

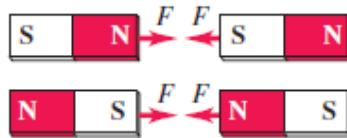
# Magnetismo

Existen minerales magnetizados, imanes permanentes. Ejercen fuerzas atractivas o repulsivas.

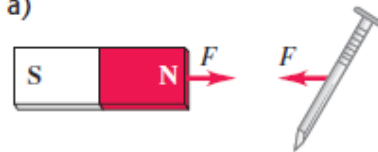
Agujas de la brújula, se orienta en el campo magnético terrestre. El extremo que apunta al norte se llama polo N. El otro se llama S.

Un objeto que contenga hierro pero no magnetizado será atraído por cualquiera de los polos de un imán permanente.

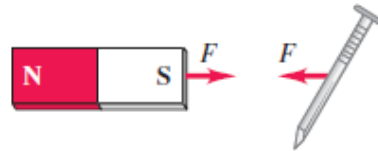
a) Los polos opuestos se atraen



a)

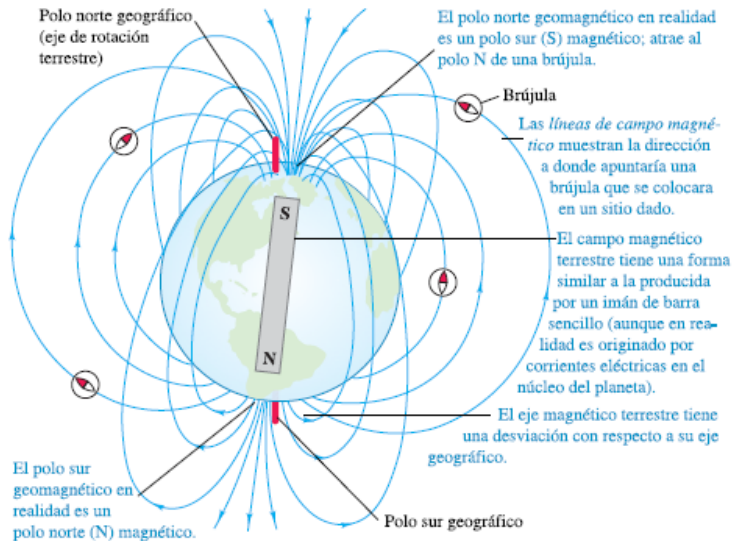


b) Los polos iguales se repelen



# Campo Magnético

**27.3** Esquema del campo magnético terrestre. El campo, que es generado por corrientes en el núcleo fundido del planeta, cambia con el tiempo; hay evidencia geológica que demuestra que invierte por completo su dirección en intervalos de alrededor de medio millón de años.



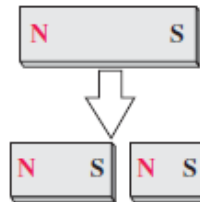
Los polos magnéticos ocurren de a pares, no es posible aislarlos.

#### 27.4 Ruptura de un imán de barra.

Cada trozo tiene un polo norte y un polo sur, aun cuando los trozos sean de distinto tamaño. (Cuanto más pequeños sean, más débil será su magnetismo.)

Al contrario de lo que sucede con las cargas eléctricas, los polos magnéticos siempre ocurren en pares y no es posible aislarlos.

Al romper un imán en dos ...



... se producen dos imanes, no dos polos aislados.

Ahora se sabe que las fuerzas magnéticas se relacionan con cargas EN MOVIMIENTO.

# Fuerzas magnéticas sobre cargas móviles

Observaciones experimentales nos permiten saber que:

- La magnitud de la fuerza magnética sobre una carga móvil es proporcional a la magnitud de la carga.
- La magnitud de la fuerza es proporcional a la magnitud del campo.
- La fuerza magnética depende de la velocidad de la partícula. Una partícula cargada en reposo no experimenta fuerza magnética.
- La fuerza magnética no tiene la misma dirección del campo magnético, sino que siempre es perpendicular tanto al campo magnético como a la velocidad de la partícula. Si  $\vec{B}$  y  $\vec{v}$  son paralelas, la fuerza es cero.

La fuerza sobre una carga  $q$  que se mueve con velocidad  $\vec{v}$  en un campo magnético  $\vec{B}$  es:

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

Las unidades de campo magnético debes ser unidades de  $F/qv$ . Por lo tanto debe coincidir con:

$$1 \frac{Ns}{Cm} = 1 \frac{N}{Am} = 1 T = 1 \text{ tesla}$$

Otra unidad muy usada de campo es el gauss ( $1 G = 10^{-4} T$ ). El campo magnético terrestre es de 1G.

