

Propiedades magnéticas de los materiales

El dipolo magnético

- En los campos magnéticos estacionarios, la parte fundamental son la cargas eléctricas que se mueven en un elemento de corriente; éstas no sólo crean un campo magnético, sino también pueden verse afectadas por el campo magnético proveniente de otros elementos.
- Cuando se intenta explicar las propiedades magnéticas de los materiales, se logra una explicación satisfactoria en base al ***dipolo magnético***.
- Propiedades magnéticas de los materiales, se logra un conocimiento mejor de ellas al tener en cuenta que son una ***colección de átomos con momentos individuales dipolares magnéticos***.

El dipolo magnético

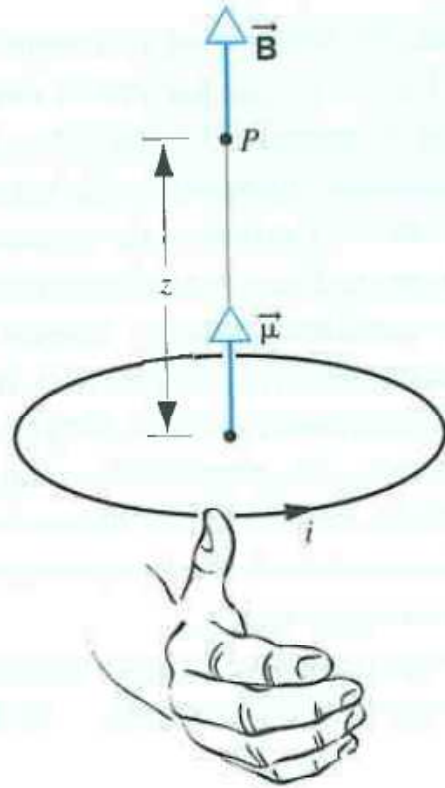


FIGURA 35-1. Momento dipolar magnético de una espira de corriente y el campo magnético en el punto P a una distancia z de la espira en su eje.

$$B = \frac{\mu_0 i R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}$$

$$B = \frac{\mu_0 i R^2}{2z^3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i\pi R^2}{z^3}$$

