

Curso “Electromagnetismo”

Tema 5

Campos magnéticos estáticos

José Emilio Prieto
Dpto. Física de la Materia Condensada
Universidad Autónoma de Madrid

joseemilio.prieto@uam.es

Introducción: Magnetismo

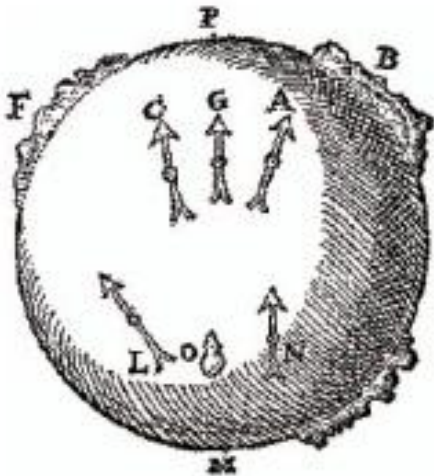
J.E. Prieto

Fuente principal de figuras:

“Physics for scientists and engineers” (5th edition),
P.A. Tipler, G. Mosca

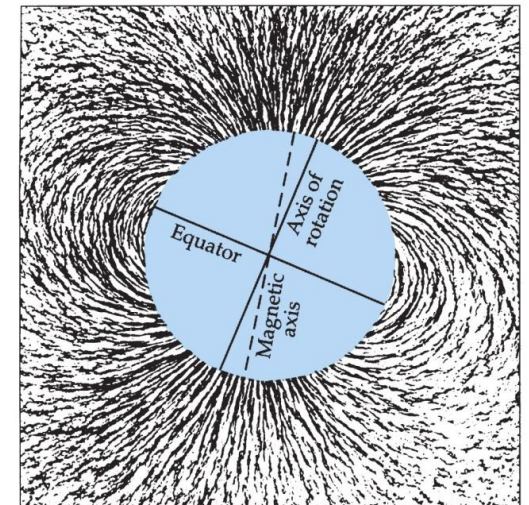
Fenómenos magnéticos

- Fenómenos magnéticos conocidos desde la antigüedad (sin relación conocida durante siglos con la electricidad):
 - *Magnetita*: mineral “magnético” que atrae al hierro.
 - Con materiales “magnéticos” se pueden construir **imanes**:
 - La magnetita es un óxido de hierro (Fe_3O_4); Los elementos “magnéticos” son Fe, Co, Ni y algunas tierras raras.
- Primera aplicación histórica: la *brújula*: aguja imanada que señala siempre al Norte



William Gilbert, *De Magnete* (1600)

- ¿ Por qué?
 - Porque la Tierra es un **gran imán**:



Fenómenos magnéticos



(a)



(b)



(c)



(d)

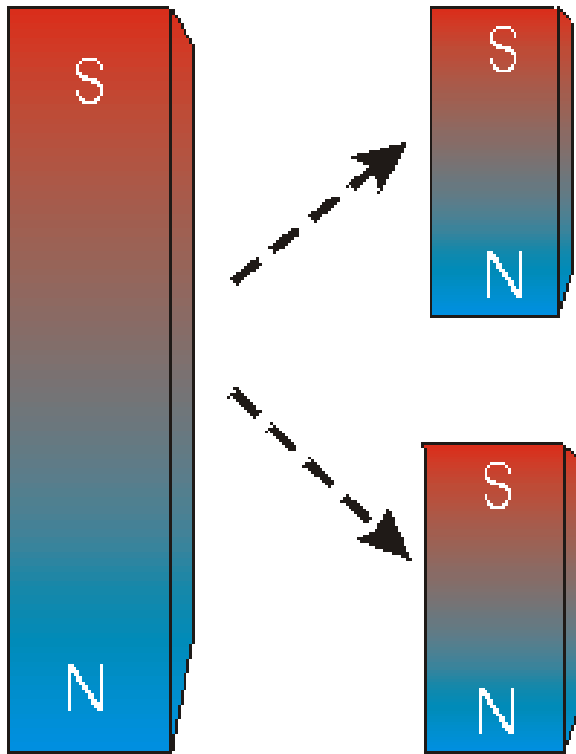
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

- Imanes: tienen *dos “polos”* distintos:

- Polo “**Norte**” y polo “**Sur**”
- Llamados así porque, suspendidos como brújulas, apuntan en la dirección N-S
- Polos *iguales* se *repelen*
- Polos *distintos* se *atraen*