### 27.7 Cálculo de la dirección de la fuerza magnética sobre una partícula cargada en movimiento.

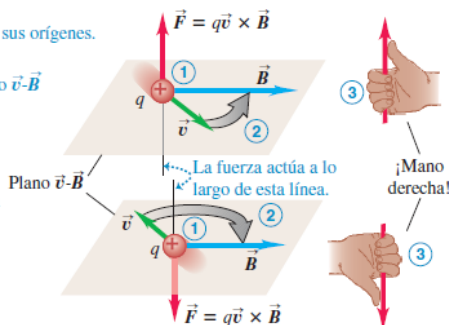
a)

**Regla de la mano derecha** para la dirección de la fuerza magnética sobre una carga positiva que se mueve en un campo magnético:

① Coloque los vectores  $\vec{v}$  y  $\vec{B}$  unidos en sus orígenes.

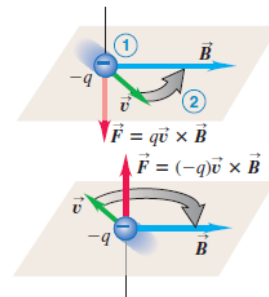
② Imagine que gira  $\vec{v}$  hacia  $\vec{B}$  en el plano  $\vec{v}$ - $\vec{B}$  (en el menor ángulo).

③ La fuerza actúa a lo largo de una línea perpendicular al plano  $\vec{v}$ - $\vec{B}$ . Enrolle los dedos de su mano derecha en torno a esta línea en la misma dirección que giró a  $\vec{v}$ . Ahora, su pulgar apunta en la dirección que actúa la fuerza.



b)

Si la carga es negativa, la dirección de la fuerza es *opuesta* a la que da la regla de la mano derecha.



Cuando una partícula cargada se mueve en una región donde existen campos eléctrico y magnético, la fuerza total experimentada será:

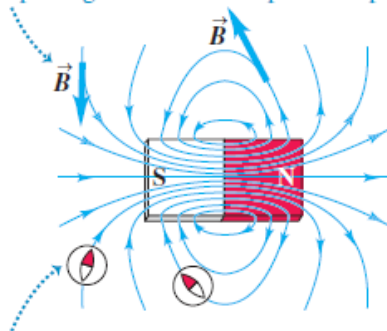
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

# Líneas de campo magnético, no son líneas de fuerza

**27.11** Líneas de campo magnético de un imán permanente. Observe que las líneas de campo pasan por el interior del imán.

En cada punto, la línea de campo es tangente al vector del campo magnético  $\vec{B}$ .

Cuanto más saturadas estén las líneas de campo, más intenso será el campo en ese punto.



En cada punto, las líneas de campo apuntan en la misma dirección en que lo haría una brújula . . .

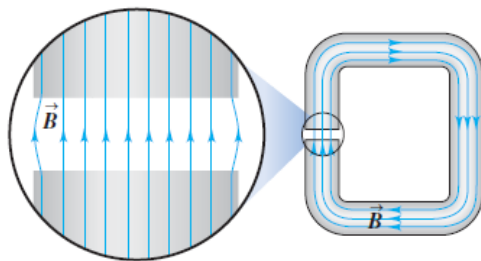
. . . por lo tanto, las líneas de campo magnético *siempre* señalan *hacia fuera* de los polos N y *en dirección* a los polos S.

# Líneas de campos magnéticos generados por distintas fuentes

## 27.13 Líneas de campo magnético producidas por varias fuentes comunes de campo magnético.

a) Campo magnético de un imán en forma de C

Entre polos magnéticos paralelos y planos, el campo magnético es casi uniforme.



b) Campo magnético de un alambre recto que conduce corriente

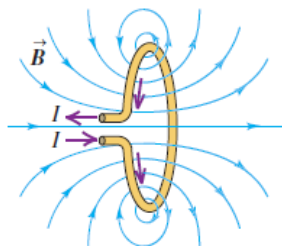
Para representar un campo que sale del plano del papel o llega a éste se usan puntos y cruces, respectivamente.



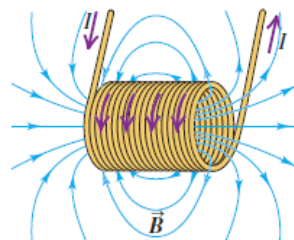
Vista en perspectiva

El alambre está en el plano del papel

c) Campos magnéticos de una espira y una bobina (solenoides) que conducen corriente



Observe que el campo de la espira y, especialmente, de la bobina, se parecen al campo de un imán de barra (véase la figura 27.11).



