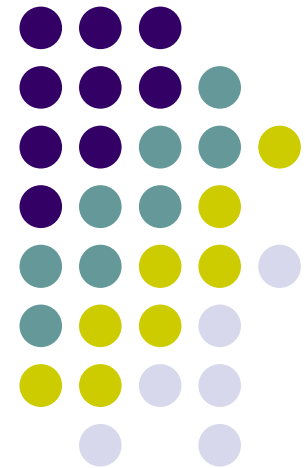


El campo magnético



Introducción histórica



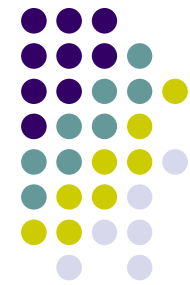
- **El término magnetismo tiene su origen en el nombre que en Grecia clásica recibía una región del Asia Menor, entonces denominada Magnesia (abundaba una piedra negra o piedra imán capaz de atraer objetos de hierro y de comunicarles por contacto un poder similar).**
- **A pesar de que ya en el siglo VI a. de C. se conocía un cierto número de fenómenos magnéticos, el magnetismo no se desarrolla hasta más de veinte siglos después (Gilbert (1544-1603), Ampère (1775-1836), Oersted (1777-1851), Faraday (1791-1867) y Maxwell (1831-1879))**
- **A partir del experimento de Oersted el Magnetismo y la electricidad (que hasta entonces habían permanecido como fenómenos independientes) quedan conectados para la física.**

Introducción histórica



Anna Dalby, 1842

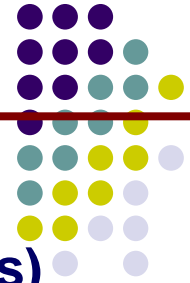
- Las primeras referencias al fenómeno del magnetismo están relacionadas con los **imanes**:
 - 800 a.C.: los griegos conocían el hecho de que la magnetita (Fe_3O_4) atrae trozos de hierro
 - s. XII: Primeras referencias escritas al uso de imanes en navegación (brújulas) en China
- Experiencia de Oersted (1820): una corriente en un alambre puede desviar la aguja de una brújula
 - Corrientes eléctricas originan campo magnético
- Ampère (1820): describió la fuerza magnética entre corrientes
 - Corrientes eléctricas sufren los efectos del campo magnético
 - Ampère ideó el concepto de "corrientes amperianas" para explicar el magnetismo natural
- Faraday (1831): un campo magnético variable con el tiempo produce un campo eléctrico
- Maxwell (Final S.XIX): un campo eléctrico variable produce un campo magnético. Dedujo la existencia de ondas electromagnéticas
 - Las **ecuaciones de Maxwell** describen la teoría electromagnética clásica



Magnetismo en imanes

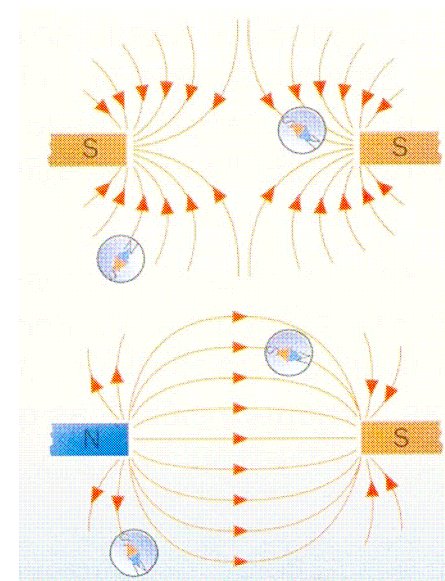
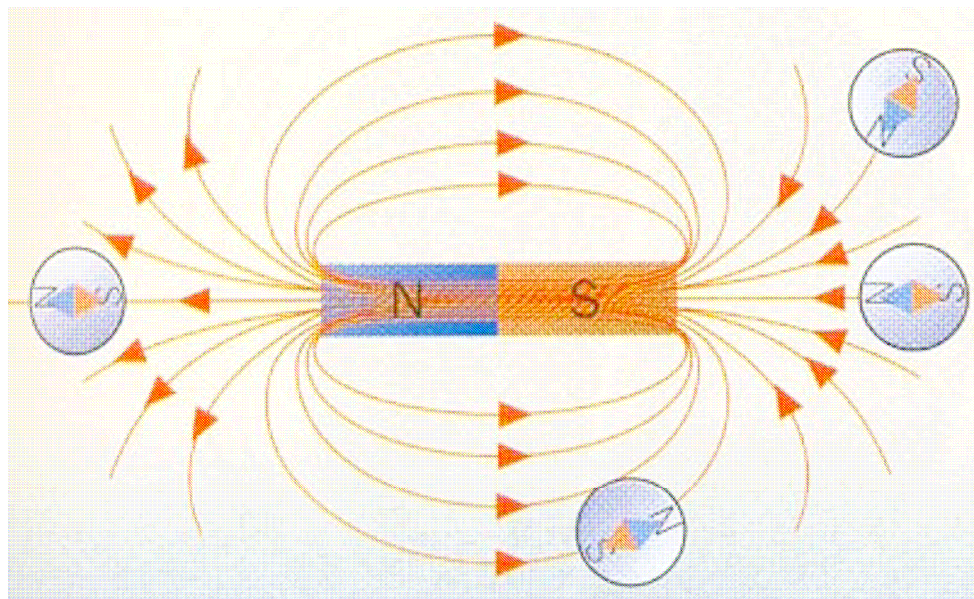
- Si una barra imantada se deja girar libremente uno de sus extremos se orienta hacia el norte y otro hacia el sur
 - Se denominan **polo norte** y **polo sur** del imán
- Los polos opuestos de los imanes se atraen, mientras que los polos iguales se repelen
- Un objeto que contiene hierro es atraído por cualquiera de los polos de un imán
 - Ejemplo: imanes en las puertas de los frigoríficos
- No existen polos magnéticos aislados
- Por analogía con interacciones eléctricas afirmamos que un imán genera un **campo magnético** que emerge en su polo norte y entra por su polo sur
 - Una aguja imantada (brújula) tiende a alinearse con el campo magnético
 - El sentido del campo magnético lo indica el polo norte de la brújula

Campo magnético



Características específicas de las líneas del campo magnético:

- Más juntas en los polos (el campo es más intenso en los polos)
- Son siempre líneas cerradas. Nunca pueden terminar en el infinito, siempre hacen bucles o empiezan en un polo y terminan en otro.
- Se les atribuye, por convenio, un sentido. Salen siempre de un polo N y terminan en un polo S. Las líneas de campo salen del polo norte del imán, recorren el espacio exterior, regresan al imán por el polo sur y continúan por su interior hasta el polo norte

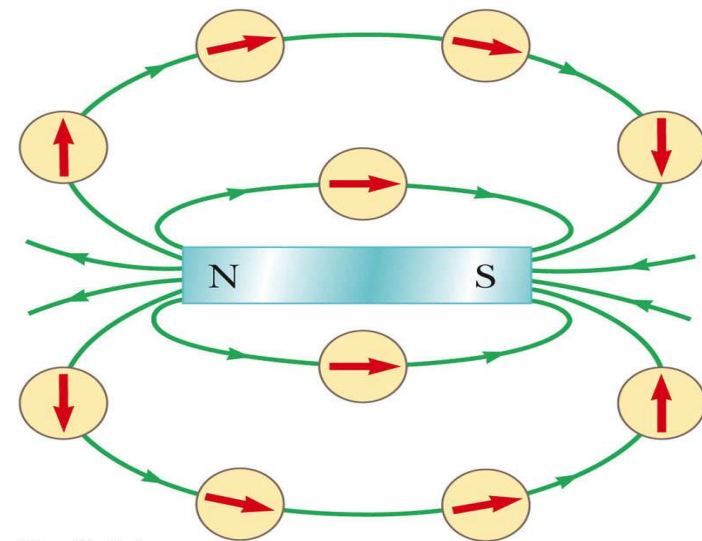


The Magnetic Field

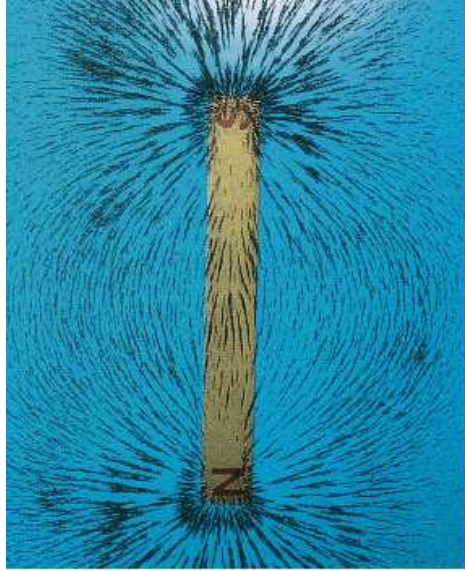


- Magnetic field surrounds a magnet. The field is a vector, and is symbolized by \vec{B}
- Magnets always have two poles, called the north pole and the south pole, that are sources of field.
- Like poles (from different magnets) repel, unlike poles attract.

