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

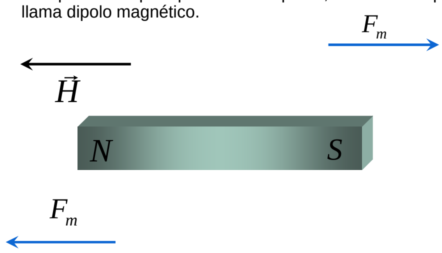
Entonces

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi\mu_0}\frac{m}{r^2}$$



Características de las fuerzas magnéticas

- Vimos que no es posible aislar una masa magnética sur cortando la barra por la mitad.
- Los polos siempre aparecen de a pares, formando lo que se llama dipolo magnético.

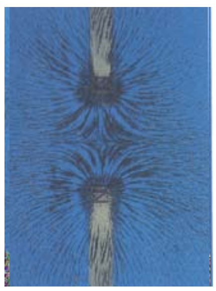


Espectros magnéticos

- **El hecho de que los dipolos magnéticos se orden en función del campo intensidad de campo magnético $\vec{H}$ permite obtener un mapa del mismo.**
- **Cuando se espolvorea en una cartulina o en una lámina de vidrio, situadas sobre un imán, limaduras de hierro, éstas se orientan de un modo regular a lo largo de líneas que unen entre sí los polos del imán.**
- **Esta imagen física de la influencia de los imanes sobre el espacio que les rodea hace posible una aproximación relativamente directa a la idea de campo magnético**

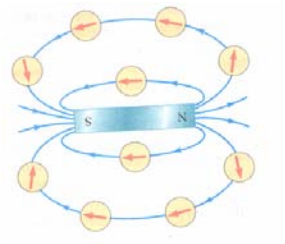
Espectros magnéticos

El espectro magnético de un imán permite no sólo distinguir con claridad los polos magnéticos, sino que además proporciona una representación de la influencia magnética del imán en el espacio que le rodea



Espectros magnéticos

- Podemos esquematizar las figuras anteriores



Inducción magnética

- En 1820, Hans Oersted observo que la aguja de una brújula colocada debajo o arriba de un conductor rectilíneo giraba hasta colocarse perpendicular al mismo cuando circulaba una corriente eléctrica.

Inducción magnética

- La experiencia probó que las corrientes eléctricas producían efectos magnéticos o sea originaban un campo magnético en el espacio que rodea al conductor
- Las limaduras se orientaban formando círculos en cuyo centro se encontraba el conductor, las líneas de fuerza magnética son cerradas, no proceden de una fuente y no terminan en un sumidero
- Los campos magnéticos ejercen fuerzas sobre las cargas en movimiento.

corrientes eléctricas $\longrightarrow$ campo magnético

Inducción magnética

- La presencia de la carga móvil, hace necesario utilizar un nuevo vector para describir las propiedades de los campos magnéticos.
- Se denomina *inducción* magnética $\vec{B}$
- En el vació este vector esta relacionado con $\vec{H}$ mediante la expresión:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

Inducción magnética

- La inducción magnética es un vector tal que en cada punto coincide en dirección y sentido con los de la línea de fuerza magnética correspondiente.
- Las brújulas, al alinearse a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético, indican la dirección y el sentido de la intensidad del campo de inducción $\vec{B}$
- La obtención de una expresión para $\vec{B}$ se deriva de la observación experimental de lo que le sucede a una carga en movimiento en presencia de un campo magnético.

Inducción magnética

- Si la carga q estuviera en reposo no se apreciaría ninguna fuerza mutua
- Sin embargo, si la carga q se mueve dentro del campo creado por un imán se observa cómo su trayectoria se curva, lo cual indica que una fuerza magnética F_m se está ejerciendo sobre ella.

Inducción magnética

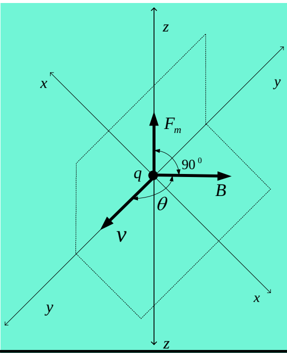
- F_m es tanto mayor cuanto mayor es la magnitud de la carga q y su sentido depende del signo de la carga.
- F_m es tanto mayor cuanto mayor es la velocidad $\vec{v}$ de la carga q
- F_m se hace máxima cuando la carga se mueve en una dirección perpendicular a las líneas de fuerza y resulta nula cuando se mueve paralelamente a ella.