$$\mu = iA. \quad \mu = NiA.$$

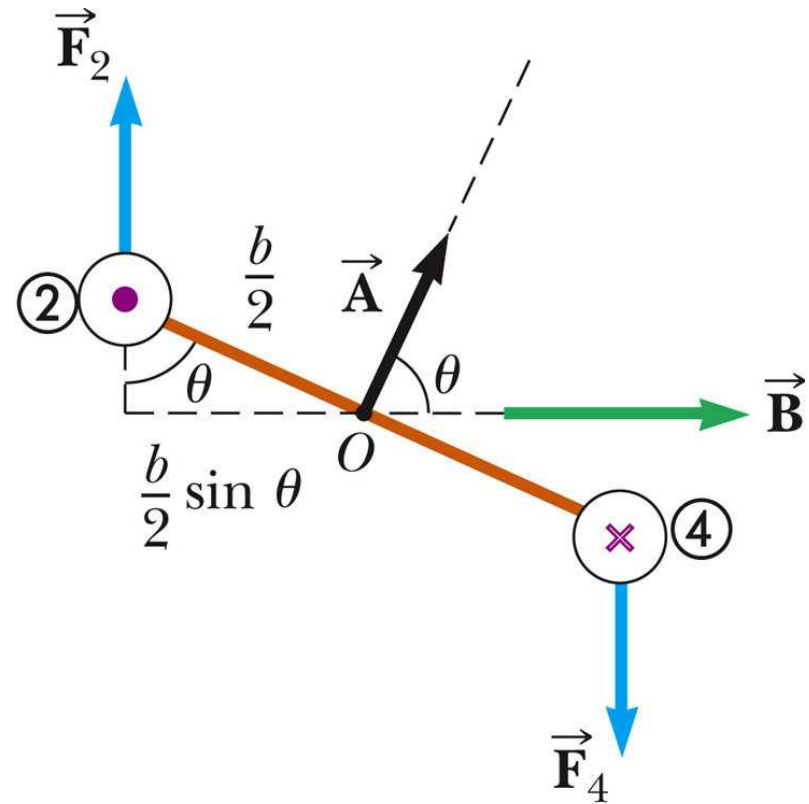
Momento dipolar magnético

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \vec{\mu}}{2\pi z^3}$$

El dipolo magnético

- Assume the magnetic field makes an angle of $\theta < 90^\circ$ with a line perpendicular to the plane of the loop (the direction of a loop, next slide)
- The net torque about point O will be $\tau = IAB \sin \theta$
- When the direction of the loop area is defined, the torque can be expressed in its vector format:

$$\vec{\tau} = I \vec{A} \times \vec{B}$$



© Thomson Higher Education

El dipolo magnético

$$\tau = NIAB \sin \theta$$

$$\mathbf{m} = NIA \hat{n}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{m} \times \mathbf{B}$$

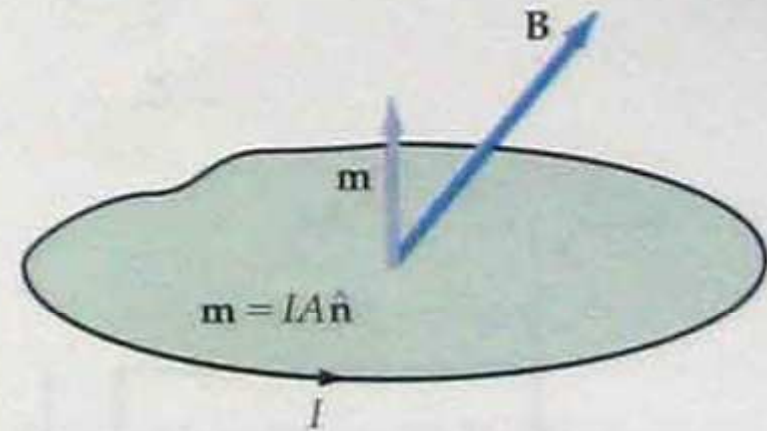


Figura 24-21 El momento magnético de una espira de corriente de forma arbitraria es $\mathbf{m} = IA\hat{n}$. En un campo magnético \mathbf{B} , la espira experimenta la acción de un momento $\mathbf{m} \times \mathbf{B}$.

El dipolo magnético

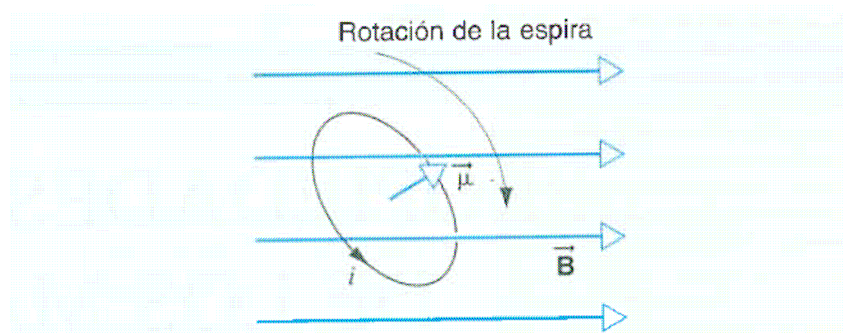


FIGURA 35-2. En un campo magnético externo, un momento dipolar magnético experimenta un par que gira $\vec{\mu}$ hasta alinearlo con \vec{B} .