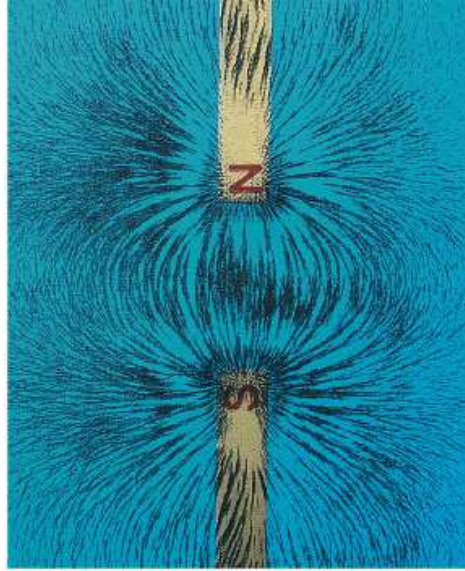
Like electric field lines, magnetic field lines are used to illustrate the field. **Outside a magnet**, field lines start from the north pole, end at the south pole. Field lines can be traced out by a small compass.



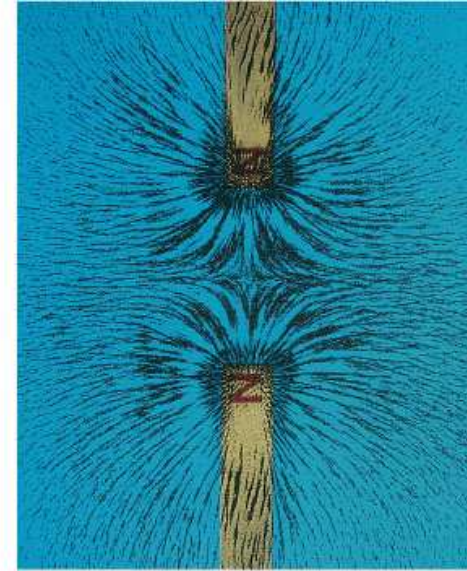
Magnetic field lines of bar magnets, shown by iron filings.



Field lines of one magnet



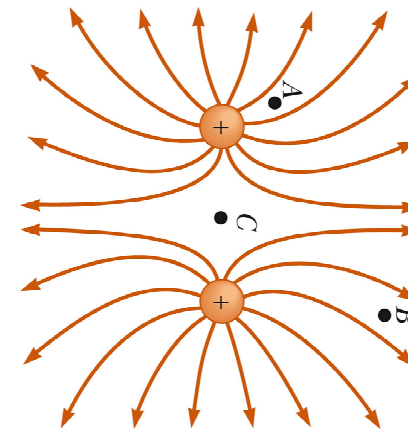
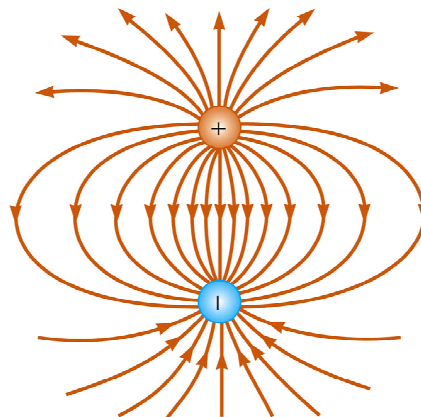
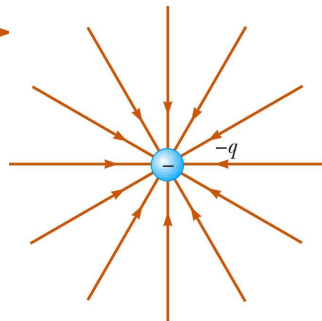
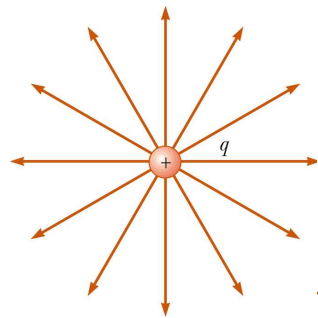
of N and S poles



of N and N poles

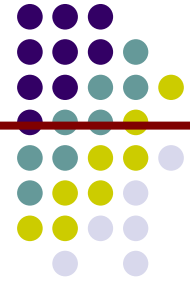
Magnetic field

Comparison: there exist electric monopoles, the point charges. Magnet monopoles do not exist (have not been found). No matter how small a magnet is, it has two poles, N and S.



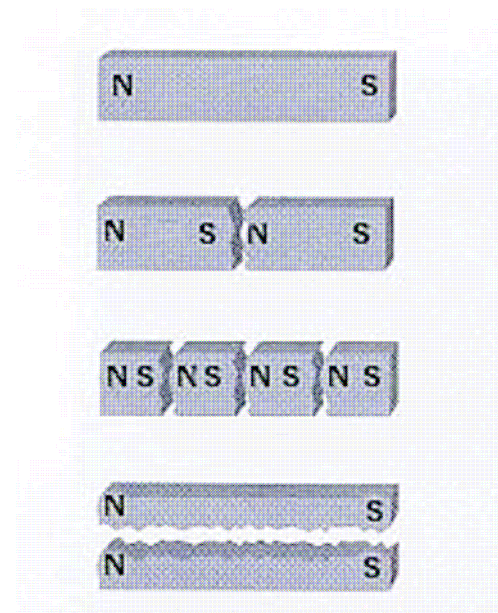
Electric field

Magnetismo IV: Imanes



Características de los imanes (polos de un imán):

- Los polos opuestos se atraen y los polos iguales se repelen
- Es imposible aislar los polos magnéticos de un imán.
No es posible, obtener un imán con un solo polo magnético (semejante a un cuerpo cargado con electricidad de un solo signo).
-> **Un imán es un dipolo magnético.**





Units of Magnetic Field

- The SI unit of magnetic field is the tesla (T)

$$T = \frac{Wb}{m^2} = \frac{N}{C \cdot (m/s)} = \frac{N}{A \cdot m}$$

- Wb (Weber) is the unit for magnetic field flux.
- A non-SI commonly used unit is a gauss (G)
 - $1 T = 10^4 G$



32-1 Valores típicos de algunos campos magnéticos^a

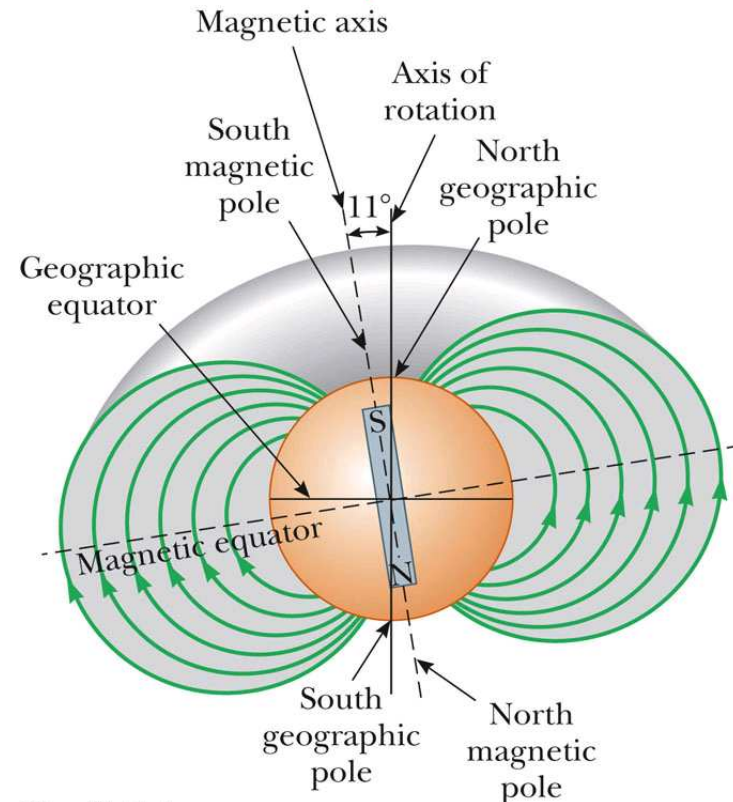
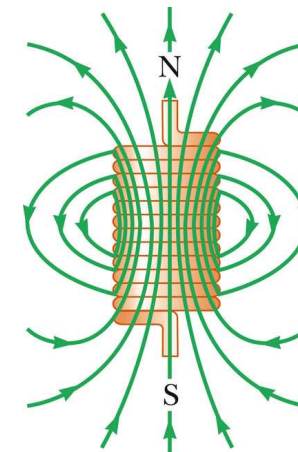
<i>Ubicación</i>	<i>Campo magnético (T)</i>
Cerca de la superficie de una estrella de neutrones (calculado)	10^8
Cerca de un imán superconductor	5
Cerca de un electroimán grande	1
Cerca de un pequeño imán de barra	10^{-2}
En la superficie terrestre	10^{-4}
En el espacio interestelar	10^{-10}
En un cuarto con protección magnética	10^{-14}

^a Valores aproximados.