Inducción magnética

La dirección de la fuerza magnética F_m en un punto resulta perpendicular al plano definido por las líneas de fuerza a nivel de ese punto y por la dirección del movimiento de la carga , q

o lo que es lo mismo, es perpendicular al plano formado por los vectores $\vec{B}$ y $\vec{v}$

Inducción magnética



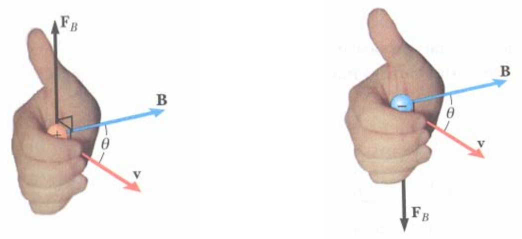
$$F_m = qvBsen\ \theta$$

$$B = \frac{F_m}{qvsen\ \theta}$$

$$\vec{F}_m = q\left(\vec{v}\,x\vec{B}\right)$$

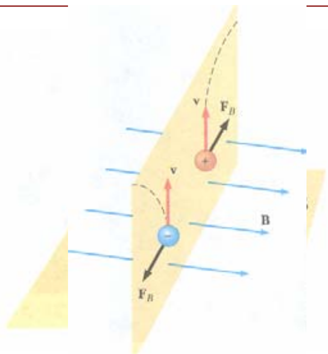
Inducción magnética

Sentido de la fuerza magnética, originada por cargas en movimiento



Carga positiva **Carga negativa**

Inducción magnética



Movimiento de partículas en un campo magnético estacionario

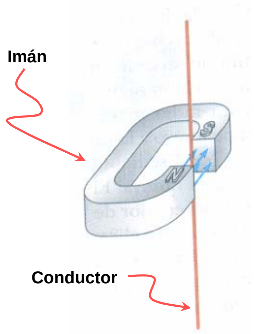
Fuerza de Magnética

Fuerza de Lorentz

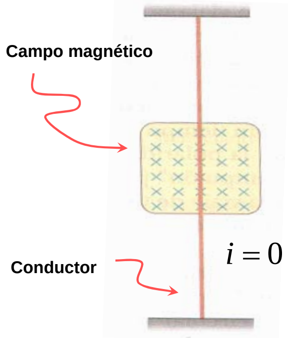
Fuerza Eléctrica

$$F_t = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q\left(\vec{E} + \vec{v}x\vec{B}\right)$$

Fuerza sobre un conductor con corriente

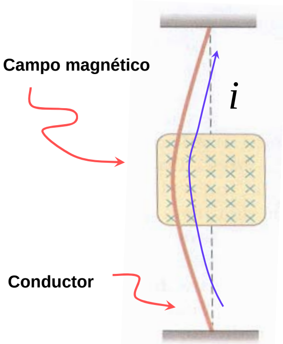


Fuerza sobre un conductor con corriente



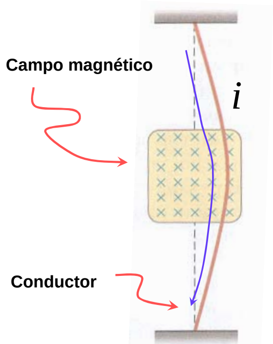
Fuerza sobre un conductor con corriente

$i \neq 0$



Fuerza sobre un conductor con corriente

$i \neq 0$



Fuerza sobre un conductor con corriente

q Se mueve con $\vec{v}$ entonces

$$\vec{F}_m = q\left(\vec{v}\, x \vec{B}\right)$$

Como la corriente en un conductor esta formada por un conjunto de portadores de carga en movimiento, podemos utilizar esta ecuación para obtener la fuerza magnética que ejerce un campo magnético sobre un conductor por el que circula una corriente i

Fuerza sobre un conductor con corriente

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

$$N = nVol = ndA$$

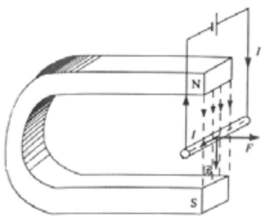
$$q = Ne = nedA$$

$$\vec{F}_m = \boxed{neAd}\left(\vec{v}_d\, x \vec{B}\right)$$

$$d\,\vec{v}_d = dv_d\,\vec{i} = v_d\,\vec{d}$$

$$\vec{F}_m = \boxed{neAv_d}\left(\vec{d} x \vec{B}\right)$$

$$i = neAv_d$$



$$\boxed{\vec{F}_m = i\left(\vec{d}\, x \vec{B}\right)}$$

Fuerza sobre un conductor con corriente

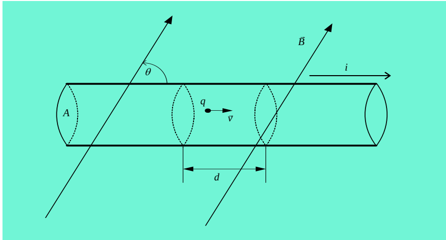
- La fuerza magnética sobre este trozo de alambre conductor es perpendicular a $\vec{d}$ y $\vec{B}$
- El módulo de la fuerza esta dado por