Analogía con la *interacción electrostática* entre *cargas eléctricas*

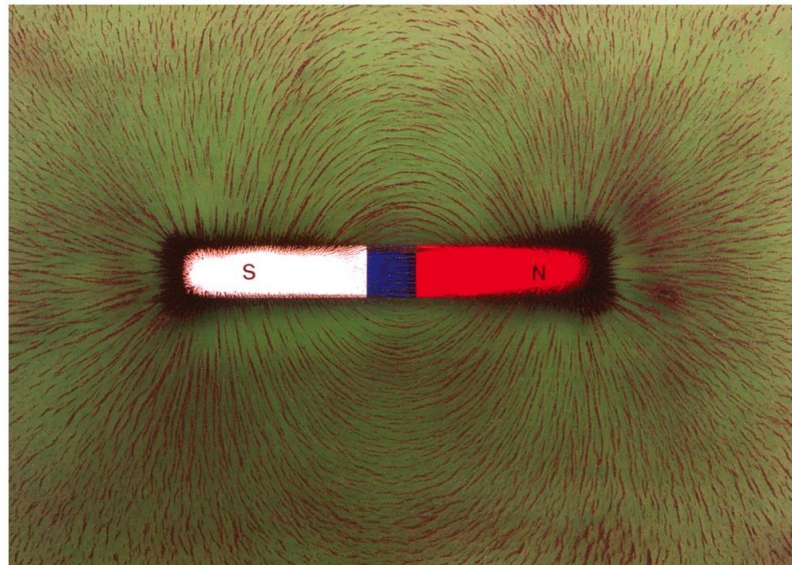
Fenómenos magnéticos



- *Diferencia importante* con el caso de las cargas eléctricas: si se divide un imán, aparecen nuevos polos:
- Todos los imanes conocidos tienen (al menos) un polo “Norte” y un polo “Sur”: *dipolos magnéticos*
- **No se conocen monopolos magnéticos**: hipotéticos polos magnéticos aislados, “cargas magnéticas” análogas a las cargas eléctricas.
- La “unidad del magnetismo” es el *dipolo magnético*, incluso a la escala *atómica* o *subatómica*.

Campo magnético B

- Concepto de ***campo magnético B*** : análogo al de campo eléctrico:
 - ***Campo magnético***: describe un “estado del espacio” en el que se ejerce un ***momento de giro*** sobre un ***dipolo magnético*** dispuesto ***de forma que pueda girar libremente***.
 - Se pueden visualizar ***las líneas del campo B*** mediante limaduras de Fe (por ejemplo): pequeños imanes (***dipolos***) que ***se orientan en la dirección del campo*** (lo veremos):

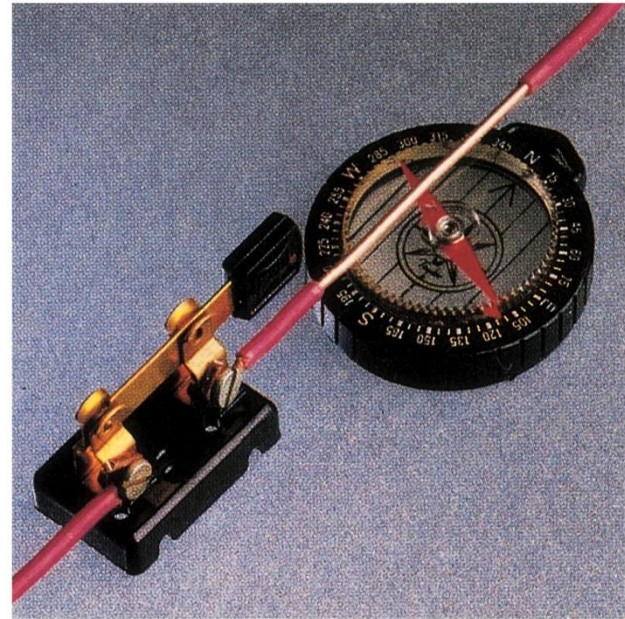
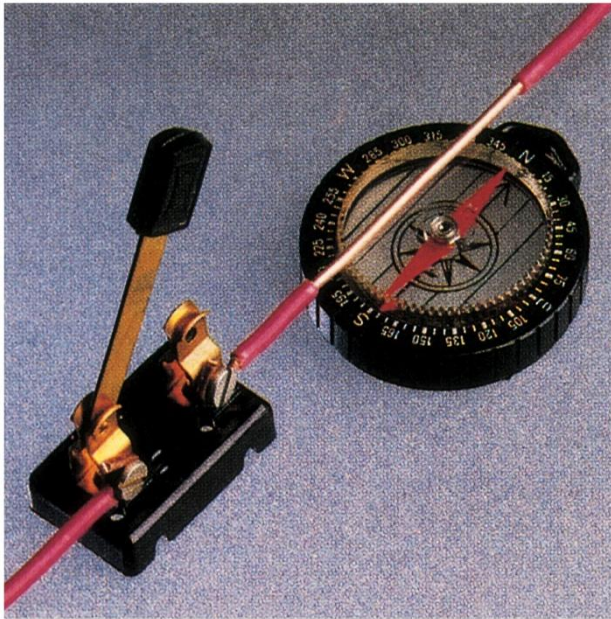


