

Tema 7: Campo Magnético

Fundamentos Físicos y Electrónicos de la Informática

Introducción

En este tema estudiaremos

- ▶ los fenómenos de origen magnético, que surgen siempre que existan cargas en movimiento
- ▶ las fuerzas que surgen sobre las cargas en movimiento y corrientes en presencia de un campo magnético.
- ▶ las fuentes del campo magnético
- ▶ la ley de Biot-Savart para calcular el campo producido por una corriente.
- ▶ la ley de Ampère para el cálculo de campos magnéticos producidos por distribuciones de corriente con alto grado de simetría
- ▶ el teorema de Gauss del magnetismo

Introducción

Siglo XII a.C en China, primeras observaciones magnetismo

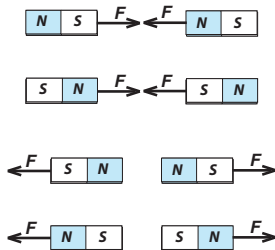
Uso de elementos imantados (algo parecido a una brújula) para facilitar la orientación

Tales de Mileto (625- 546 a. C.)

Atracción que sobre el hierro ejercía la magnetita. Un mineral que se puede ver como un tipo de imán permanente.

Siglo XII, imanes para navegación

Los imanes tiene dos zonas bien diferenciadas, a las que se llamo polos (sur y norte), y que se caracterizaban porque polos iguales se repelían y polos distinto se atraían mutuamente



Introducción

- El nombre de polo norte y sur \Rightarrow al dejar libres cualquier imán, éste tiende a orientarse con un polo apuntando hacia el polo norte terrestre, y el otro hacia el polo sur

Siglo XVII, Willian Gilbert

Observó que la Tierra se comportaba como un imán gigante cuyos polos magnéticos estaban cercanos a los polos geográficos.

- Así el alineamiento de una brújula (aguja imantada) con el norte, se podía explicar como la interacción de dicha aguja con el imán terrestre.

Siglo XVIII, John Michell

la fuerza de atracción y repulsión entre polos magnéticos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia

Introducción

¿ Son los polos en la interacción magnética, lo que las cargas en la electrostática?

¡NO!, los polos magnéticos no existen aislados, siempre ocurren por pares



Siglo XIX, Oersted

una corriente eléctrica cerca de una brújula influía en la orientación de ésta última \Rightarrow una corriente puede producir un efecto similar al de un imán.

Siglo XIX, Ampère

La interacción magnética no es creada por un polo magnético sino por la corriente eléctrica

Campo magnético

- La interacción magnética, al igual que la eléctrica, se puede describir empleando el concepto de campo.
- Al igual que una carga estática produce un campo eléctrico, una carga en movimiento (o en general, una corriente eléctrica) produce un campo magnético en el espacio que la rodea. Esto es, una carga en movimiento no sólo crea un campo eléctrico, sino también crea un campo magnético.

Campo magnético se nota como B (inducción magnética)

Así es importante que distingamos estas dos ideas

- ▶ **Una carga en movimiento (o en general, una corriente eléctrica) en el seno de un campo magnético experimentará una fuerza ejercida por dicho campo.**
- ▶ **Una carga en movimiento (o en general, una corriente eléctrica) produce un campo magnético en el espacio que la rodea.**

Fuerza ejercida por un campo magnético

Una carga q que se mueve con velocidad \mathbf{v} en un campo magnético \mathbf{B} , sufre una fuerza magnética \mathbf{F}_B que se caracteriza porque

- ▶ La magnitud de la fuerza es proporcional a la carga, $F_B \propto q$.
- ▶ La magnitud de la fuerza es proporcional al modulo de la velocidad, $F_B \propto v$.
- ▶ Cuando la dirección de la velocidad es paralela al campo magnético, la fuerza que actúa sobre la carga es nula.
- ▶ La fuerza es perpendicular al plano formado por \mathbf{v} y \mathbf{B} .
- ▶ La fuerza es proporcional a $\sin \theta$, donde θ es el angulo que forman el vector velocidad \mathbf{v} y el vector campo magnético \mathbf{B} .