$$F_m = idBsen\,\theta$$

donde θ es el ángulo entre $\vec{d}$ y $\vec{B}$

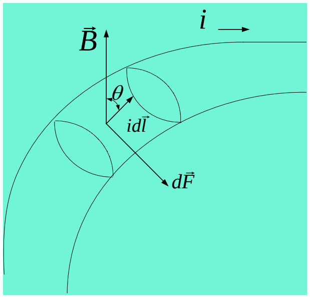
Fuerza sobre un conductor con corriente

- La ecuación que hemos obtenido esta restringida a conductores delgados rectos y campos magnéticos uniformes.



Fuerza sobre un conductor con corriente

- En general tendremos que trabajar con conductores que no son rectos y campos magnéticos que no son uniformes.

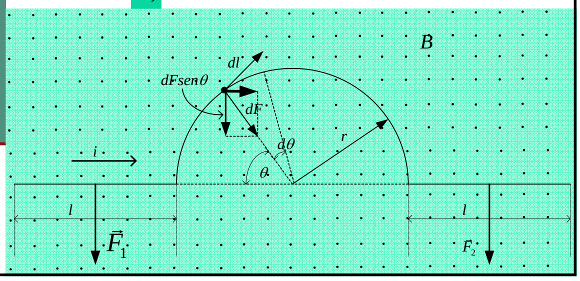


$$d\vec{F} = id\vec{l}\,x\vec{B}$$

$$\vec{F} = \int_L id\vec{l}\,x\vec{B}$$

Ejemplo: fuerza sobre un conductor con corriente

- Tenemos un alambre doblado, el cual lleva una corriente i
- y esta colocado en un campo magnético uniforme de inducción magnética $\vec{B}$, saliente al plano ,



Ejemplo: fuerza sobre un conductor con corriente

La fuerza sobre cada tramo recto $\quad F_1 = F_2 = ilB$

En el tramo circular un segmento de alambre de longitud $d\vec{l}$ experimenta una fuerza

$$dF = iBdl = iB(Rd\theta) \qquad \Rightarrow$$

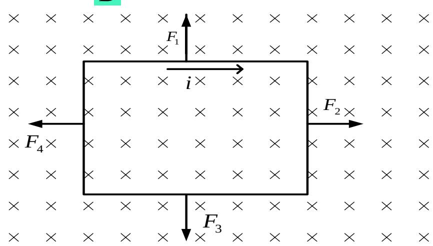
$$F = \int_0^{\pi} dFsen\theta = \int_0^{\pi} (iBRd\theta)sen\theta = iBR\int_0^{\pi} sen\theta d\theta = 2iBR$$

La fuerza resultante sobre todo el alambre es:

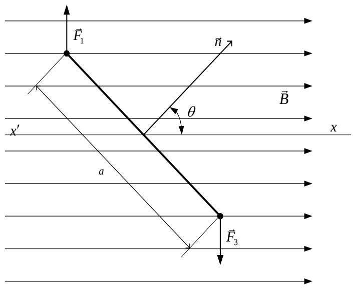
$$F_T = F_1 + F_2 + F = 2ilB + 2iBR = 2iB(l + R)$$

Momento de una espira de corriente

- En la figura vemos una espira rectangular de alambre de cuyos lados tienen una longitud a y un ancho b colocada en un campo de inducción uniforme B el plano forma un ángulo θ con la dirección de B .