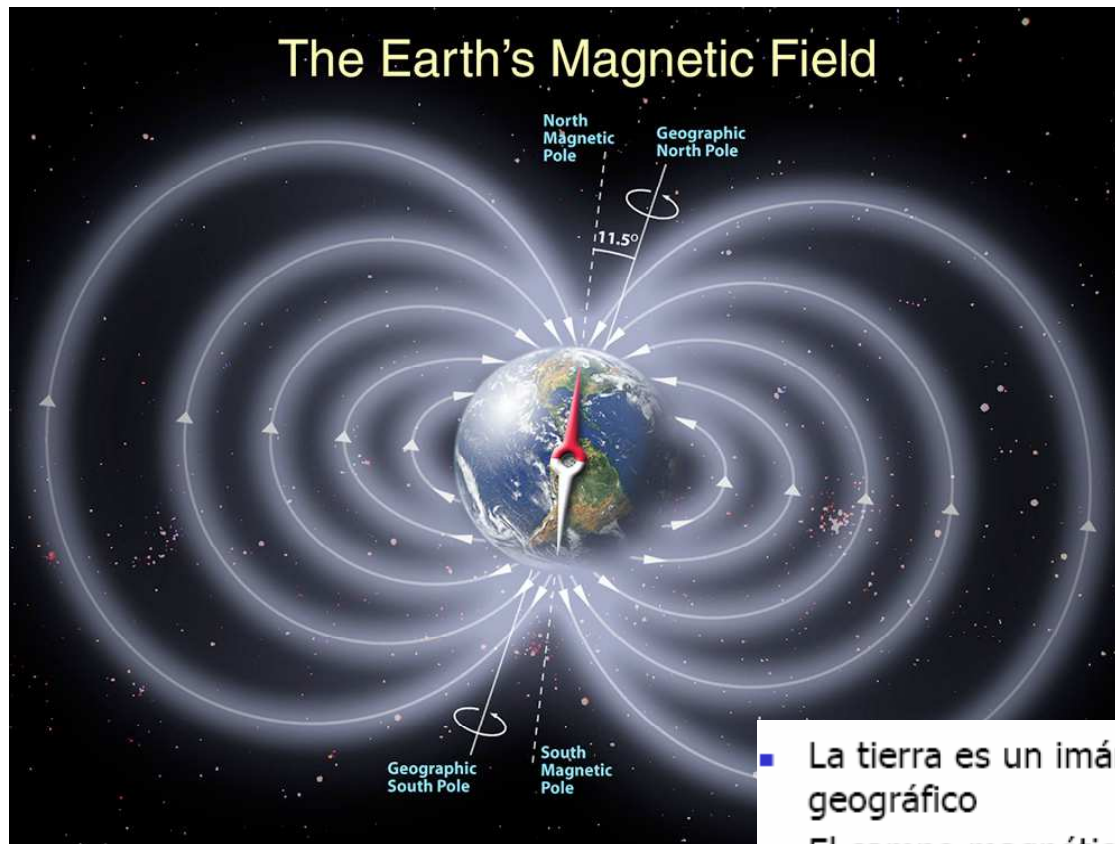
What generates the magnetic field?



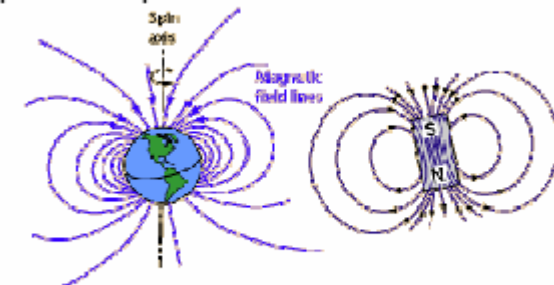
- Current (or moving charges, or changing electric field) generates magnetic field.
- We will get back to this topic in the following chapter.
- Magnet can take the form of a permanent magnet (ex. the bar magnet). The field is generated by current in the atoms of the material.
- The Earth itself is also a big magnet.



Campo magnético terrestre



- La tierra es un imán con su polo sur próximo al Polo Norte geográfico
- El campo magnético de la tierra es similar al de una barra imantada inclinada unos 11° respecto al eje de giro
- La magnitud del campo magnético sobre la superficie de la tierra varía en un rango de 0.3 a 0.6 gauss





→ Observaciones experimentales:

- $|\vec{F}| \propto q, |\vec{v}|, |\vec{B}|$

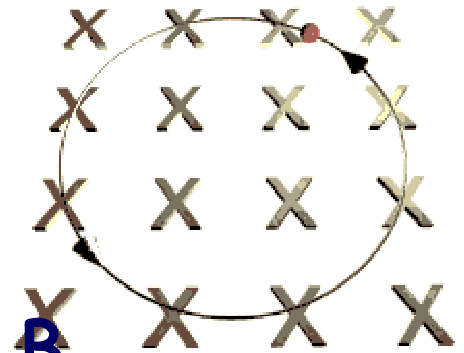
- \vec{F} depende de la dirección de \mathbf{v} y de \mathbf{B}

- Cuando una partícula se mueve en dirección paralela al vector campo magnético $\rightarrow F=0$.

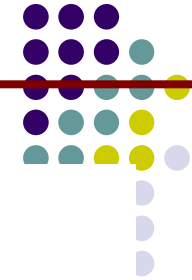
- \mathbf{F} es perpendicular al plano formado por \mathbf{v} y de \mathbf{B}

- La fuerza magnética sobre una carga positiva tiene sentido opuesto a la fuerza que actúa sobre una carga negativa que se mueva en la misma dirección.

- Si el vector velocidad hace un ángulo θ con el campo magnético: $|\vec{F}| \propto \text{sen } \theta$



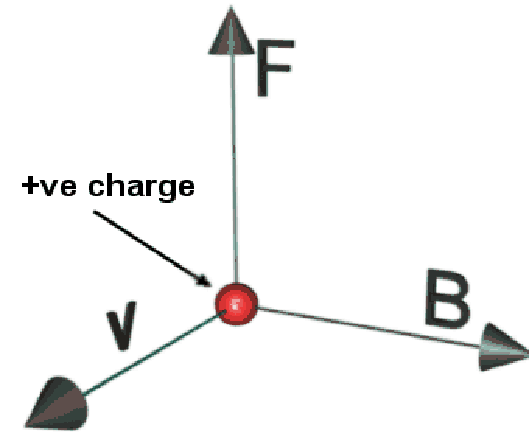
Magnetismo: Fuerzas sobre cargas en movimiento



→ Fuerza de Lorentz:

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

- **Módulo:** $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta$
(θ es el ángulo formado por v y B)
- **Dirección:** perpendicular al plano de v y B
- **Sentido:** regla de la mano derecha



Nota importante: $\vec{F} \perp \vec{v}$ La fuerza de Lorentz no realiza trabajo y por tanto no cambia la celeridad

Magnetic force on moving charge



The formula: $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$

Here \vec{F}_B is the magnetic force

q is the charge

\vec{v} is velocity of the charge

\vec{B} is the magnetic field

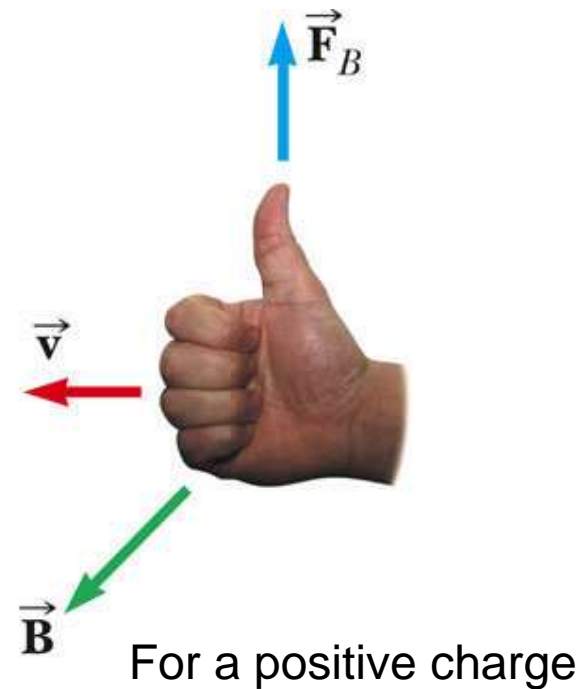
The direction of the force is determined by the charge and the vector product of the velocity and the magnetic field.