Relación magnetismo \leftrightarrow electricidad

- Hasta 1820, el magnetismo y la electricidad parecían fenómenos no relacionados entre sí.
- A lo largo del siglo XIX se realizaron los experimentos que muestran que:
 1. Una *corriente eléctrica* ejerce *fuerzas* y *pares de giro* sobre un *dipolo magnético* (una brújula): **Las cargas eléctricas en movimiento** (corrientes) **son fuentes de campo magnético**.
 2. Un *campo magnético* ejerce *fuerzas* sobre una *corriente eléctrica* (sobre cargas eléctricas en movimiento)

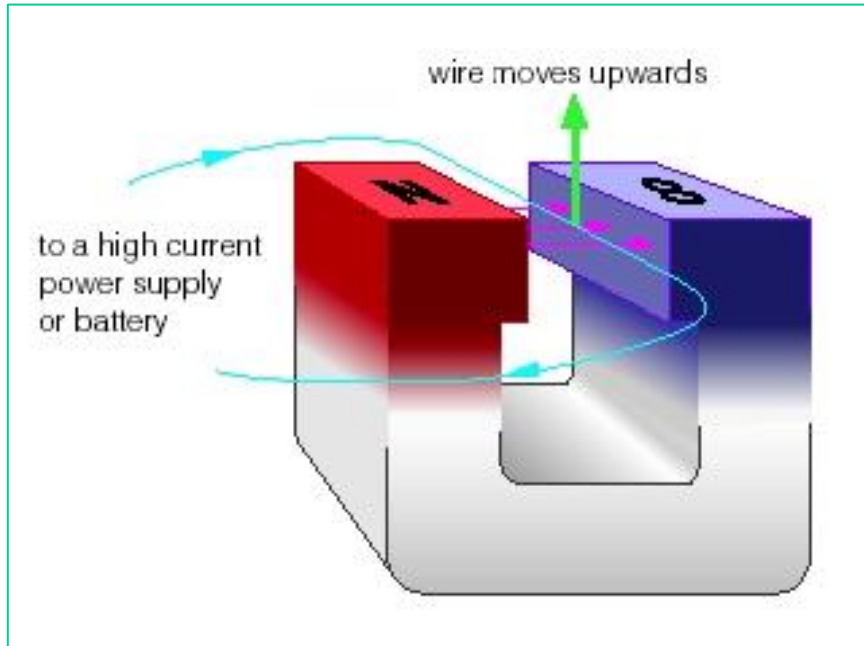
1) Corriente / ejerce fuerzas y pares de giro sobre imanes (dipolos magnéticos)

- Oersted (1820) demostró que una corriente eléctrica ejerce fuerzas y pares de giro sobre una brújula (un dipolo magnético):



→ Las corrientes eléctricas son *fuentes* de **B**

2) Campo \mathbf{B} ejerce fuerzas sobre corriente



- Observación experimental:
- Sobre una *corriente* I que circula en una *dirección* \mathbf{u}_L , *perpendicular a un campo magnético* \mathbf{B} se ejerce una *fuerza* \mathbf{F} que es
 - *perpendicular* a \mathbf{B}
 - *perpendicular* a \mathbf{u}_L
 - *proporcional* a L , B e I :