Momento de una espira de corriente



La magnitud de las fuerzas es

$$F_1 = F_3 = i\,\overline{ab}$$

estas fuerzas tienen sentido contrario, pero no tienen la misma recta de acción si la bobina esta en la posición del ejemplo

Momento de una espira de corriente

- Hay en consecuencia un momento neto que tiende a hacer girar la bobina alrededor del eje . La magnitud de este momento se encuentra calculando el momento τ producido por una de las fuerzas y duplicándolo

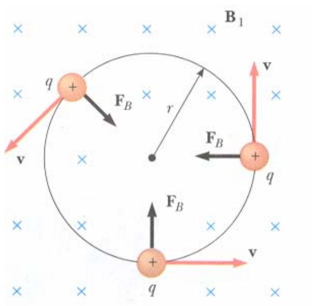
$$\tau = 2(iaB)\left(\frac{b}{2}\right)sen\theta = iabBsen\theta$$

$A = ab$ Es el área de la espira

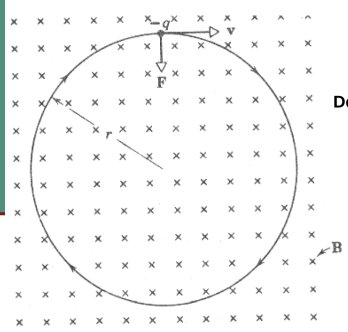
$\tau = (iB)Asen\theta$ Si la espira tiene N vueltas, será

$$\tau = NiBAsen\theta$$

Cargas aisladas en movimiento



Cargas aisladas en movimiento



$$\vec{F} = q\vec{v}\,x\,\vec{B} =$$
$$= qvBsen\ 90 = qvB$$

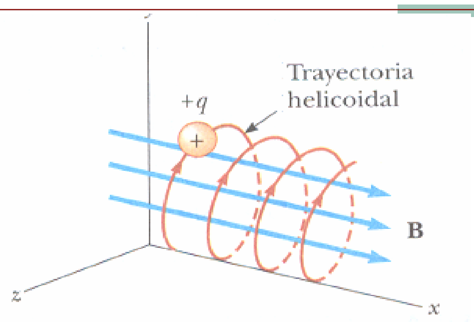
De la segunda Ley de Newton

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

Despejando nos da el radio de la trayectoria

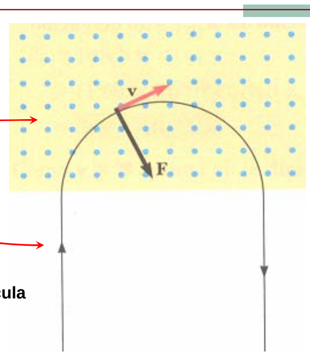
$$r = \frac{mv}{qB}$$

Cargas aisladas en movimiento



Cargas aisladas en movimiento

Campo Magnético



Movimiento de la partícula

Cargas aisladas en movimiento

- La velocidad angular está dada por $\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$
- Y la frecuencia angular será , $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m}$

que no depende de la velocidad de la partícula.

Las partículas rápidas se mueven en círculos grandes y las lentas en círculos pequeños.

Todas requieren el mismo tiempo para completar una revolución en el campo.

- La frecuencia , es una frecuencia característica para la partícula cargada en el campo, recibe el nombre de frecuencia del ciclotrón.

Ley de Biot y Savart

- Tras el descubrimiento de Oersted, de que la corriente eléctrica es una fuente de campo magnético, experimentos llevados a cabo por Ampere, Biot y Savart permitieron obtener la ley que relaciona a las corrientes y los campos magnéticos creados por ellas, conocida como:
- Ley de Biot y Savart.

La Ley de Biot y Savart es análoga en el magnetismo a la ley de Coulomb es la electroestática

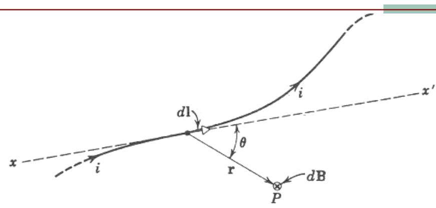
Ley de Biot y Savart

Para el campo eléctrico teníamos $d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dq}{r^2}\vec{r}$

Integrando obteníamos $\vec{E} = \int d\vec{E}$

De igual forma vemos ahora una distribución arbitraria de corrientes

Ley de Biot y Savart



Ley de Biot y Savart $dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi}\frac{dl \operatorname{sen}\theta}{r^2}$

Ley de Biot y Savart

- El campo resultante se encuentra integrando

$$\vec{B} = \int d\vec{B} \qquad \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\int i\frac{dl x \vec{r}}{r^2}$$

Donde $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}\frac{Tm}{A}$ es la permeabilidad magnética en el vacío

Las propiedades magnéticas del vacío son prácticamente iguales a las del aire.