The magnitude:

$$F_B = qvB \sin \theta$$

or $F_B = qvB$

When the velocity and the field are perpendicular to each other.



Math:

Vector cross product: $\vec{C} = \vec{A} \times \vec{B}$

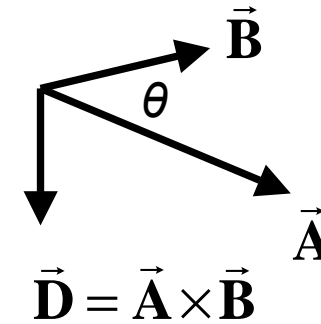
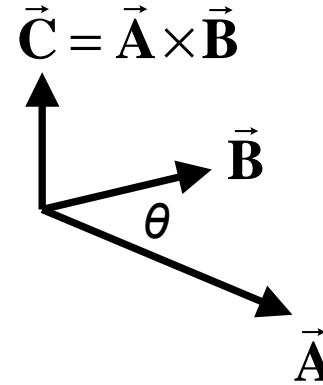
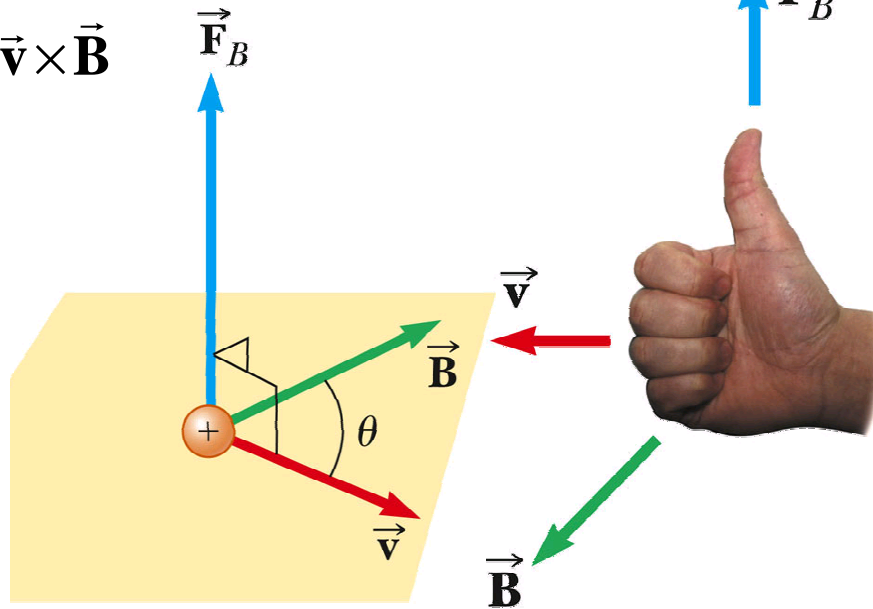
Magnitude of the vector \vec{C} :

$$C \equiv |\vec{C}| = AB \sin(\theta)$$

Vector cross product: $\vec{D} = \vec{B} \times \vec{A} = -\vec{C}$

Determine the direction. If

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

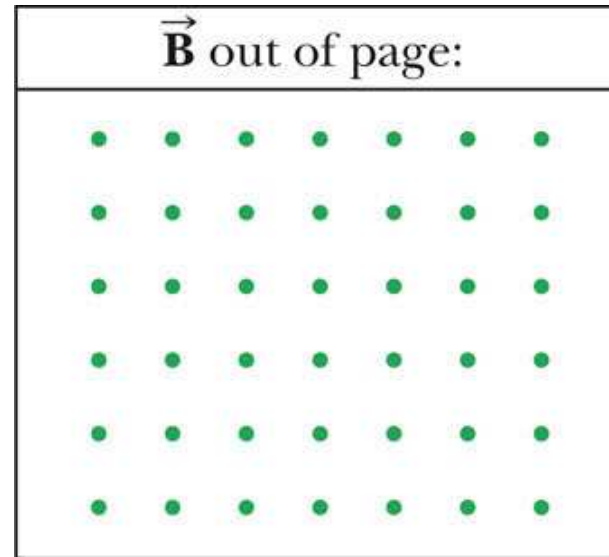


The right-hand rule:

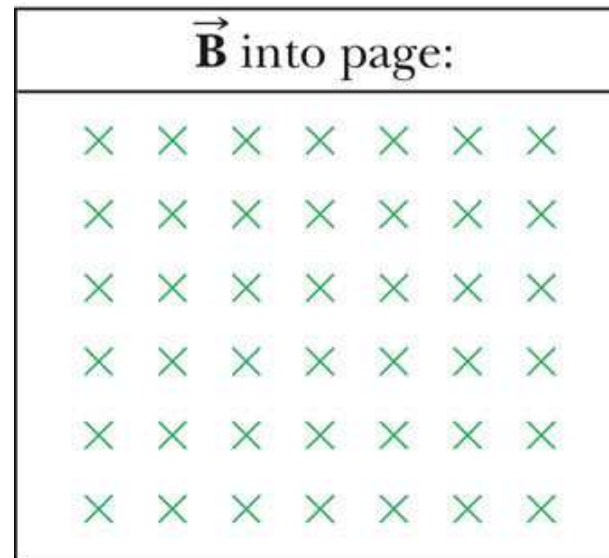
1. Four fingers follow the first vector.
2. Bend towards the second vector.
3. Thumb points to the resultant vector.

Notation Notes

- When vectors are perpendicular to the page, dots and crosses are used
 - The dots represent the arrows coming out of the page
 - The crosses represent the arrows going into the page



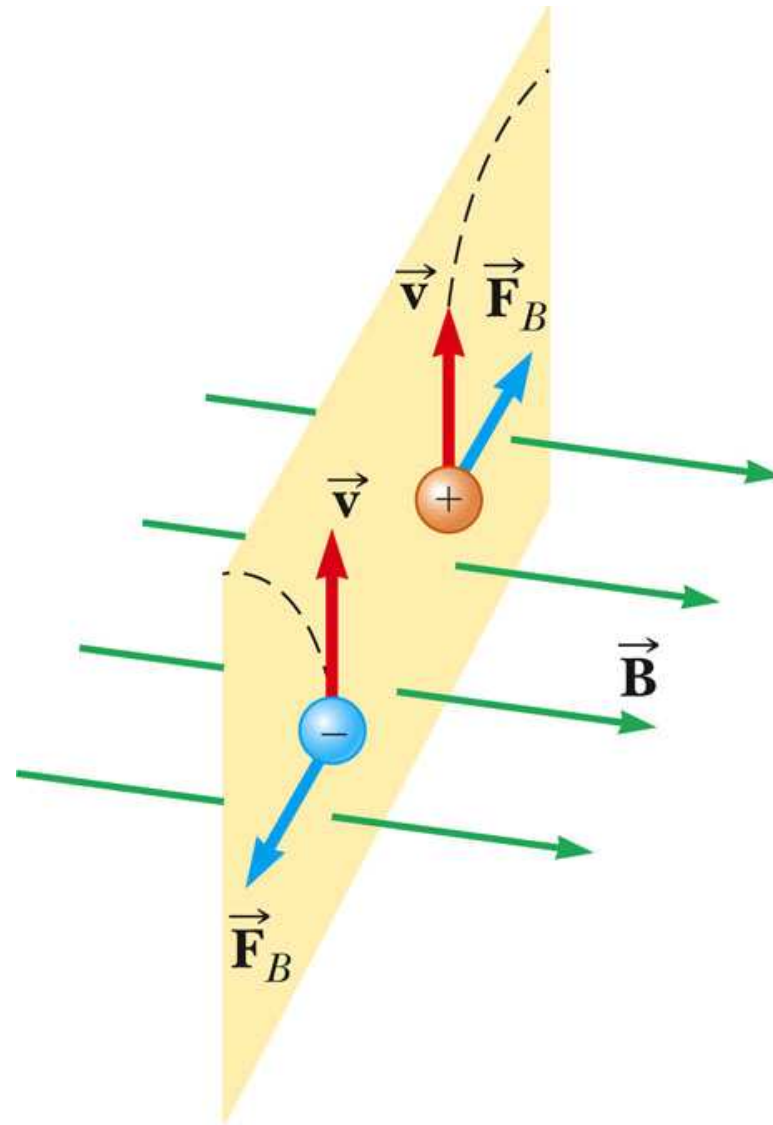
(a)