$$\mathbf{F} \perp \mathbf{B}$$

$$\mathbf{F} \perp (I \mathbf{u}_L)$$

$$F \sim L B I$$

$$\rightarrow \mathbf{F} = (I \mathbf{u}_L) \times \mathbf{B} L$$

$$\frac{\mathbf{F}}{L} = (I \mathbf{u}_L) \times \mathbf{B}$$

Fuerza por unidad de longitud

Fuerza magnética sobre una carga q

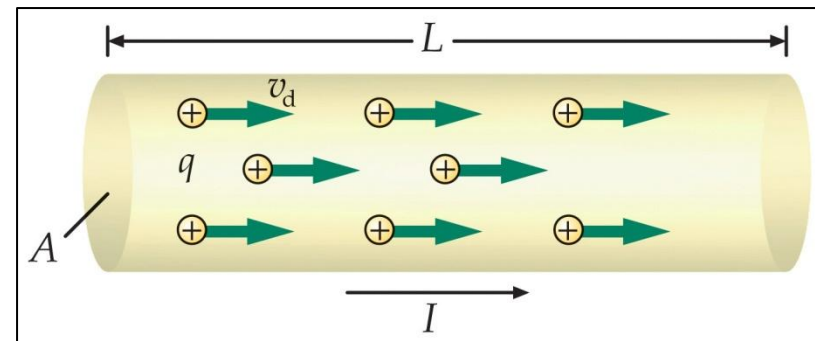
$$\mathbf{j} = n q \mathbf{v}$$

$$I = j A = n q A v$$

$$\mathbf{F} = L (I \mathbf{u}_L) \times \mathbf{B}$$

$$\mathbf{F} = L (n q A \mathbf{v}) \times \mathbf{B}$$

$$\mathbf{F} = n (AL) q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$



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

- $AL = Vol$, volumen del conductor
- N : número total de portadores
- $n = N / Vol$, densidad volúmica de portadores (#port./Vol)

→ **Fuerza magnética
sobre una carga q**

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

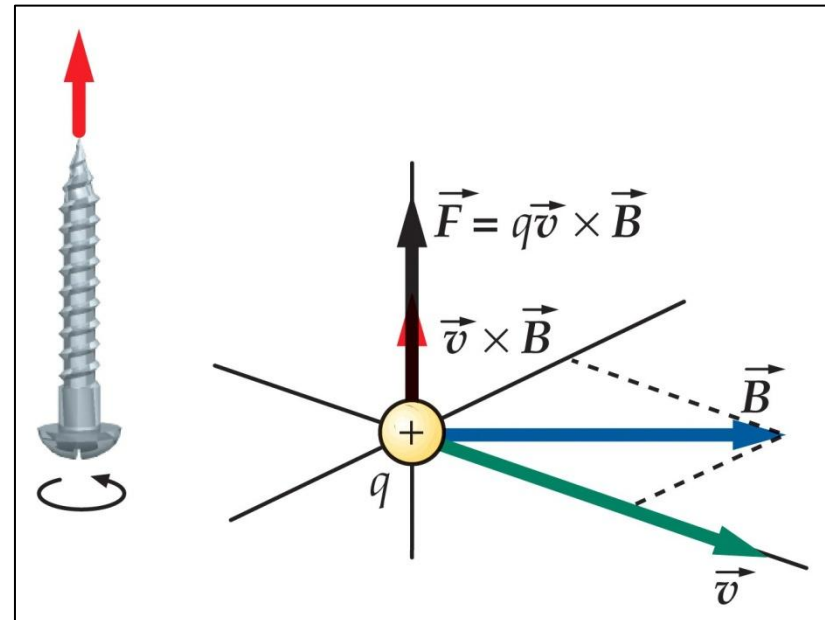
Fuerza de Lorentz

Fuerza *magnética* sobre una partícula de carga q

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

• Sobre una *carga* q que se mueve con *velocidad* \mathbf{v} en un *campo magnético* \mathbf{B} se ejerce una *fuerza* \mathbf{F} que es

- *proporcional* a q , v y B
- *perpendicular* a \mathbf{v}
- *perpendicular* a \mathbf{B}
- *sentido*: de *avance* de un *tornillo de rosca derecha* al llevar \mathbf{v} hacia \mathbf{B}



Fuerza de Lorentz

Fuerza *magnética* sobre una partícula de carga q

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

Fuerza *eléctrica* sobre una partícula de carga q

$$\mathbf{F}_{el} = q \mathbf{E}$$

Fuerza total *electromagnética* sobre una partícula de carga q en campos \mathbf{E} y \mathbf{B} :