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

Podemos continuar la analogía entre los campos eléctrico y magnético considerando el trabajo hecho para cambiar la orientación del dipolo magnético en un campo magnético y relacionando el trabajo con la energía potencial de un dipolo magnético en un campo magnético. La energía potencial puede escribirse así

$$U = -\mu B \cos \theta = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}, \quad (35-6)$$

El dipolo magnético

TABLA 35-1 Algunos valores de momentos dipolares magnéticos

<i>Sistema</i>	μ (J/T)
Núcleo de átomo de nitrógeno	2.04×10^{-28}
Protón	1.41×10^{-26}
Neutrón	9.65×10^{-27}
Electrón	9.28×10^{-24}
Átomo de nitrógeno	2.8×10^{-23}
Bobina típica ^a pequeña	5.4×10^{-6}
Imán de barra pequeño	5
Bobina superconductora	400
La Tierra	8.0×10^{22}

^a Por ejemplo, la del problema resuelto 35-1.

El campo de un dipolo

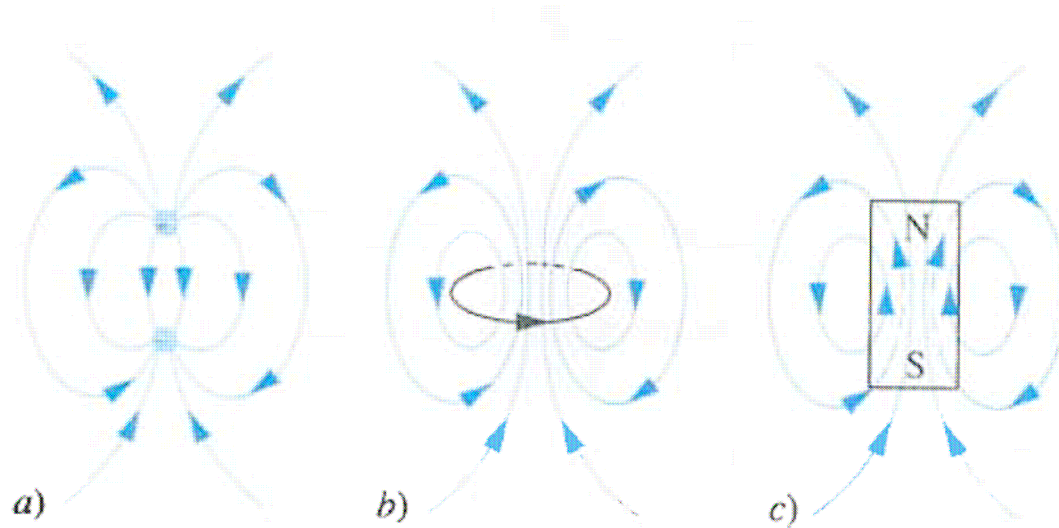


FIGURA 35-3. *a)* Campo eléctrico de un dipolo eléctrico. *b)* Campo de dipolo magnético de un imán de barra. *c)* Campo de dipolo magnético de un imán de barra. Las líneas punteadas representan las líneas de campo en el interior del imán.

El campo de un dipolo

- Semejanzas entre dipolo eléctrico y dipolo magnético, varían con r^{-3} .
- Diferencia importante, las líneas del campo magnético siempre forman espiras cerradas.
- Las líneas del campo de un imán de barra ofrece el mismo patrón de líneas de campo que el de la espira con corriente; así que el imán de barra también puede considerarse un dipolo magnético.