Fuerza sobre una carga en movimiento dentro de un campo magnético

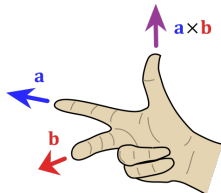
$$\mathbf{F}_B = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Fuerza ejercida por un campo magnético

El modulo de la fuerza magnética

$$F_B = qvB \sin \theta$$

Y la dirección se puede hallar usando la regla del sacacorchos o de la mano derecha



Comentarios

- ▶ La fuerza magnética es siempre perpendicular al campo magnético (*el campo eléctrico es paralelo a la fuerza eléctrica*).
- ▶ Para que la fuerza magnética actúe, la carga debe estar en movimiento (*la fuerza eléctrica actúa sobre una carga sin importar si ésta está en movimiento o no*).
- ▶ La fuerza magnética no realiza trabajo cuando una partícula se desplaza en un campo ya que la fuerza es siempre perpendicular al desplazamiento.

Fuerza ejercida por un campo magnético

La unidad en el SI del campo magnético es el Tesla (T)

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{N/C}}{\text{m/s}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

- Una carga de 1 C que se mueve con una velocidad de 1 m/s en un campo magnético de 1 T, experimentará una fuerza de 1 N
- Unidades alternativas más pequeñas: gauss (G), $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$.

Creado por	B
Cerebro Humano	1 pT
Tierra (en el ecuador)	$31 \mu\text{T}$
Imán del frigorífico	5 mT
Altavoz (dentro de la bobina)	0.5 T
Escáner de resonancia magnética	2 T
Estrella de neutrones	16 MT

Fuerza ejercida por un campo magnético

Ejemplo 1: Determinar la fuerza sobre un protón que se mueve a una velocidad $\mathbf{v} = 4,0 \cdot 10^6 \text{ m/s } \hat{\mathbf{i}}$ en un campo magnético $\mathbf{B} = 2,0 \text{ T } \hat{\mathbf{k}}$

Sol. $-1,28 \cdot 10^{-12} \text{ N } \hat{\mathbf{j}}$.

Fuerza magnética sobre un conductor rectilíneo

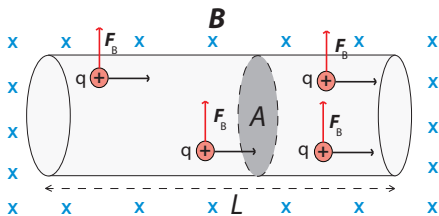
Si un campo magnético ejerce una fuerza sobre una carga que se mueve \Rightarrow cualquier conductor por el que circule una corriente experimentará una fuerza cuando esté dentro de un campo magnético.

- Supongamos un conductor rectilíneo de sección transversal A y longitud L , por el que circula una corriente eléctrica y que está en un campo magnético \mathbf{B}

- La fuerza sobre cada carga es $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$.

- La fuerza sobre el conductor es la suma de las fuerzas individuales sobre cada carga

n = la densidad de cargas móviles $\Rightarrow nAl$ = número total de cargas dentro del volumen del conductor



Fuerza magnética sobre un conductor rectilíneo

La fuerza sobre el segmento de conductor viene dada por

$$\mathbf{F}_B = (q\mathbf{v} \times \mathbf{B})nAL$$

$nqAv$ es la cantidad de carga por unidad de tiempo que atraviesa el alambre (intensidad de corriente) $\Rightarrow I = nqAv$

Fuerza sobre un conductor rectilíneo

$$\mathbf{F}_B = I\mathbf{L} \times \mathbf{B}$$

\mathbf{L} es un vector cuyo modulo es la longitud del alambre y su dirección es la misma que la de la corriente.