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

Fuerza de Lorentz

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

- \mathbf{F}_m es *perpendicular* a \mathbf{v} y por lo tanto, al desplazamiento $\mathbf{v} dt$:

→ \mathbf{F}_m *no realiza trabajo W sobre q*

$$dW = \mathbf{F}_m d\mathbf{r} = \mathbf{F}_m \cdot \mathbf{v} dt = 0$$

→ La fuerza \mathbf{F}_m que ejerce un campo magnético \mathbf{B} *no cambia $|\mathbf{v}|$ sino sólo la dirección de \mathbf{v}* :

→ en un campo magnético \mathbf{B} *homogéneo*, las partículas cargadas siguen *trayectorias circulares en el plano perpendicular a \mathbf{B}* (lo veremos a continuación).

Unidades de ***B***

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

- La unidad de ***B*** en el SI es el **Tesla** (T):

$$\begin{aligned} [B] &= T = N / (C \text{ m/s}) = (N \text{ s}) / (C \text{ m}) \\ &= N / (A \text{ m}) = V \text{ s} / \text{m}^2 \end{aligned}$$

- También se usa (sistema cgs) el **Gauss**: $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$

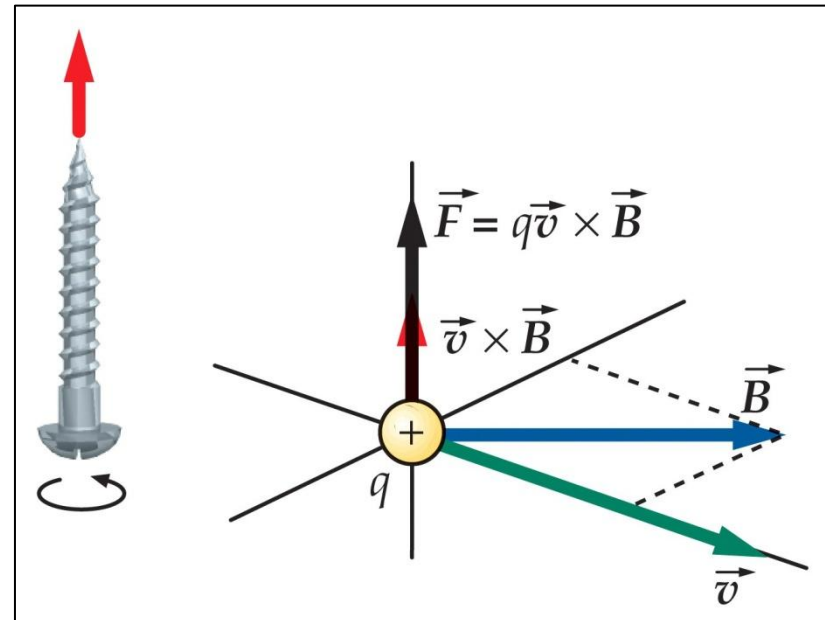
Resumen: Fuerza de Lorentz

Fuerza *magnética* sobre una partícula de carga q

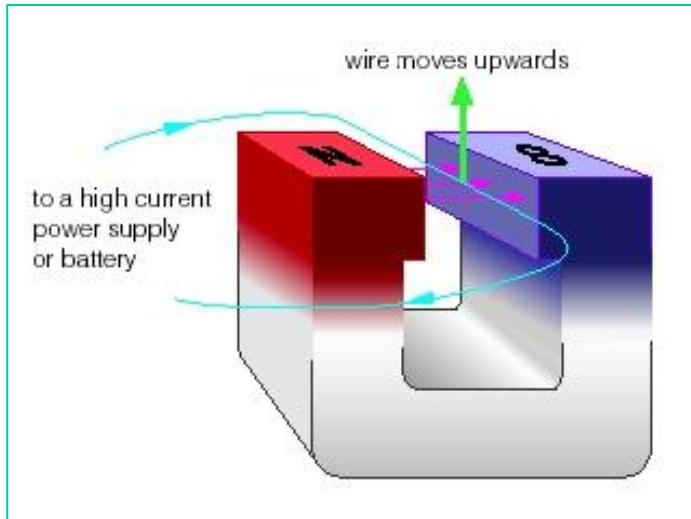
$$\mathbf{F}_m = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

• Sobre una *carga* q que se mueve con *velocidad* \mathbf{v} en un *campo magnético* \mathbf{B} se ejerce una *fuerza* \mathbf{F} que es