Magnetismo atómico

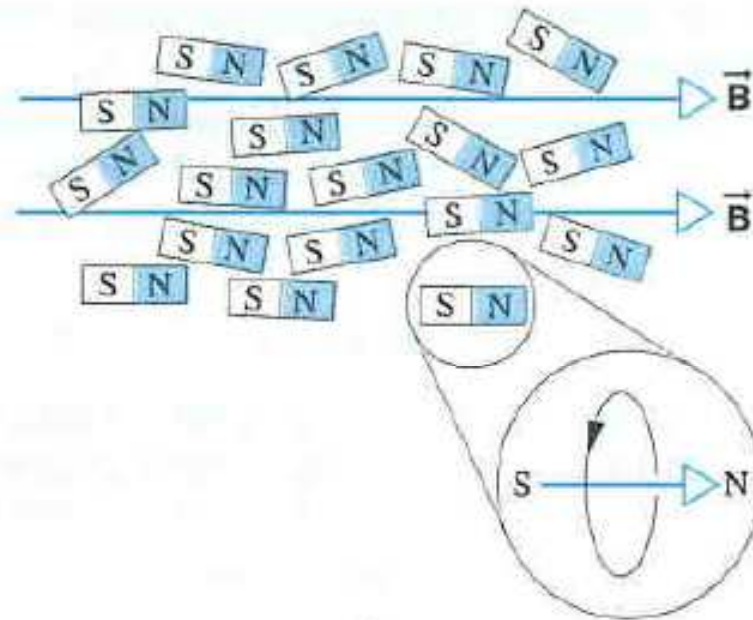
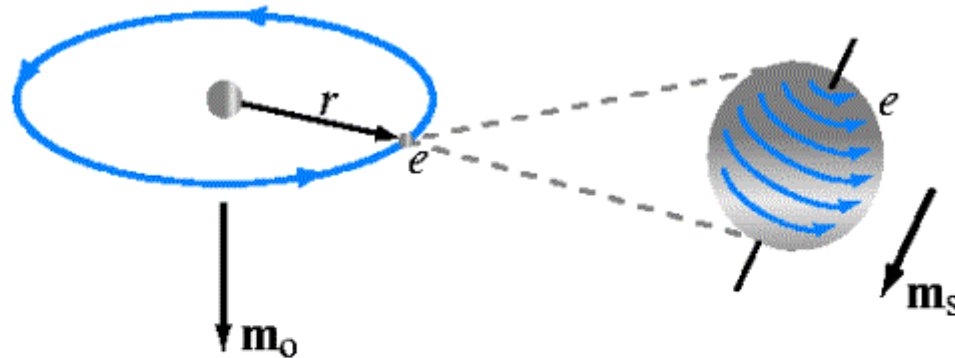


FIGURA 35-6. El material magnético puede considerarse como una serie de momentos dipolares magnéticos, cada uno con un polo norte y uno sur. Desde el punto de vista microscópico, los dipolos son en realidad una espira de corriente que no puede dividirse en polos individuales.

Magnetismo atómico

Las principales contribuciones a este momento magnético son:

- El momento magnético orbital (órbita de los electrones)
- El momento magnético de spin (el electrón gira sobre si mismo)



(a) Orbiting electron

(b) Spinning electron

Magnetización

$$\vec{M} = \frac{\vec{\mu}}{V} = \frac{\sum \vec{\mu}_n}{V}$$

Magnetización M

- Consideremos ahora un medio magnético compuesto de átomos con los momentos dipolares magnéticos μ_n .
- En general estos dipolos apuntan en varias direcciones del espacio.
- Calculemos el momento dipolar neto μ en un volumen V del material.
- Si queremos considerar la magnetización una magnitud microscópica la ec. debe escribirse como el límite a medida que $V \rightarrow 0$.

Magnetización

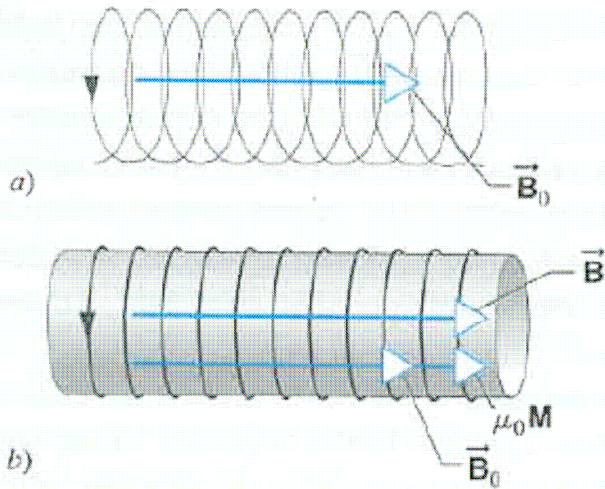


FIGURA 35-8. a) En un solenoide vacío, la corriente genera un campo \vec{B}_0 . b) Cuando el solenoide se llena con material magnético, el campo total \vec{B} incluye las contribuciones \vec{B}_0 procedentes de la corriente y $\mu_0 \vec{M}$ provenientes del material magnético.