Fuerza magnética sobre un conductor rectilíneo

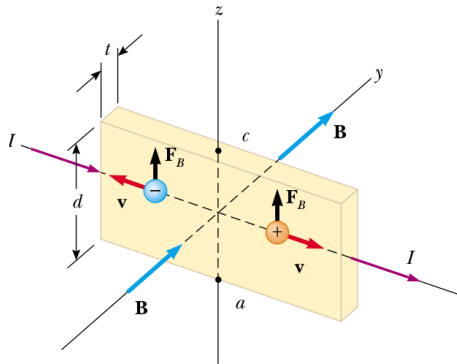
Ejemplo 2: Un segmento de cable de 3 mm de longitud transporta una corriente de 3A en la dirección x . Se encuentra en el interior un campo magnético de magnitud 0.02 T en el eje y . ¿Cuál es la fuerza ejercida por el campo sobre el cable?

Sol. $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ N } \hat{k}$

Efecto Hall

Cuando un conductor que transporta I se introduce en un \mathbf{B} , se genera una diferencia de potencial en una dirección perpendicular tanto a la dirección de la I como al \mathbf{B} .

- Surge de la desviación de portadores de carga a un lado del conductor debido a la fuerza magnética.
- Se usa para medir la magnitud del campo magnético y el signo de los portadores de carga.
- Supongamos un conductor plano por el que circula una I en la dirección x , y un $\mathbf{B} = B\hat{\mathbf{j}}$.
- Si los portadores son e^- sufriran una \mathbf{F} en la dirección z positiva.

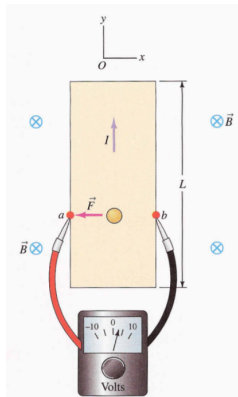


Efecto Hall

- Esto produce una acumulación de carga negativa en el borde superior y positiva en el inferior.
- Esta acumulación aumenta hasta que la fuerza eléctrica equilibra la magnética $\Rightarrow qvB = qE$.
- Si d es el ancho del conductor $\Rightarrow V = Ed \Rightarrow V = \frac{vB}{d}$.

Ejemplo 3: La figura muestra una experiencia del efecto Hall. El conductor tiene una anchura de 1.0 cm, y está en un campo magnético de 2.0 T. Si el voltaje Hall es de $7,2\mu V$ a lo ancho. ¿Cuál es la velocidad de los portadores de carga ?.

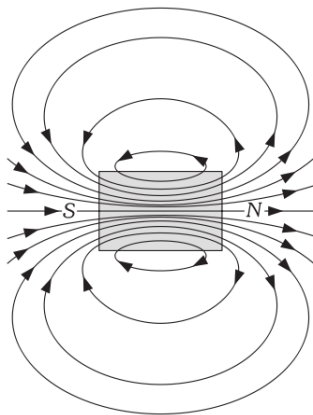
Sol. $3,6 \cdot 10^{-4}$ m/s. (velocidad de deriva)



Líneas de campo magnético

Es posible representar el campo magnético mediante líneas de campo

- Las líneas indican en cada punto la dirección tangente a \mathbf{B} .
- Indican la dirección a la cual apuntaría la aguja de una brújula colocada en dicha posición.
- En cualquier imán, las líneas de campo salen del polo norte y entran por el polo sur.



Notad como las líneas son cerradas; esto se cumple para cualquier campo magnético.