- *proporcional* a q , v y B
- *perpendicular* a \mathbf{v}
- *perpendicular* a \mathbf{B}
- *sentido*: de *avance* de un *tornillo de rosca derecha* al llevar \mathbf{v} hacia \mathbf{B}



Resumen: Fuerza magnética sobre una corriente



Sobre una *corriente* I que circula en una *dirección* \mathbf{u}_L , *perpendicular a un campo magnético* \mathbf{B} se ejerce una *fuerza* \mathbf{F} que es

- *perpendicular a* \mathbf{B}
- *perpendicular a* \mathbf{u}_L
- *proporcional a* L , B e I :

$$\mathbf{F} \perp \mathbf{B}$$

$$\mathbf{F} \perp (I \mathbf{u}_L)$$

$$F \sim LBI$$

$$\rightarrow \mathbf{F} = (I \mathbf{u}_L) \times \mathbf{B} L$$

$$\rightarrow \frac{\mathbf{F}}{L} = (I \mathbf{u}_L) \times \mathbf{B}$$

Fuerza por unidad de longitud

Movimiento de partículas cargadas en un campo magnético

J.E. Prieto

Fuente principal de figuras:

“Physics for scientists and engineers” (5th edition),
P.A. Tipler, G. Mosca

Movimiento de cargas en campo B

Fuerza magnética sobre una partícula de carga q

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

$$\mathbf{F} \perp \mathbf{v}$$

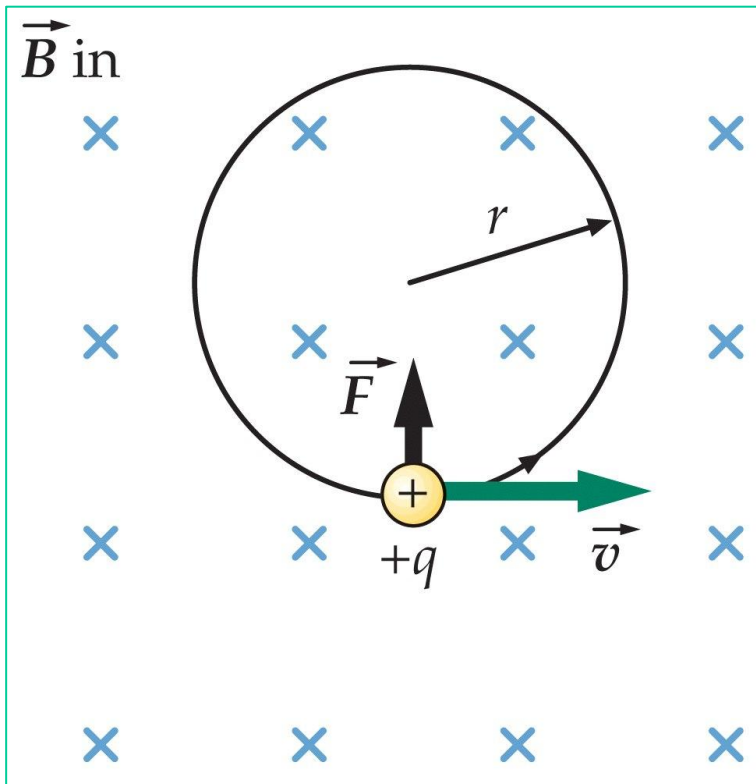
→ Si el campo \mathbf{B} es *homogéneo*, \mathbf{F}_m actúa como **fuerza centrípeta** para un **movimiento circular** en el **plano perpendicular a \mathbf{B}**