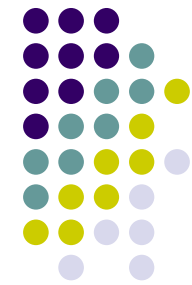
(b)



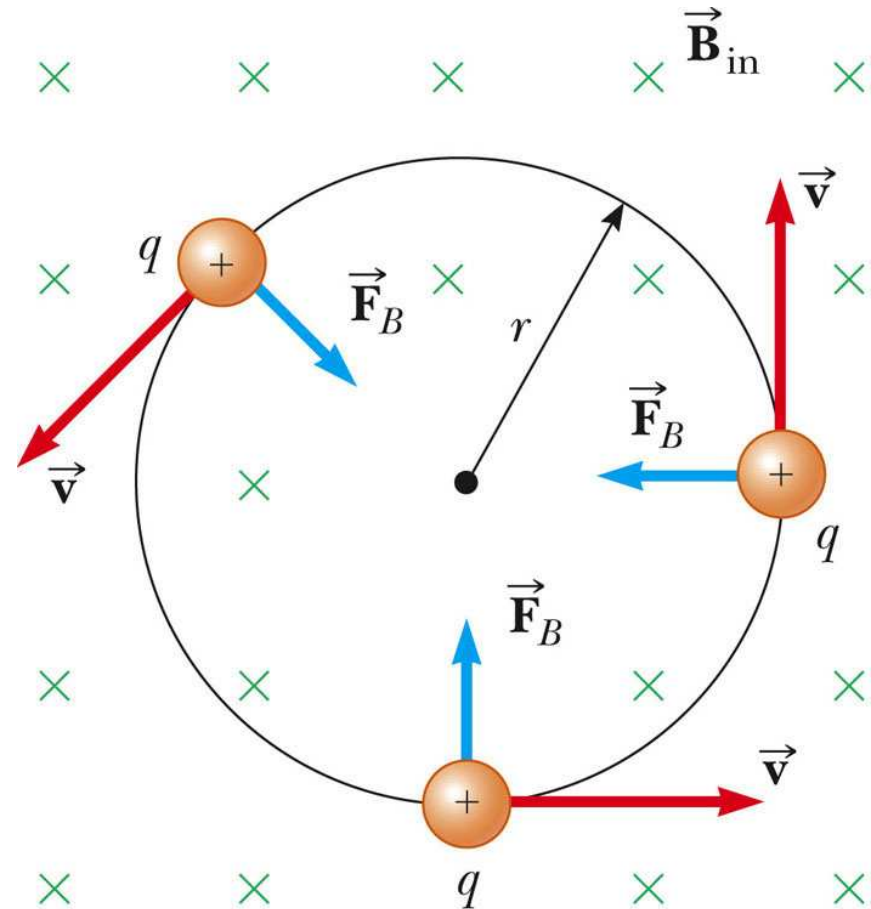
A few examples



Charged Particle in a Magnetic Field



- Consider a particle moving in an external magnetic field with its velocity perpendicular to the field
- The force is always directed toward the center of the circular path
- The magnetic force causes a centripetal acceleration, changing the direction of the velocity of the particle



Force on a Charged Particle



- Equating the magnetic and centripetal forces:

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

- Solving for r:

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

- r is proportional to the linear momentum of the particle and inversely proportional to the magnetic field

More About Motion of Charged Particle



- The angular speed of the particle is

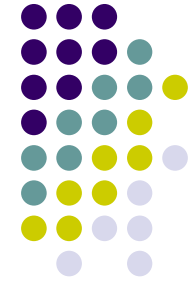
$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$

- The period of the motion is

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$

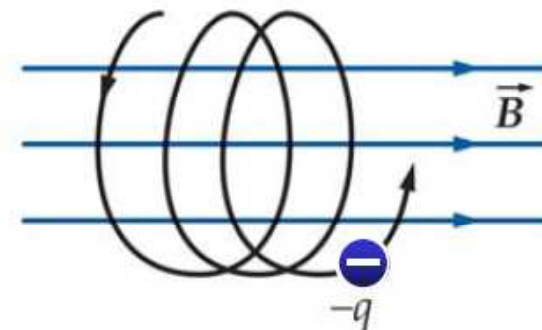
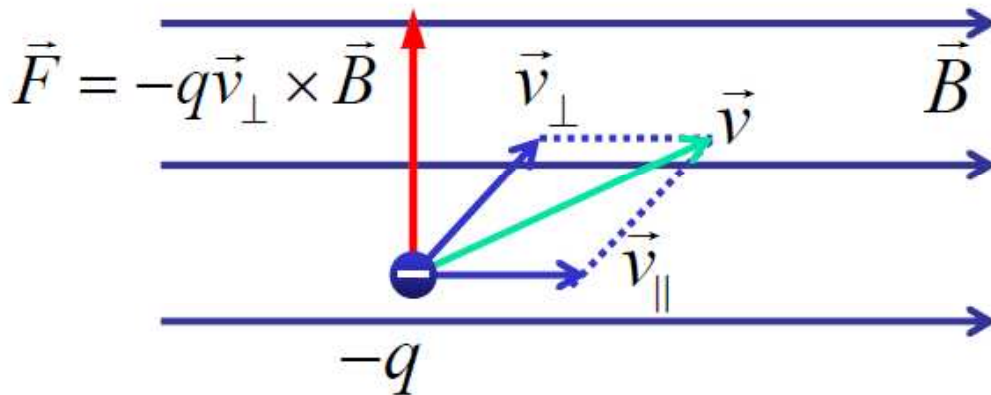
and this is not a function of the velocity.

Movimiento de una carga puntual en un campo magnético

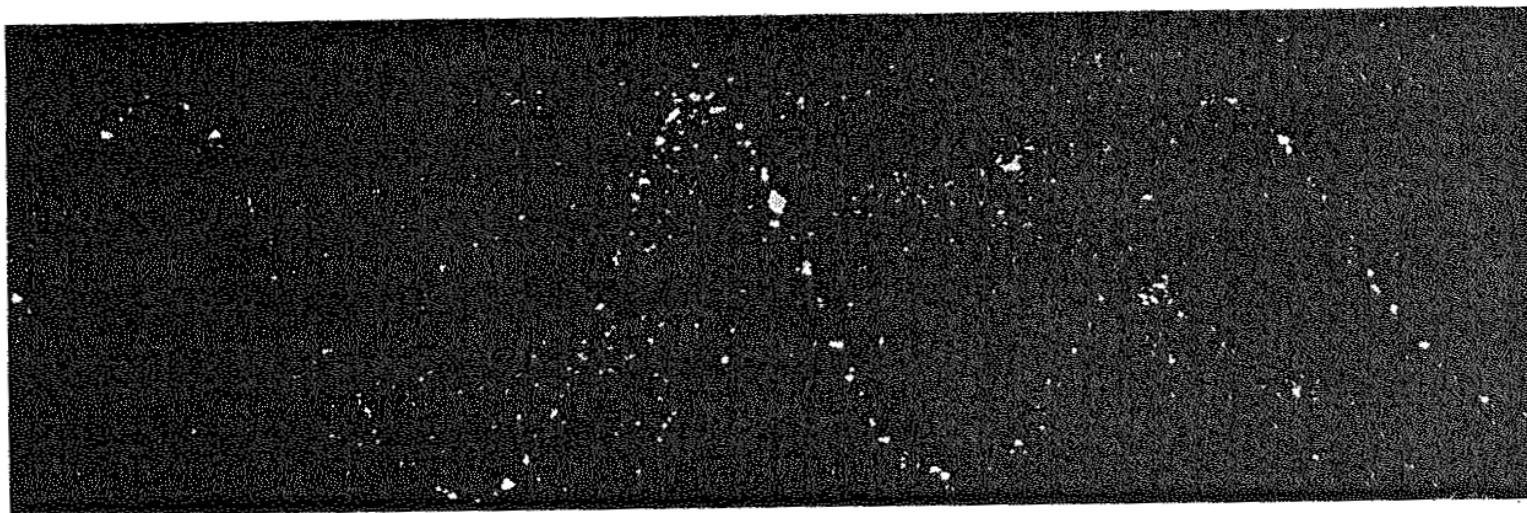


- Caso más general: carga $-q$ cuya velocidad forma un ángulo arbitrario con el **campo magnético uniforme**
 - La componente de \vec{v} paralela a \vec{B} permanece constante
 - La componente de \vec{v} perpendicular a \vec{B} se trata como en el caso anterior: movimiento circular uniforme