- El campo \vec{B}_M puede estar formado por las aportaciones de los dipolos permanentes en los materiales paramagnéticos y de los dipolos inducidos en todos los materiales.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M$$

Magnetización

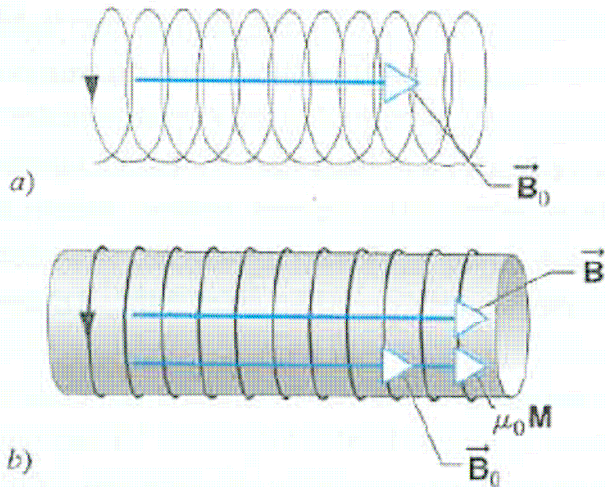


FIGURA 35-8. a) En un solenoide vacío, la corriente genera un campo \vec{B}_0 . b) Cuando el solenoide se llena con material magnético, el campo total \vec{B} incluye las contribuciones \vec{B}_0 procedentes de la corriente y $\mu_0 \vec{M}$ provenientes del material magnético.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M$$

$$\vec{B}_M = \mu_0 \vec{M}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

En los campos débiles:

$$\vec{M} = cte. \vec{B}_0$$

$$\vec{B} = \kappa_m \vec{B}_0$$

Donde κ_m es la permeabilidad del material, que se define en relación con el vacío, para el cual $\kappa_m=1$.

Magnetización

- La permeabilidad de la mayor parte de los materiales comunes (excepto los ferromagnéticos) tiene valores cercanos a 1.
- Con respecto a otros materiales que no son ferromagnéticos, la permeabilidad puede depender de propiedades como la temperatura y la densidad del material, pero no del campo \mathbf{B}_0 .
- Para los ferromagnéticos κ_m depende del campo aplicado \mathbf{B}_0 .

$$\vec{\mathbf{B}} = \kappa_m \vec{\mathbf{B}}_0$$

Magnetización

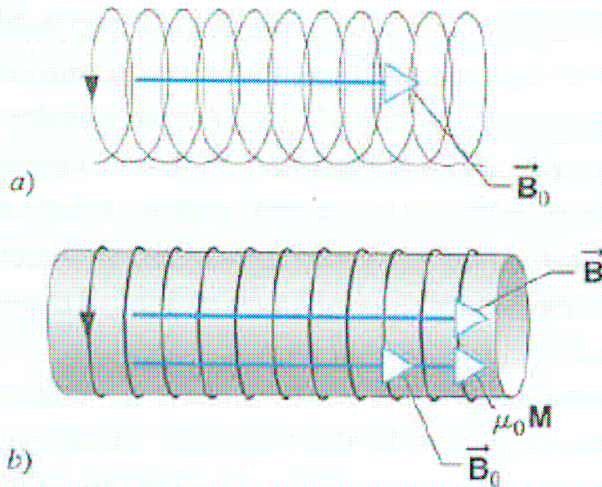


FIGURA 35-8. a) En un solenoide vacío, la corriente genera un campo \vec{B}_0 . b) Cuando el solenoide se llena con material magnético, el campo total \vec{B} incluye las contribuciones \vec{B}_0 procedentes de la corriente y $\mu_0 \vec{M}$ provenientes del material magnético.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M$$

$$\vec{B}_M = \mu_0 \vec{M}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

En los materiales *para* y *ferro*, \vec{M} posee la misma dirección y sentido que \vec{B}_0 .