$$F_c = m a_c = F_m$$

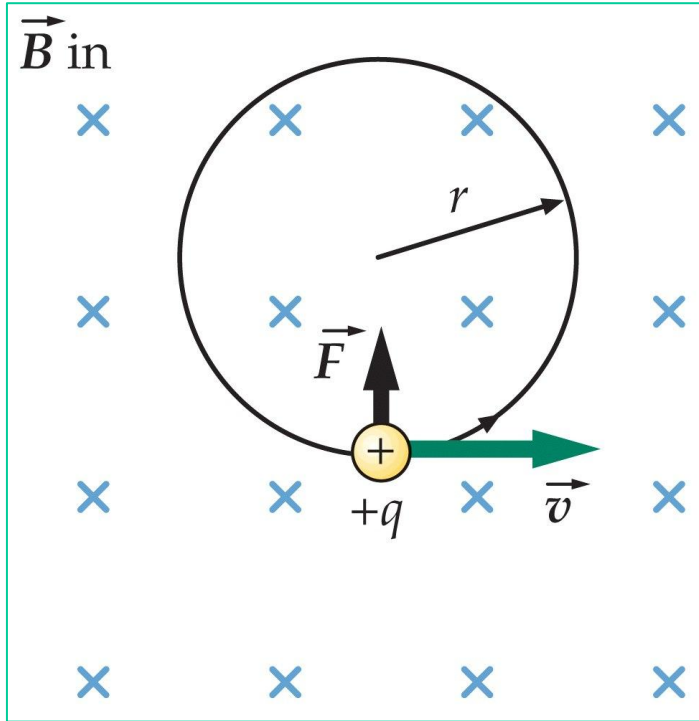
$$m \frac{v^2}{R} = q v B$$

R : Radio de
curvatura de
la órbita

$$R = \frac{m v}{q B}$$



Movimiento de cargas en campo B



R : radio de curvatura

$$R = \frac{m v}{q B}$$

Periodo de revolución T
y frecuencia angular ω :

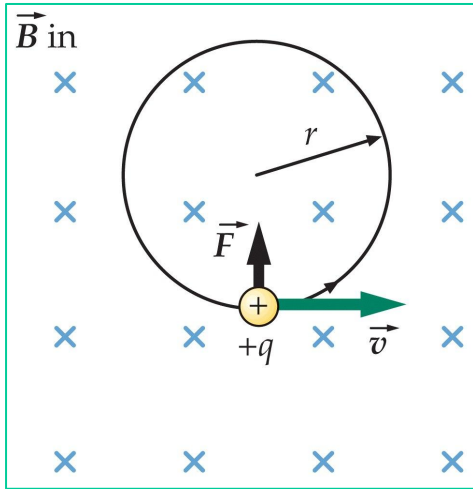
$$\frac{2\pi}{\omega} = T = \frac{2\pi R}{v}$$

$$T = \frac{2\pi m}{q B}$$

$$\omega_c = \frac{q B}{m}$$

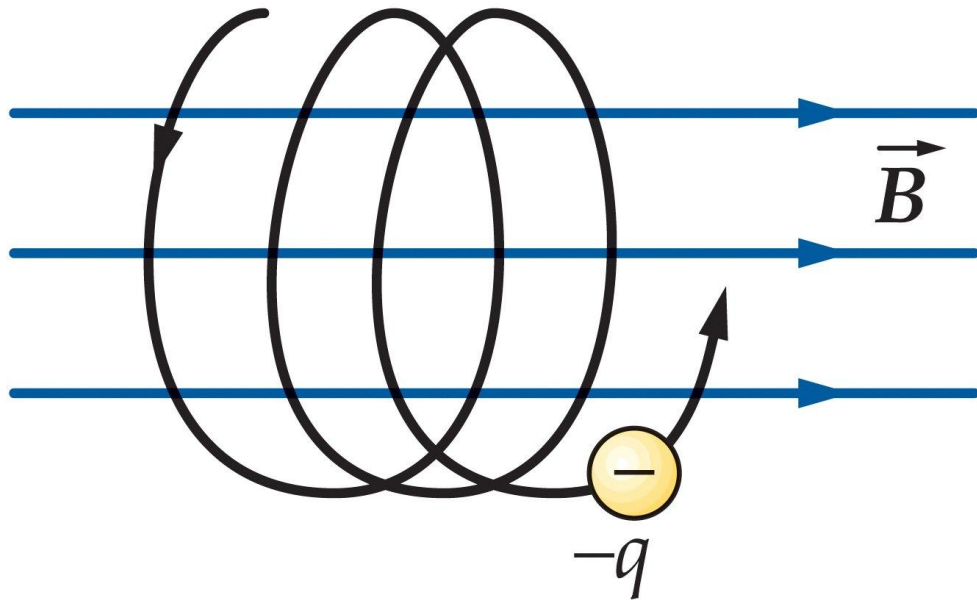
T, ω : sólo dependen de la relación q/m de la partícula.
¡Independientes de R y de v ! : **Frecuencia ciclotrón ω_c**