Comparación entre la Ley de Coulomb y la Ley de Biot-Savart

Existen similitudes entre la Ley de Biot-Savart para el campo magnético y la Ley de Coulomb para el campo eléctrico:

- Ambas poseen una dependencia $1/r^2$ con la distancia que hay desde el punto fuente al punto considerado donde se calcula el campo, siendo idl la fuente del campo dB y dq la fuente del campo dE

Comparación entre la Ley de Coulomb y la Ley de Biot-Savart

- La constante $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ da la fuerza de la interacción eléctrica

  y la constante $\frac{\mu_0}{4\pi}$ da la fuerza de la interacción magnética

Comparación entre la Ley de Coulomb y la Ley de Biot-Savart

- También existen algunas diferencias significativas entre estas dos leyes

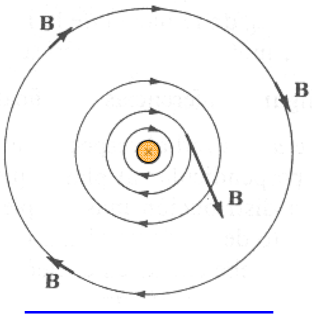
  La dirección de dE es radial respecto de la carga fuente dq

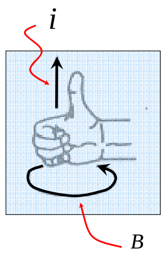
  mientras que la dirección de $d\vec{B}$ es perpendicular al plano que contiene a $id\vec{l}$ y a $\vec{r}$

Comparación entre la Ley de Coulomb y la Ley de Biot-Savart

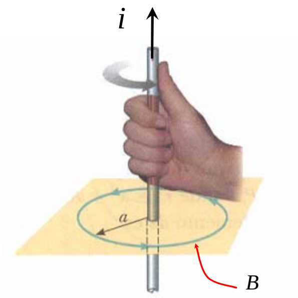
- Mientras que la distribución más simple de carga es la carga puntual aislada, un único elemento de corriente aislado no existe en una corriente estacionaria.
- Por lo tanto la carga debe entrar en el elemento de corriente por un extremo y salir por el otro, por lo que siempre están presente varios elementos de corriente, por que siempre tenemos que considerar la integral de línea que se extiende a lo largo de toda la distribución de corriente.
- El campo magnético en un punto es la superposición lineal de las contribuciones vectoriales debidas a cada uno de los elementos infinitesimales de corriente

Ejemplo: Campo magnético debido a una corriente rectilínea



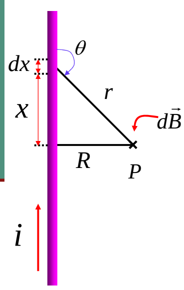


Ejemplo: Campo magnético debido a una corriente rectilínea



Ejemplo: Campo magnético debido a una corriente rectilínea

Calcularemos utilizando la ley de Biot y Savart: $dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi}\frac{dx\,sen\theta}{r^2}$



$$sen\theta = \frac{R}{\sqrt{x^2+R^2}} \qquad r = \sqrt{x^2+R^2}$$

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{Rdx}{\left(x^2+R^2\right)^{\frac{3}{2}}} =$$

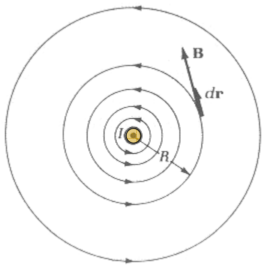
$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi R}\left.\frac{x}{\left(x^2+R^2\right)^{\frac{1}{2}}}\right|_{-\infty}^{\infty} = \boxed{B = \frac{\mu_0 i}{2\pi R}}$$

Ley de Amper

André-Marie Ampère, (1775-1836).

Se lo considera el descubridor del electromagnetismo, esto es la relación entre las corrientes eléctricas y los campos magnéticos

Ley de Amper

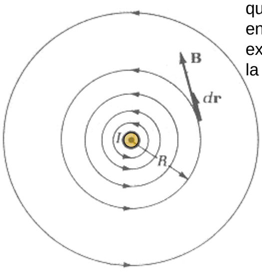


$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi R}$$

Hay como un cerramiento del campo magnético alrededor de la corriente que lo produce que puede expresarse en términos geométricos

Se dice entonces que la corriente esta enhebrada o enlazada por un camino cerrado