$$\vec{F} = -q\vec{v} \times \vec{B} = -q(\vec{v}_{\perp} + \vec{v}_{\parallel}) \times \vec{B} = -q\vec{v}_{\perp} \times \vec{B}$$



Trayectoria helicoidal

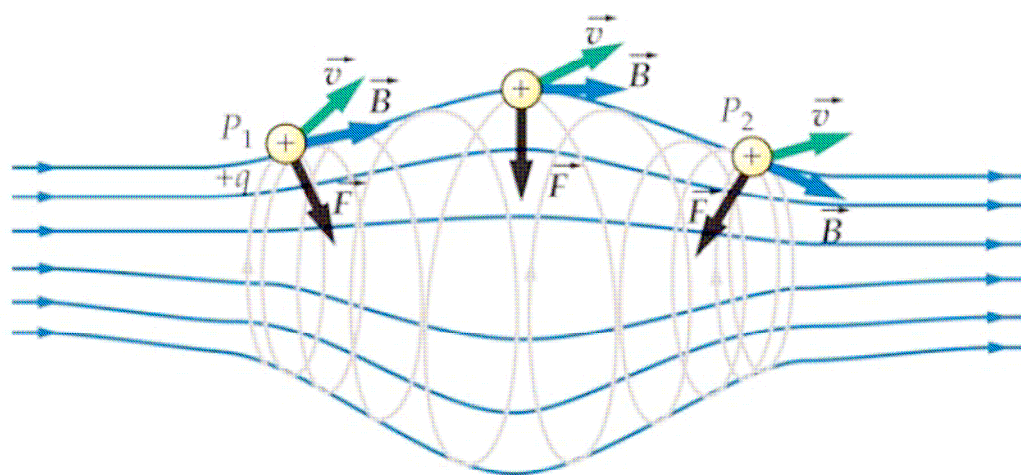


(b)



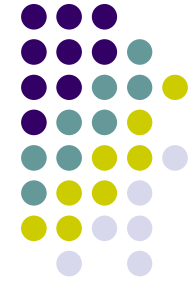
Movimiento de una carga puntual en un campo magnético

- Para **campos magnéticos no uniformes** la situación es mucho más complicada
- Para confinar haces densos de partículas cargadas (plasma) se utilizan **botellas magnéticas**
 - Aplicación en investigación de fusión nuclear



- Las partículas oscilan entre P_1 y P_2

Differences Between Electric and Magnetic Fields



- Direction of force
 - The electric force acts along the direction of the electric field (scale product)
 - The magnetic force acts perpendicular to the magnetic field (vector cross product)
- Motion
 - The electric force acts on a charged particle regardless the particle is moving or not.
 - The magnetic force acts on a charged particle only when the particle is in motion.

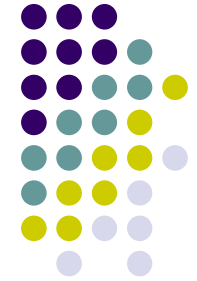
More Differences Between Electric and Magnetic Fields



- Work
 - The electric force does work in displacing a charged particle
 - The magnetic force associated with a steady magnetic field does no work when a charged particle is displaced
 - This is because the force is perpendicular to the displacement
 - Prove:

$$dW = \vec{\mathbf{F}}_B \cdot d\vec{\mathbf{s}} = q\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}} \cdot \vec{\mathbf{v}} dt = 0$$

Charged Particles Moving in Electric and Magnetic Fields

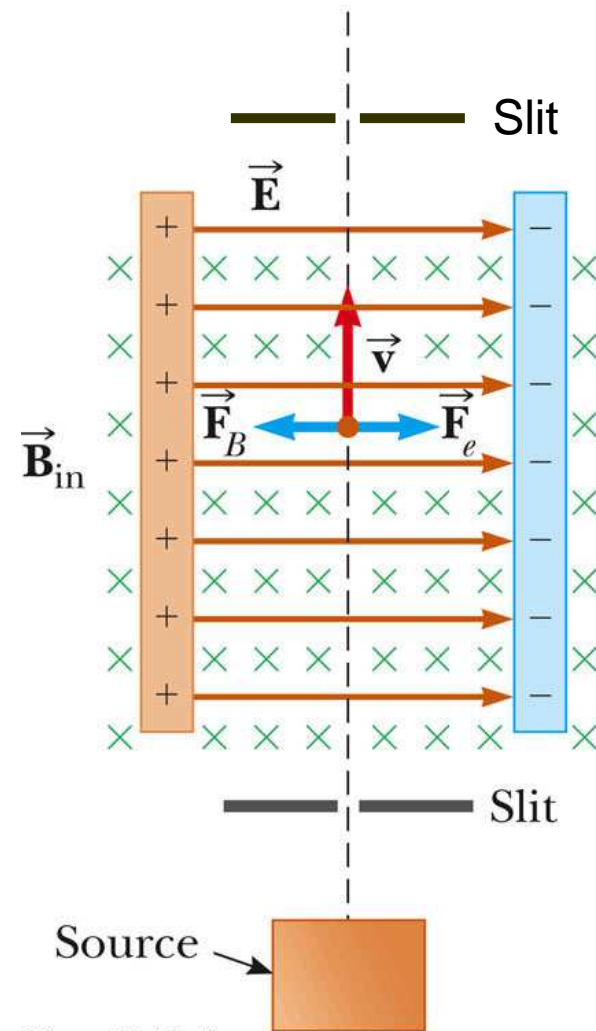


- In many applications, charged particles will move in the presence of both magnetic and electric fields
- In that case, the total force is the sum of the forces due to the individual fields
- In general (The Lorentz force):

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

Velocity Selector

- A uniform electric field is perpendicular to a uniform magnetic field
- When the force due to the electric field is equal but opposite to the force due to the magnetic field, the particle moves in a straight line
- This selects particles with velocities of the value $v = E / B$