# Flujo magnético y Ley de Gauss del magnetismo

el flujo magnético a través de una superficie:

$$\Phi_B = \int B_{\perp} dA = \int B \cos \phi dA = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

La unidad para el flujo magnético es el weber:

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2 = 1 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{A}$$

Dado que no existen monopolos magnéticos, resulta que:

El flujo magnético total a través de una superficie cerrada es siempre cero.

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

Las líneas de campo magnético forman espiras cerradas.



# Movimiento de partículas en un campo

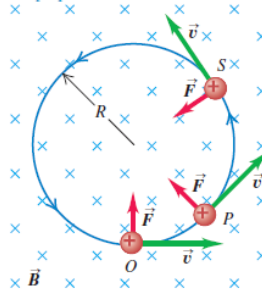
Dado que la fuerza magnética sobre una partícula cargada con velocidad  $\vec{v}$ , siempre es perpendicular a la velocidad, esa fuerza no puede cambiar la magnitud de la velocidad, sólo su dirección.

La fuerza magnética nunca realiza trabajo sobre la partícula, por lo tanto la rapidez de la misma es constante.

**27.17** Una partícula cargada se mueve en un plano perpendicular a un campo magnético uniforme  $\vec{B}$ .

a) Órbita de una partícula cargada en un campo magnético uniforme

Una carga que se mueve con ángulos rectos con respecto a un campo  $\vec{B}$  uniforme se mueve en círculo a rapidez constante, porque  $\vec{F}$  y  $\vec{v}$  siempre son perpendiculares entre sí.



Si la partícula se mueve en un campo uniforme, el movimiento circular resultante:

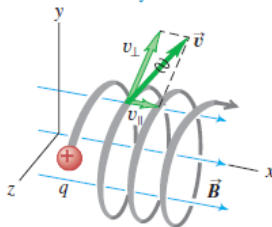
$$F = |q|vB = m\frac{v^2}{R} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{mv}{|q|B}$$

La velocidad angular  $\omega$  con que gira la partícula será:

$$\omega = \frac{v}{R} = v\frac{|q|B}{mv} = \frac{|q|B}{m}$$

**27.18** El caso general de una partícula cargada que se mueve en un campo magnético uniforme  $\vec{B}$ . El campo magnético no hace trabajo sobre la partícula, por lo que su rapidez y la energía cinética permanecen constantes.

El movimiento de esta partícula tiene componentes tanto paralelos ( $v_{\parallel}$ ) como perpendiculares ( $v_{\perp}$ ) al campo magnético, por lo que se mueve en una trayectoria helicoidal.



# Fuerza sobre un conductor con corriente

La fuerza sobre todas las cargas en un segmento de alambre de longitud  $l$  de sección transversal  $A$ :

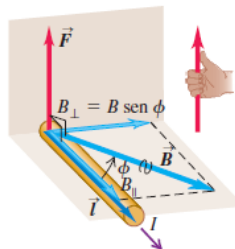
$$F = (nqv_d A)(lB_{\perp}) = IlB \sin \phi$$

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B} \quad d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}$$

**27.26** Segmento recto de alambre con longitud  $\vec{l}$  que lleva una corriente  $I$  en la dirección de  $\vec{l}$ . La fuerza magnética en este segmento es perpendicular tanto a  $\vec{l}$  como al campo magnético  $\vec{B}$ .

Fuerza  $\vec{F}$  sobre un alambre recto que lleva corriente positiva y está orientado a un ángulo  $\phi$  con respecto a un campo magnético  $\vec{B}$ :

- La magnitud es  $F = IlB_{\perp} = IlB \sin \phi$ .
- La dirección de  $\vec{F}$  está dada por la regla de la mano derecha.



# Momento de Fuerza sobre una espira de corriente

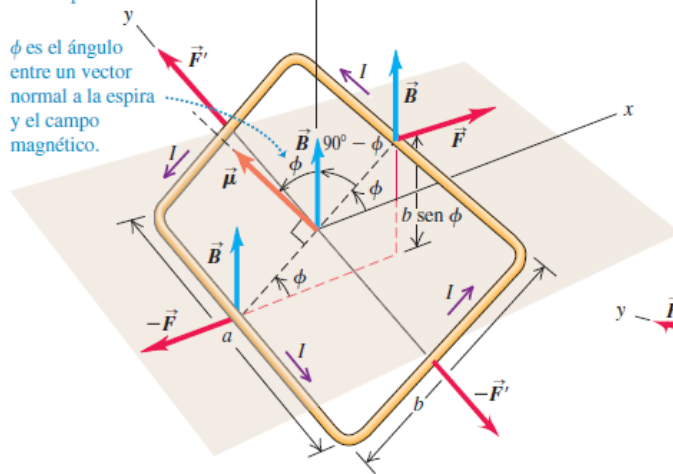
**27.31** Cálculo del par de torsión sobre una espira que conduce corriente en un campo magnético uniforme.