Ley de Amper



La relación entre el campo magnético que rodea al conductor y la corriente enlazada por el camino cerrado puede expresarse cuantitativamente mediante la *Ley de Amper.*

$$\oint \vec{B} d\vec{r} = \oint B dr \cos\theta = \oint B dr \cos 0^0 =$$

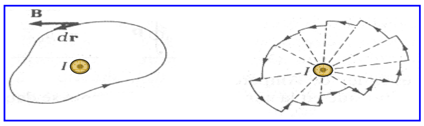
$$\oint B dr = B \oint dr = B(2\pi R)$$

Reemplazando

$$\oint \vec{B} d\vec{r} = \mu_0 i$$

Ley de Amper

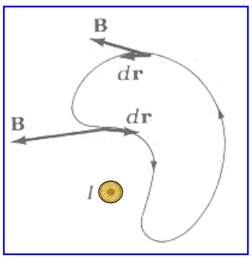
- El resultado es independiente del radio . Se cumplirá también para un camino formado por arcos y rectas radiales.



$$\oint \vec{B} d\vec{r} = \mu_0 i$$

Ley de Amper

- Cuando el camino cerrado no enlaza a la corriente, nos queda



$$\oint \vec{B} d\vec{r} = 0$$

Ley de Amper

- Si consideramos ahora el caso más general de tener un camino cerrado que enlaza algunas corrientes, pero no a todas, incluso estas pueden tener una forma general, no necesariamente que pasan por alambres largos y rectos nos quedará:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum i$$

La ley de Amper para campos magnéticos puede ser considerada como análoga a la Ley de Gauss para campos eléctricos:

Ley de Amper

- La analogía entre la Ley de Amper y la Ley de Gauss no es completa.
- Es importante tener presente que la Ley de Amper contiene una integral de línea a lo largo de un camino cerrado, mientras que la Ley de Gauss contiene una integral de superficie, extendida a una superficie cerrada.
- Es decir que los campos eléctricos estáticos son diferentes a los campos magnéticos estáticos.

Aplicaciones de las leyes de Biot-Savart y Amper

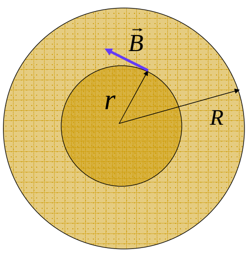
a) Campo magnético en el interior de un conductor

b) Campo magnético creado por una corriente circular

c) Campo magnético en un solenoide

d) Campo magnético en un toroide

Campo magnético en el interior de un conductor



i_0 Corriente total uniforme

i Corriente dentro del radio r

Podemos calcular i como

$$i = i_0 \frac{\pi r^2}{\pi R^2} = i_0 \frac{r^2}{R^2}$$

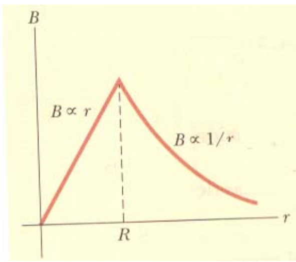
$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 i = \mu_0 i_0 \frac{r^2}{R^2}$$

Aplicando la ley de Amper nos quedará:

$$B(2\pi r) = \mu_0 i_0 \frac{r^2}{R^2}$$

$$\boxed{B = \mu_0 i_0 \frac{r}{2\pi R^2}}$$

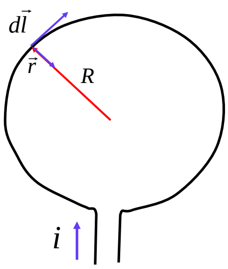
Campo magnético en el interior de un conductor



$$\boxed{B = \mu_0 i_0 \frac{r}{2\pi R^2}}$$

Campo magnético creado por una corriente circular

- Buscamos el valor del campo magnético en el centro de una espira. Aplicando la ley de Biot-Savart



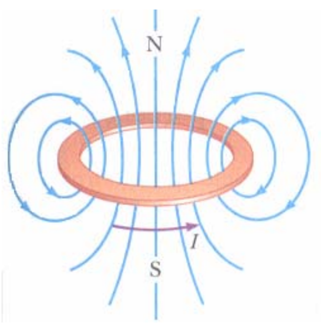
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int i \frac{dl x \vec{r}}{r^2}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} i \int_0^{2\pi R} \frac{d\vec{l}\, x \vec{r}}{R^2}$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi R^2} i \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0}{4\pi R^2} i 2\pi R =$$

$$\boxed{B = \frac{\mu_0}{2R} i}$$

Campo magnético creado por una corriente circular

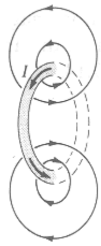


Campo magnético en un solenoide

- Un solenoide esta formado por el arrollamiento de un alambre muy largo sobre un cilindro, generalmente un cilindro circular
- Los arrollamientos o vueltas del alambre forman una bobina helicoidal, cuya longitud, medida a lo largo del eje del solenoide, es generalmente mayor que el diámetro de cada vuelta.
- Un parámetro importante de un solenoide es el número de vueltas que tiene por unidad de longitud.