En los materiales *dia*, \vec{M} se opone a \vec{B}_0 .

En los materiales *para* y *dia*:

$$\vec{M} = cte. \vec{B}_0$$

$$\vec{M} = \chi_m \left(\frac{\vec{B}_0}{\mu_0} \right) \quad \text{Susceptibilidad magnética} \quad \vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M} = \vec{B}_0 (1 + \chi_m)$$

Magnetismo en la materia

Tabla de susceptibilidades magnéticas χ_m a T ambiente y a 1 atmósfera			
Paramagnéticos (+)		Diamagnéticos (-)	
Oxígeno	1.94×10^{-6}	Hidrógeno	-2.08×10^{-9}
Sodio	8.4×10^{-6}	Nitrógeno	-6.7×10^{-9}
Magnesio	1.2×10^{-5}	CO ₂	-1.19×10^{-8}
Aluminio	2.1×10^{-5}	Alcohol	-0.75×10^{-5}
Tungsteno	7.6×10^{-5}	Agua	-0.91×10^{-5}
Titanio	1.8×10^{-4}	Cobre	-0.98×10^{-5}
Platino	2.93×10^{-4}	Plata	-2.64×10^{-5}
		Oro	-3.5×10^{-5}

Campo Magnético

Magnetismo en la materia

- ❖ *Los átomos tienen momentos dipolares magnéticos debido al movimiento de sus electrones y al momento dipolar magnético intrínseco asociado al espín de los electrones*
- ❖ *En un material magnéticamente polarizado, los dipolos crean un campo magnético paralelo a los vectores del momento dipolar magnético*

Clasificación de materiales atendiendo a comportamiento de sus momentos magnéticos en un campo externo

- ❖ Paramagnéticos
- ❖ Diamagnéticos
- ❖ Ferromagnéticos

❖ **Paramagnetismo:** surge de la alineación parcial de momentos magnéticos atómicos o moleculares en presencia de un campo magnético externo. Los momentos dipolares no interaccionan fuertemente entre sí.

❖ **Ferromagnetismo:** los momentos dipolares interactúan fuertemente entre sí. Se puede conseguir una gran alineación de dipolos magnéticos incluso con campos externos débiles.

❖ **Diamagnetismo:** surge de los momentos dipolares magnéticos orbitales inducidos por un campo magnético externo. Los momentos inducidos son opuestos al campo externo y debilitan el campo total. Este efecto ocurre en todos los materiales pero como los momentos inducidos son pequeños respecto a los momentos magnéticos permanentes, el diamagnetismo está enmascarado por los efectos paramagnéticos o ferromagnéticos.