Movimiento general de cargas en campo \mathbf{B}



- El movimiento circular tiene lugar en el *plano perpendicular* a \mathbf{B} .
- Si la partícula tiene una componente de \mathbf{v} *paralela* a \mathbf{B} , ésta no se ve afectada por \mathbf{B}

→ Movimiento *uniforme* (velocidad constante) en dirección *paralela* a \mathbf{B}



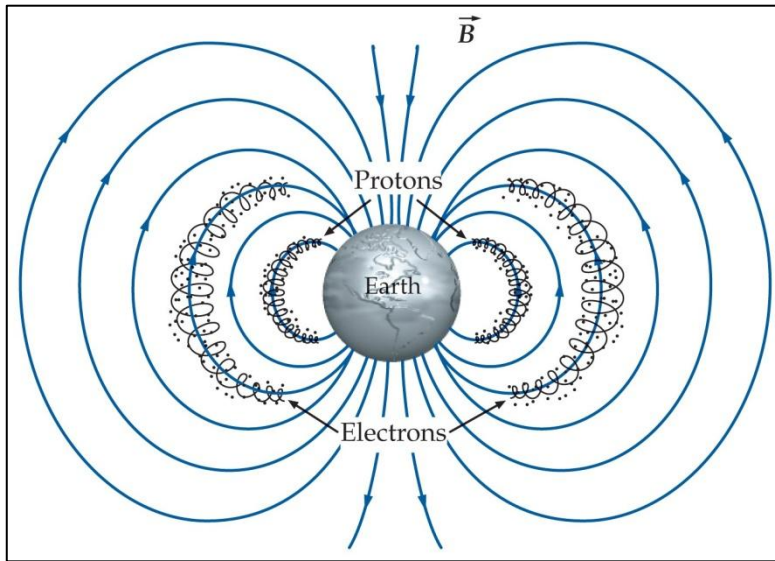
Composición de

- movimiento uniforme \parallel a \mathbf{B}
- movimiento circular \perp a \mathbf{B}



Trayectorias helicoidales
alrededor de las líneas del
campo \mathbf{B}

Ejemplo en la Naturaleza



- Partículas energéticas cargadas procedentes del espacio (rayos cósmicos, etc.) quedan atrapadas en torno a las líneas de campo \vec{B} de la Tierra
- Campos de radiación en el espacio: *cinturones de van Allen*

- Protegen de radiación la superficie de la Tierra
- En los polos, las líneas de \vec{B} entran en la Tierra: partículas se acercan a la superficie, chocan e ionizan el gas de la atmósfera: *auroras boreales*



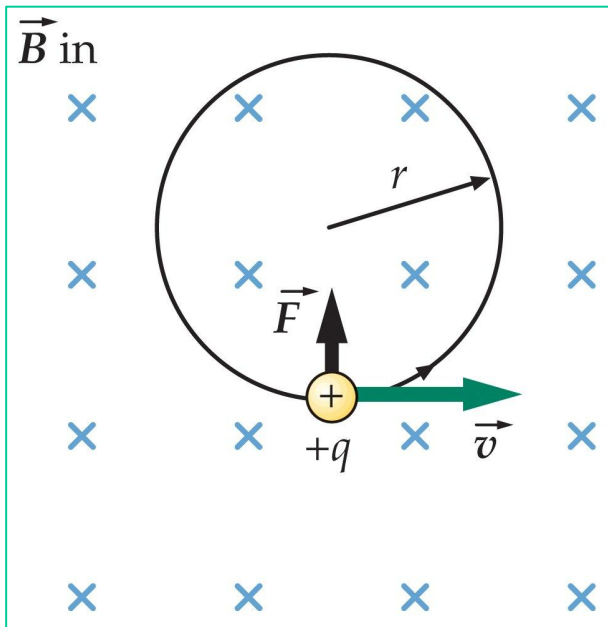
Resumen: Movimiento de cargas en campo B

Fuerza magnética sobre una partícula de carga q

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

$$\mathbf{F} \perp \mathbf{v}$$

→ \mathbf{F}_m actúa como **fuerza centrípeta** para un **movimiento circular** en el **plano perpendicular a B**



R : Radio de curvatura de la órbita

$$R = \frac{m v}{q B}$$

$$T = \frac{2 \pi m}{q B}$$

$$\omega_c = \frac{q B}{m}$$

T, ω : sólo dependen de la relación q / m de la partícula.
¡Independientes de R y de v ! : **Frecuencia ciclotrón ω_c**