© Thomson Higher Education



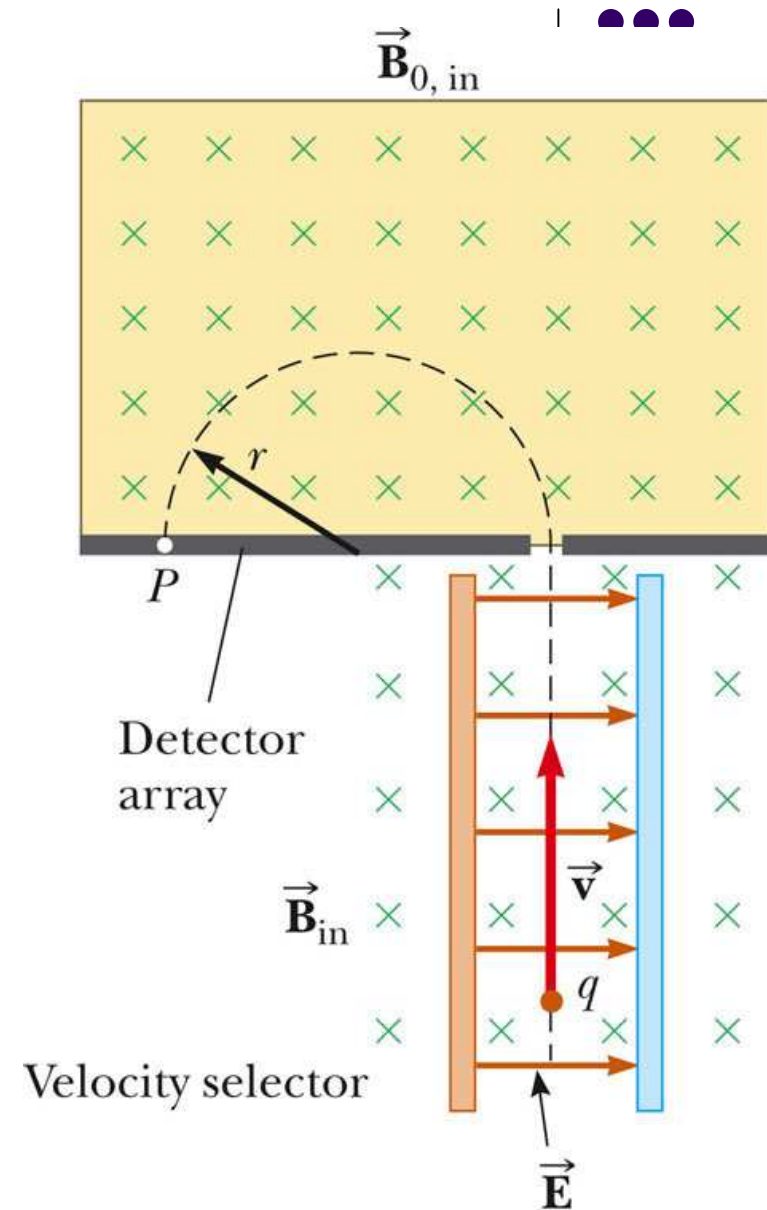
Mass Spectrometer

- A mass spectrometer separates ions according to their mass-to-charge ratio
- A beam of ions passes through a velocity selector and enters a second magnetic field where the ions move in a semicircle of radius r before striking a detector at P.

From $r = \frac{mv}{qB}$ and v from the

velocity selector, the mass m of the particle is measured.

- If the ions are positively charged, they deflect to the left; If the ions are negatively charged, they deflect to the right

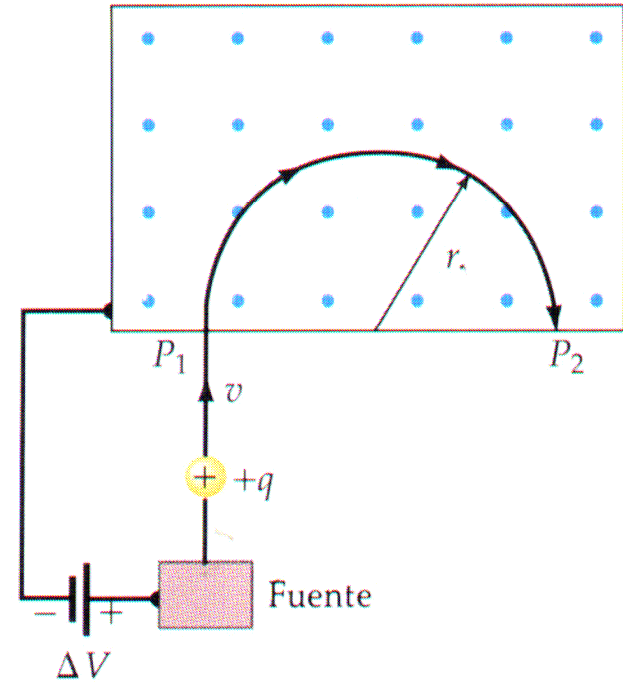
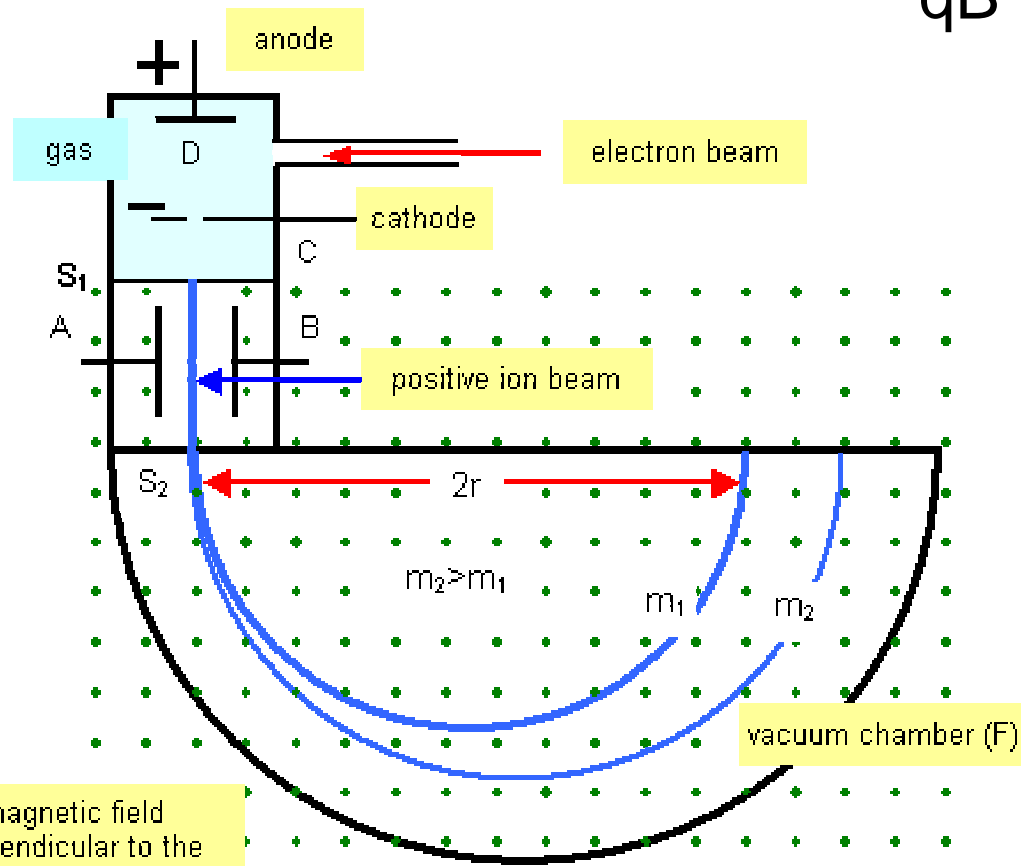


Magnetismo: Fuerzas sobre cargas en movimiento



→ Espectrometro de masas

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



$$\frac{1}{2}mv^2 = q\Delta V$$

$$\frac{m}{q} = \frac{B^2 r^2}{2\Delta V}$$

http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/espectrometro_apple2.html

Magnetismo: Fuerzas sobre cargas en movimiento

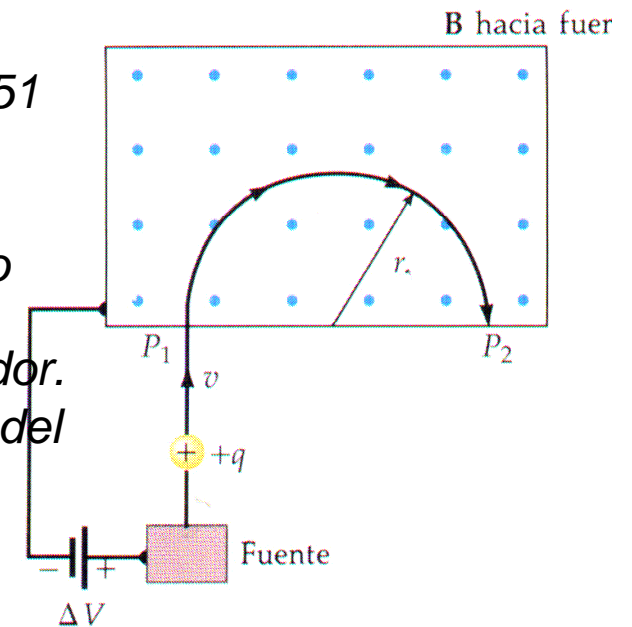


Un ion de ^{58}Ni de carga $+e$ y masa $9,62 \cdot 10^{-26}$ Kg se acelera a través de una diferencia de potencial de 3 kV y se desvía en un campo magnético de 0,12 T.

- a -) Determinar el radio de curvatura de la órbita del ion.
- b -) Determinar la diferencia que existe entre los radios de curvatura de los iones ^{58}Ni y ^{60}Ni .