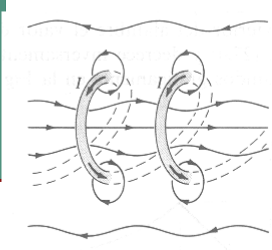
Campo magnético en un solenoide

- Para tratar de entender como es el campo magnético de un solenoide vemos primero el campo magnético de una única espira circular



En el dibujo las líneas de campo magnético están en un plano perpendicular a la espira

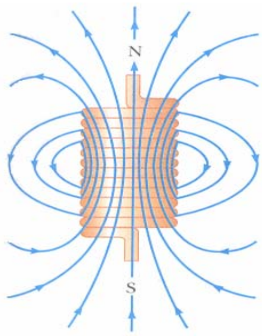
Campo magnético en un solenoide



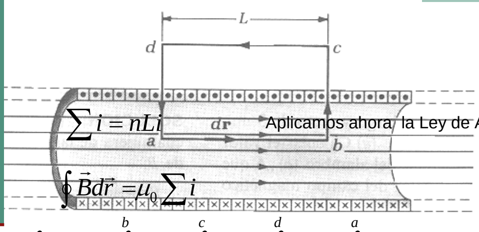
- En el interior del solenoide la contribución de cada vuelta al campo tiende a reforzar la contribución de las demás
- El campo resultante es aproximadamente uniforme y paralelo al eje del solenoide.

- En el exterior del solenoide las contribuciones tienden a cancelarse.
- El campo es relativamente pequeño.

Campo magnético en un solenoide



Campo magnético en un solenoide



$$\sum i = nLi$$

Aplicamos ahora la Ley de Amper

$$\oint \vec{B}d\vec{r} = \mu_0 \sum i$$

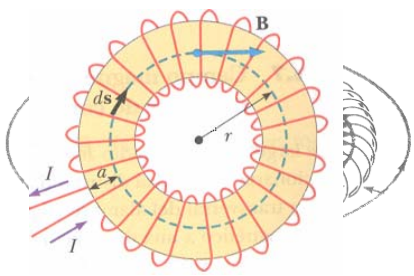
$$\oint_{abcd} \vec{B}d\vec{r} = \int_a^b \vec{B}d\vec{r} + \int_b^c \vec{B}d\vec{r} + \int_c^d \vec{B}d\vec{r} + \int_d^a \vec{B}d\vec{r}$$

$$\oint \vec{B}d\vec{r} = BL = \mu_0 nLi \Rightarrow \boxed{B = \mu_0 ni}$$

$$\oint_{abcd} \vec{B}d\vec{r} = \int_a^b \vec{B}d\vec{r} = \int_a^b Bdr\cos 0^0 = \int_a^b Bdr = B\int_a^b dr = BL$$

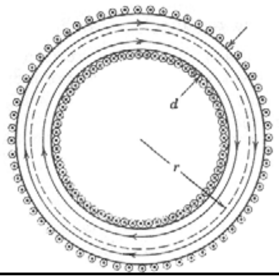
Campo magnético en un toroide

- Un toroide, que puede considerarse como un solenoide de longitud finita en forma de una rosca



Campo magnético en un toroide

- Vamos a calcular B en los puntos interiores, por simetría las líneas de B forman círculos concéntricos dentro del toroide, como vemos en el esquema siguiente



Aplicamos la Ley de Amper a una trayectoria circular de integración de radio r

$$\oint \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 i \qquad i = i_0 N$$

$$B(2\pi r) = \mu_0 i$$

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i_0 N}{r}$$

Fuerzas entre corrientes

- Las corrientes eléctricas en presencia de imanes sufren fuerzas magnéticas, pero también las corrientes eléctricas y no sólo los imanes producen campos magnéticos.
- De modo que dos corrientes eléctricas suficientemente próximas experimentarán entre sí fuerzas magnéticas de una forma parecida a lo que sucede con dos imanes
- La experimentación con conductores dispuestos paralelamente pone de manifiesto que éstos se atraen cuando las corrientes respectivas tienen el mismo sentido y se repelen cuando sus sentidos de circulación son opuestos.