Comentario

- *Hasta ahora hemos estudiado las fuerzas ejercidas sobre cargas en movimiento (o corrientes) en un campo magnético. Hemos supuesto que existía campo magnético que ejercía dicha fuerza, pero no nos hemos interesado por su origen o quien lo creaba.*
- *A continuación, vamos a estudiar las **fuentes de campo magnético**, esto es, los agentes que crean el campo magnético.*

Campo magnético creado por una carga puntual en movimiento

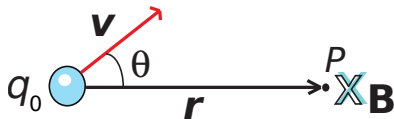
Una carga puntual q_0 que se mueve con velocidad constante \mathbf{v} crea un campo magnético \mathbf{B} en un punto P

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_0 \mathbf{v} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

$\hat{\mathbf{r}} \equiv$ vector unitario de q_0 al punto P

$r \equiv$ distancia entre q_0 y P

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ (permeabilidad del vacío)



Comentarios

- ▶ $\mathbf{B} = 0$ a lo largo de la línea de movimiento de la carga.
- ▶ La dirección de \mathbf{B} es perpendicular a la de los vectores \mathbf{v} y $\hat{\mathbf{r}}$

Campo magnético creado por una carga puntual en movimiento

Ejemplo 4: Una carga puntual de magnitud $q_1=4.5 \text{ nC}$ se mueve con velocidad $3.6 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ paralelamente al eje x a lo largo de la línea $y = 3 \text{ m}$. Determinar el campo magnético producido en el origen por esta carga situada en el punto $x=-4 \text{ m}$, $y=3 \text{ m}$.

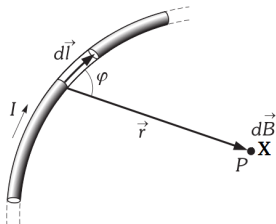
Sol. $-3,89 \cdot 10^{-10} \text{ T } \hat{k}$.

Podemos ahora abordar el campo magnético producido por cualquier corriente, ya que éste se puede ver como una suma vectorial de los campos generados por las cargas individuales.

Ley de Biot-Savart

El campo magnético en un punto P
producido por un elemento
diferencial de corriente $I d\mathbf{l}$

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$



La ley de Biot-Savart describe el campo magnético que crea una corriente eléctrica

La Ley de Biot-Savart

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

donde el dominio de integración es el circuito por que fluye la corriente.

Ley de Biot-Savart

Ejemplo 5: Considere un alambre recto delgado que porta una corriente constante I y está colocada a lo largo del eje x (puede suponer el alambre infinito). Usando la ley de Biot-Savart, determine la magnitud y dirección del campo magnético en un punto P que está en el eje y encima del alambre a una distancia r .

Sol. $B = \frac{\mu_0 I}{2r\pi}$

Ley de Biot-Savart

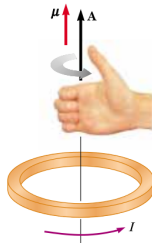
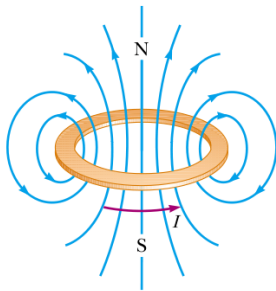
Ejemplo 6: Usando la ley de Biot-Savart calcule el campo magnético debido a una espira circular en su centro. La espira tiene un radio R y es recorrida por una corriente constante I .

Sol. $B = \frac{\mu_0 I}{2R}$

**Momento dipolar magnético
(o momento magnético) de
una espira con corriente**

$$\mu = IA$$

A es el vector área



Ley de Ampère

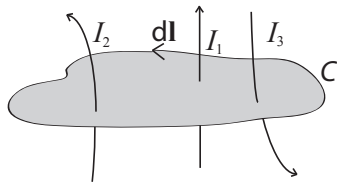
- El cálculo del campo magnético producido por una corriente puede ser bastante complejo.
- Para el cálculo de campos magnéticos de distribuciones de corriente que poseen un alto grado de simetría → **ley de Ampère**.