a)

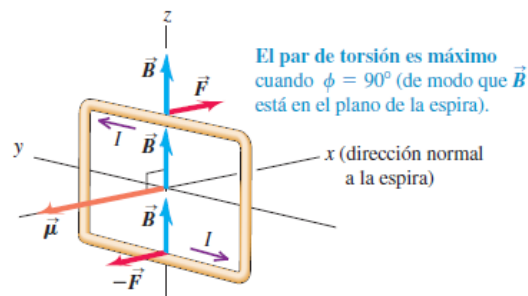
Los dos pares de fuerzas que actúan sobre la espira se cancelan, por lo que no hay fuerza neta que actúe sobre ella.

Sin embargo, las fuerzas en los lados  $a$  de la espira ( $\vec{F}$  y  $-\vec{F}$ ) producen un par de torsión  $\tau = (IBa)(b \sin \phi)$  en la espira.

$\phi$  es el ángulo entre un vector normal a la espira y el campo magnético.

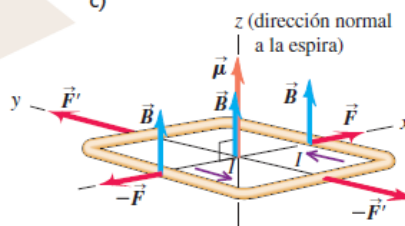


b)



El par de torsión es máximo cuando  $\phi = 90^\circ$  (de modo que  $\vec{B}$  está en el plano de la espira).

c)



El par de torsión es cero cuando  $\phi = 0^\circ$  (como se observa aquí) o  $\phi = 180^\circ$ . En ambos casos,  $\vec{B}$  es perpendicular al plano de la espira.

La espira está en equilibrio estable cuando  $\phi = 0^\circ$ , y está en equilibrio inestable cuando  $\phi = 180^\circ$ .

## Momento de Fuerza sobre una espira de corriente

Espira rectangular de lados  $a$  y  $b$ . La perpendicular al plano de la espira forma un ángulo  $\phi$  con la dirección del campo magnético  $\vec{B}$ , orientado en el eje  $z$ .

Las fuerzas sobre los lados de longitud  $a$ , donde la corriente es perpendicular al campo magnético, son en la dirección  $\pm x$  y de magnitud  $F = IaB$ .

Los lados de longitud  $b$  forman un ángulo  $90^\circ - \phi$  con  $\vec{B}$  por lo que las fuerzas sobre ellos apuntan en dirección  $\pm y$  con intensidad  $F' = IbB \sin(90^\circ - \phi) = IbB \cos \phi$ .

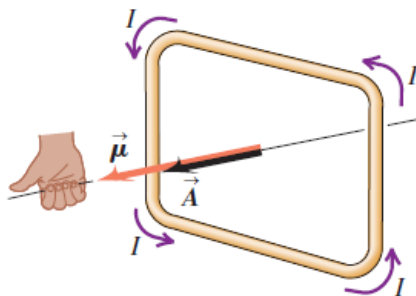
La fuerza total sobre la espira es cero. Sin embargo el torque en general no es igual a cero.

Las dos fuerzas  $\pm F'$  están sobre la misma línea de acción, por lo que originan un par de torción neto igual a cero.

Las dos fuerzas  $\pm F$  están en distintas líneas de acción y originan un par de torción neto respecto al eje  $y$ . El momento total es  $\tau = 2 (b/2) \sin \phi F = IBa b \sin \phi = IA B \sin \phi = \mu B \sin \phi$ .

Definimos el momento magnético de la espira como  $\vec{\mu} = I\vec{A}$ .

**27.32** La regla de la mano derecha determina la dirección del momento magnético de una espira que transporta corriente. Ésta es también la dirección del vector de área  $\vec{A}$  de la espira;  $\vec{\mu} = I\vec{A}$  es una ecuación vectorial.



El momento de torsión sobre la espira se puede expresar vectorialmente como

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

La posición de equilibrio estable es cuando  $\vec{\mu}$  y  $\vec{B}$  son paralelos.