Ley de Gauss aplicada al magnetismo

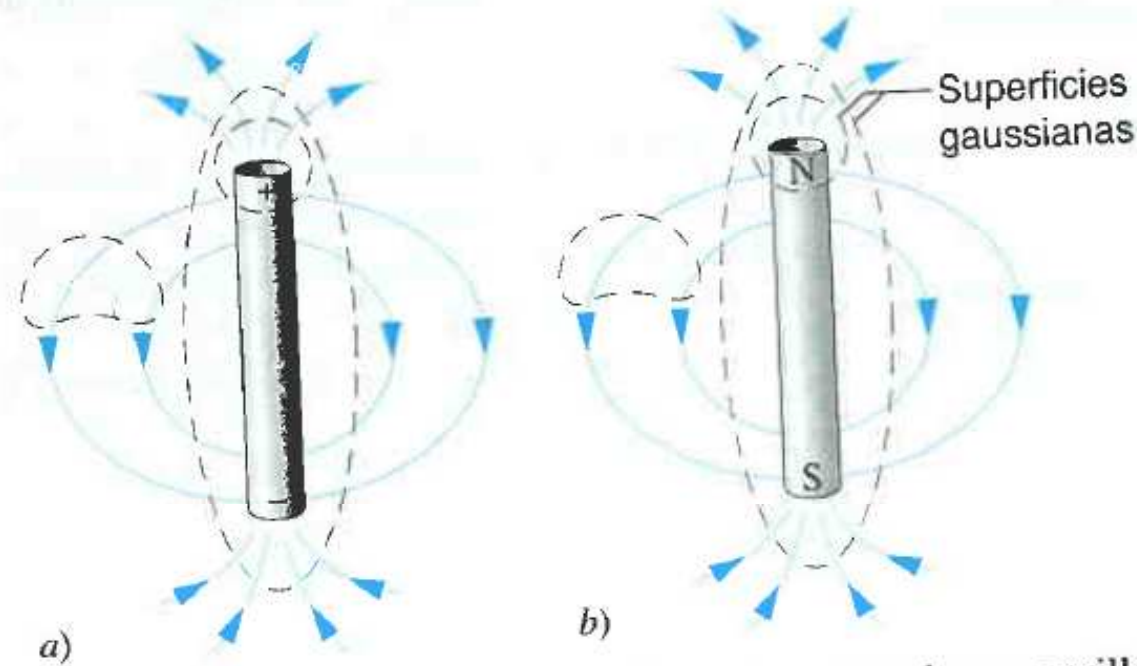


FIGURA 35-18. *a)* Dipolo eléctrico, que consta de una varilla aislante con una carga positiva en un extremo y con una carga negativa en el otro. Se muestran varias superficies gaussianas.
b) Dipolo magnético, constituido por un imán de barra con un polo norte en un extremo y con un polo sur en el otro.

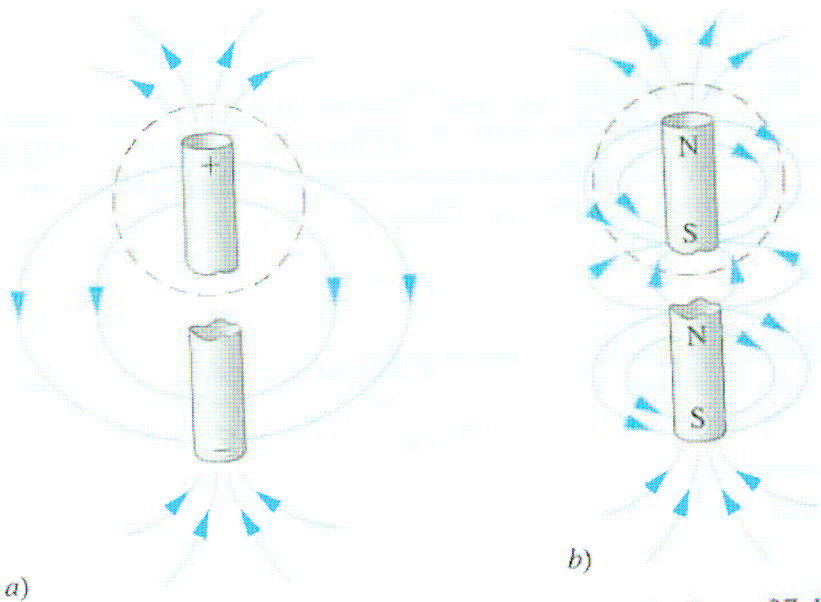


FIGURA 35-19. *a)* Cuando el dipolo eléctrico de la figura 37-18*a* se corta a la mitad, se aísla la carga positiva en un trozo y la carga negativa en el otro. *b)* Cuando el dipolo magnético de la figura 35-18*b* se corta a la mitad, aparece un nuevo par. Obsérvese la diferencia en los patrones del campo.

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

El flujo neto del campo magnético que pasa a través de cualquier superficie cerrada es cero.