Ley de Ampère: En un campo magnético, la circulación de \mathbf{B} a lo largo de una curva cerrada C es igual a μ_0 veces la intensidad de corriente que pasa a través de dicha curva

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I$$

Por ejemplo, la circulación de \mathbf{B} en el circuito de la figura sería

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 (I_1 + I_2 - I_3)$$



Ley de Ampère

Ejemplo: Campo magnético producido por un conductor rectilíneo de longitud infinita por el que circula una corriente I a una distancia r

- Tomamos C circunferencia imaginaria de radio r

- Como $\mathbf{B} \parallel d\mathbf{l}$ en C

$$\oint_C \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 I,$$

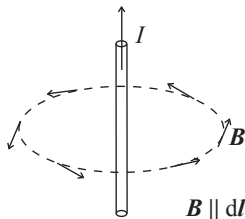
el modulo de \mathbf{B} es constante en C

$$B \oint_C dl = \mu_0 I \Rightarrow B 2\pi r = \mu_0 I$$

el campo magnético generado por el conductor a una distancia r

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r\pi},$$

mismo resultado que con Biot-Savart pero más fácil!



donde se ha usado que $\oint_C dl = 2\pi r$

Ley de Ampère

Ejemplo 7: Un conductor largo y recto de radio R transporta una corriente I uniformemente distribuida en toda su área transversal del conductor. Determinar el campo fuera y dentro del conductor

Sol. Si $r > R$, $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$. Si $r < R$, $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} r$

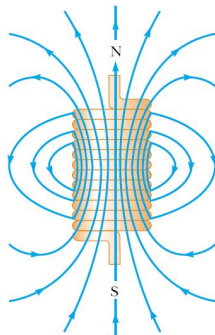
Ley de Ampère

Solenoide: enrollamiento helicoidal de alambre sobre un cilindro, por lo general con sección transversal circular. Superposición de espiras colocadas muy juntas y por las que circula la misma corriente

- En un **solenoide ideal** el campo magnético producido en el interior es completamente uniforme, mientras que en el exterior es nulo.

Ejemplo 8: Ejemplo 7. Usando la ley de Ampère calcule el campo magnético que produce un solenoide ideal con n vueltas por unidad de longitud en su interior ($n = N/L$ siendo N el número de vueltas que hay en una longitud L)

Sol. $B = \mu_0 n I$



Ley de Gauss del Magnetismo

- Al igual que en el campo eléctrico, existe el flujo magnético Φ_B como una magnitud que está relacionada con el número de líneas de campo magnético que atraviesa una superficie, S

$$\Phi_B = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}.$$

La unidad en el SI es el weber (Wb), $1\text{Wb}=\text{Tm}^2$.

Ejemplo 9: Calcular el flujo magnético en el interior de un solenoide de 20 cm de longitud, 500 vueltas y que tiene un radio de 15 mm, sabiendo que por él circula una corriente de 5 A.

Sol. $1.11 \cdot 10^{-5}$ Wb

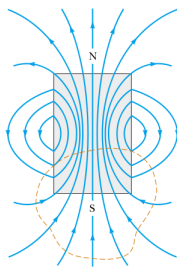
Ley de Gauss del Magnetismo

- Recordad que $\Phi_E = \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q_{int}}{\epsilon_0}$,

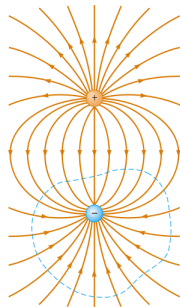
La ley de Gauss del magnetismo: flujo neto del campo magnético en cualquier superficie cerrada es nulo

$$\Phi_B = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

- Las líneas del campo son siempre cerradas, esto es, el número de líneas que entran en cualquier superficie cerrada es igual al número de líneas que salen de la misma.
- No existen cargas magnéticas (monopolos).



a)



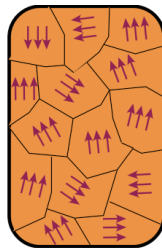
b)