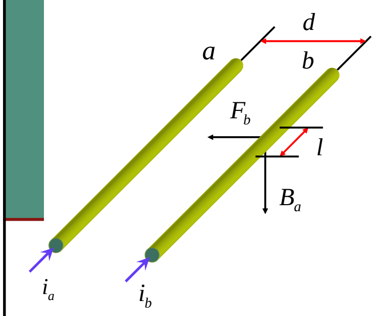
Fuerzas entre corrientes

- La fuerza magnética entre corrientes paralelas es directamente proporcional a la longitud del conductor y al producto de las intensidades de corriente e inversamente proporcional a la distancia que las separa, dependiendo además de las características del medio.
- Sabemos que:

$F_m = i\vec{d}x\vec{B} = idBsen\theta$ → Es la fuerza magnética

$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$ → Es la expresión del campo magnético debido a una corriente rectilínea

Fuerzas entre corrientes



$$B_a = \frac{\mu_0 i_a}{2\pi d}$$

$$F_b = i_b l B_a$$

$$F_b = i_b l B_a = \frac{\mu_0 l i_a i_b}{2\pi d}$$

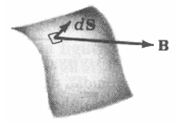
$$F_b = \frac{\mu_0 l i_a i_b}{2\pi d}$$

Definición de ampere internacional

- El hecho de que las fuerzas se puedan medir con facilidad y precisión sugirió la posibilidad de definir el ampere como unidad fundamental recurriendo a experiencias electromagnéticas.
- Definimos el *amper como* *"la intensidad de corriente que circulando por dos conductores rectilíneos de longitud infinita, sección circular y paralelos, separados entre sí un metro en el vacío, producirá una fuerza magnética entre ellos de* $2*10^{-7}\,N$ *por cada metro de longitud de cada uno de los dos hilos".*

$$F = \frac{4\pi 10^{-7}}{2\pi} i^2 d = \frac{4\pi 10^{-7}}{2\pi} 1^2 1 = 2*10^{-7}\,N$$

Flujo magnético y la Ley de Gauss para el campo magnético



$$d\Phi_B = \vec{B}d\vec{S}$$

$$\Phi_B = \int d\Phi_B = \int \vec{B}d\vec{S}$$

El flujo de campo magnético a través de una superficie cerrada será:

$$\Phi_B = \oint \vec{B}d\vec{S}$$

Flujo magnético y la Ley de Gauss para el campo magnético

- Para cualquier superficie cerrada el flujo de campo magnético es cero, pues cada línea de campo magnético que atraviesa hacia dentro la superficie vuelve a atravesarla hacia fuera en otro punto.
- El número neto de líneas que atraviesa la superficie es cero.

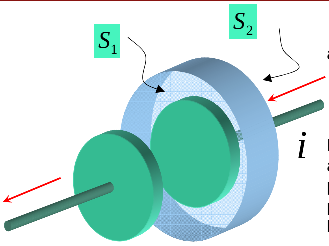
$$\boxed{\oint \vec{B}d\vec{S} = 0}$$

Ley de Gauss para el campo magnético

Corrientes de desplazamiento y la Ley de Amper

- La ley de Amper tal como la hemos planteado hasta ahora ha estado limitada a los campos magnéticos producidos por el tipo de corrientes que pueden existir en un alambre continuo.
- Existen otros tipos de distribuciones de corrientes, que no están contemplados en la forma vista de la Ley de Amper, por lo que es necesario modificarla para darle un carácter más general.
- Esta generalización descubierta por Maxwell, representa un gran avance en el desarrollo del conocimiento profundo del electromagnetismo, incluyendo incluso el conocimiento de la naturaleza de la luz.

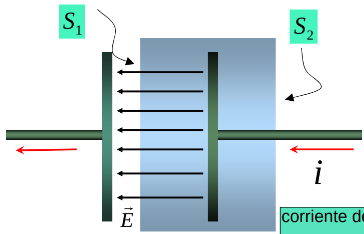
Corrientes de desplazamiento y la Ley de Amper



La superficie S_2 es atravesada por la corriente

Pero la superficie S_1 no es atravesada por la corriente, porque esta superficie pasa por el espacio existente entre las placas del condensador.

Corrientes de desplazamiento y la Ley de Amper



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

$$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 A}$$

$$\Phi_E = \int \vec{E}d\vec{S}$$

$$\Phi_E = EA$$

$$Q = E\varepsilon_0 A = \varepsilon_0 \Phi_E$$

$$i_d = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

corriente de desplazamiento i_d

Ley de Amper $\oint \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum i$

De la Ley de Amper será:

$$\oint \vec{B}d\vec{l} = \mu_0\left(\sum i + i_d\right) \Longrightarrow \boxed{\oint \vec{B}d\vec{l} = \mu_0\left(\sum i + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}\right)}$$

Ley de Amper modificada por Maxwell