Magnetismo en la materia

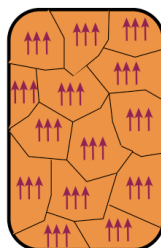
- Ya hemos visto que cualquier espira tiene un momento dipolar magnético $\mu = I\mathbf{A}$.
- Incluso las espiras forman las cargas a nivel atómico (ej. los e^-).
- En general, en una sustancia no magnetizada los μ están orientados al azar y el \mathbf{B} que producen es nulo.
- Dependiendo a lo que ocurre al aplicar un \mathbf{B}_{ext} externo, podemos clasificar los materiales en

Ferromagnetismo

- Los μ tienden a alinearse paralelamente con el \mathbf{B}_{ext} .
- Una vez alineados la sustancia se mantiene magnetizada aún retirando el \mathbf{B}_{ext} .
- Ejemplos hierro, cobalto, níquel ...



Sin campo magnético externo aplicado



Con campo magnético externo aplicado



Magnetismo en la materia

Paramagnetismo

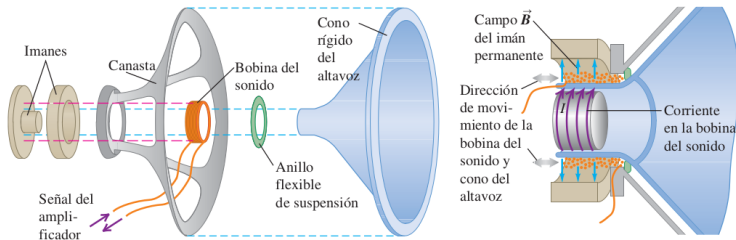
- Tienen un magnetismo pequeño.
- Movimiento térmico tiende a orientar al azar los momentos magnéticos.
- Ejemplos: aire, aluminio.

Diamagnetismo

- Se induce un momento magnético débil en la dirección opuesta al B_{ext} .
- Esto hace que las sustancias diamagnéticas sean repelidas por un imán.
- Ejemplos: azufre, oro, ...

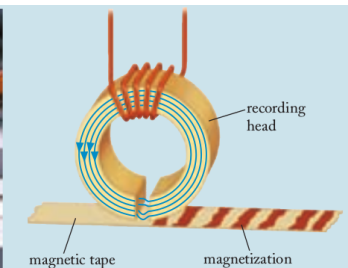
Apéndice: Altavoz

- Una aplicación de las fuerzas magnéticas sobre un alambre que conduzca corriente.
- El campo magnético creado por el imán permanente ejerce una fuerza sobre la bobina, que es proporcional a la corriente que porta.
- El cono de altavoz unido a la bobina del sonido oscila con la misma frecuencia
- Al girar la perilla del volumen el amplificador aumenta la amplitud de la corriente y, con ello, las amplitudes de la oscilación



Apéndice: Almacenamiento magnético

- En una antigua grabadora de cintas de casete, un electroimán produce un **B** proporcional a la señal que le llega del micrófono.
- La cinta está hecha de un medio magnetizable, originalmente desmagnetizado.
- Al pasar la cinta por el electroimán se magnetiza acorde a la señal que esté llegando. Almacenando así la información.

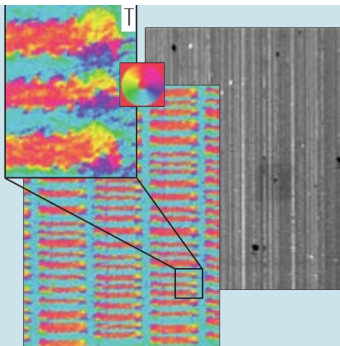


Apéndice: Almacenamiento magnético

- La información también se puede almacenar digitalmente usando la magnetización.
- Cada bit puede ser incluido usando dos direcciones de la magnetización.
- Discos duros hechos de Co-Ni.



Computer hard disk.



Individual bits of a digital hard disk. The magnetic image (color) reveals the bits which are not visible on the corresponding topographic image (gray). The scale bar (top) is $1\text{ }\mu\text{m}$.