De la ecuación ultima se obtiene $r^2 = 2 \cdot m \cdot \Delta V / q \cdot B^2 = 0,251$
 $r = 0,501$ m

b-) El radio de la órbita de un ion en un determinado campo magnético es proporcional a la raíz cuadrada de su masa para un determinado voltaje acelerador. Si r_1 , es el radio de la órbita del ion ^{58}Ni y r_2 el de la órbita del ion ^{60}Ni , la relación de los radios es $r_2 / r_1 = (m_2 / m_1)^{1/2}$



Por tanto, el radio de la órbita del ion ^{60}Ni es $r_2 = (60 / 58)^{1/2} = 0,510$ m

La diferencia entre los radios de las órbitas es
 $r_2 - r_1 = 0,510$ m - $0,501$ m = $0,009$ m = 9 mm

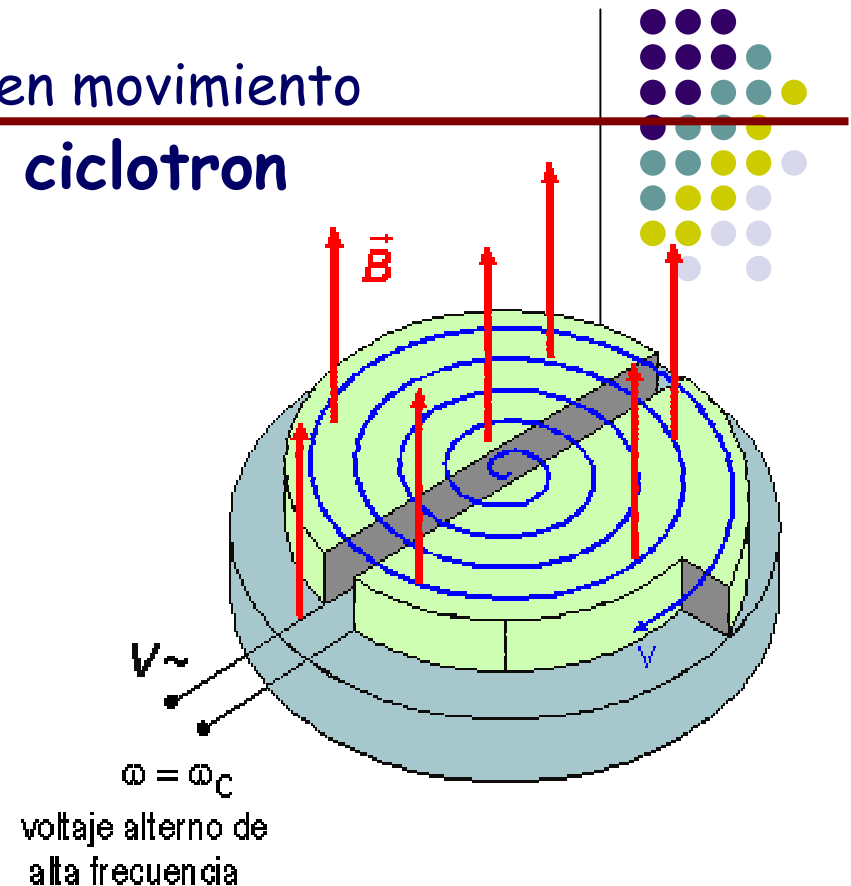
Magnetismo: Fuerzas sobre cargas en movimiento

→ Aceleradores de partículas: El ciclotron

$$\left. \begin{aligned} F &= qvB \\ F &= m \frac{v^2}{r} \end{aligned} \right\} \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$$

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{2\pi r}{T} \\ r &= \frac{mv}{qB} \end{aligned} \right\} \Rightarrow r = \frac{m \cdot 2\pi r}{qBT} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} T &= \frac{2\pi m}{qB} \\ \omega &= \frac{qB}{m} \end{aligned} \right.$$

$$V_{\text{Salida}} = \frac{qBr_{\text{max}}}{m}$$



[Video 1 \(explicacion\),](#)

[Video 2\(aplicaciones\),](#)

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/ciclotron/ciclo.html>

Magnetismo: Fuerzas sobre cargas en movimiento



Ejemplo: Un ciclotrón que acelera protones posee un campo magnético de 1,5 T y un radio máximo de 0,5 m.

a -) ¿Cuál es la frecuencia del ciclotrón?

b-) Determinar la energía cinética con que emergen los protones (en eV).

(a) El periodo de una partícula en un campo magnético constante viene dado por

$$T = 2 \cdot \pi m / q B$$

por tanto la frecuencia del ciclotrón viene dada por la ecuación

$$f = q B / 2 \pi m = (\text{sustituyendo directamente}) = 22,9 \text{ MHz}$$

b-)La energía cinética de los protones emergentes viene dada por la ecuación

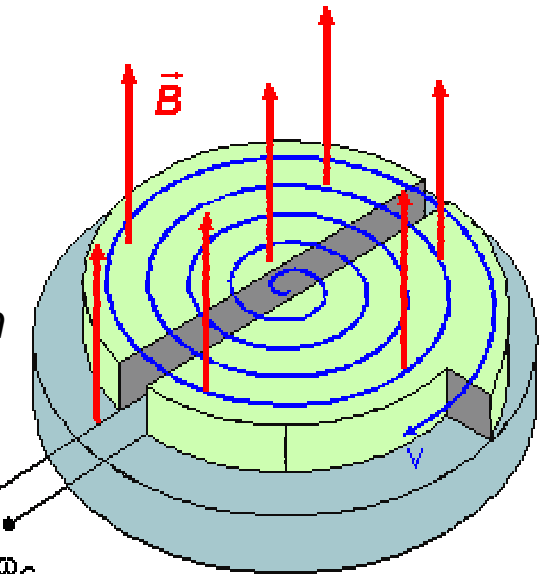
$$E_{\text{cinetica}} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} (q^2 B^2 / m) r_{\text{max}}^2$$

$$E_{\text{cinetica}} = 4,31 \cdot 10^{-12} \text{ Julios}$$

Las energías de los protones y otras partículas elementales se expresan usualmente en electrónvoltios (eV).

Como 1 eV = 1,6 · 10⁻¹⁹ Julios , resulta

E cinetica = 26,9 MeV (Millones de electrónvoltios)

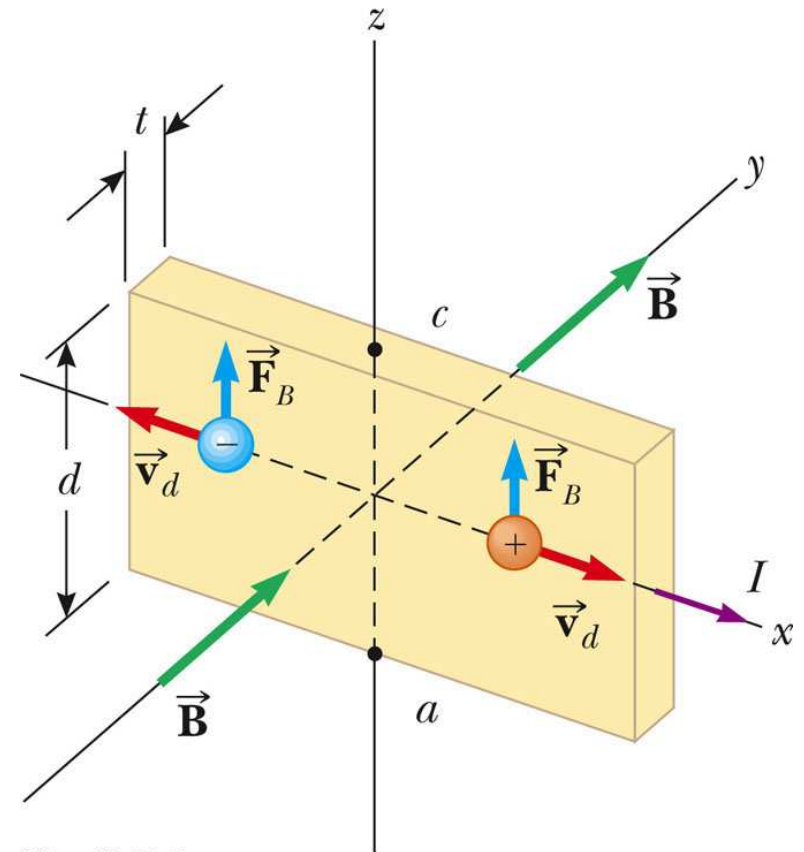


voltaje alterno de alta frecuencia

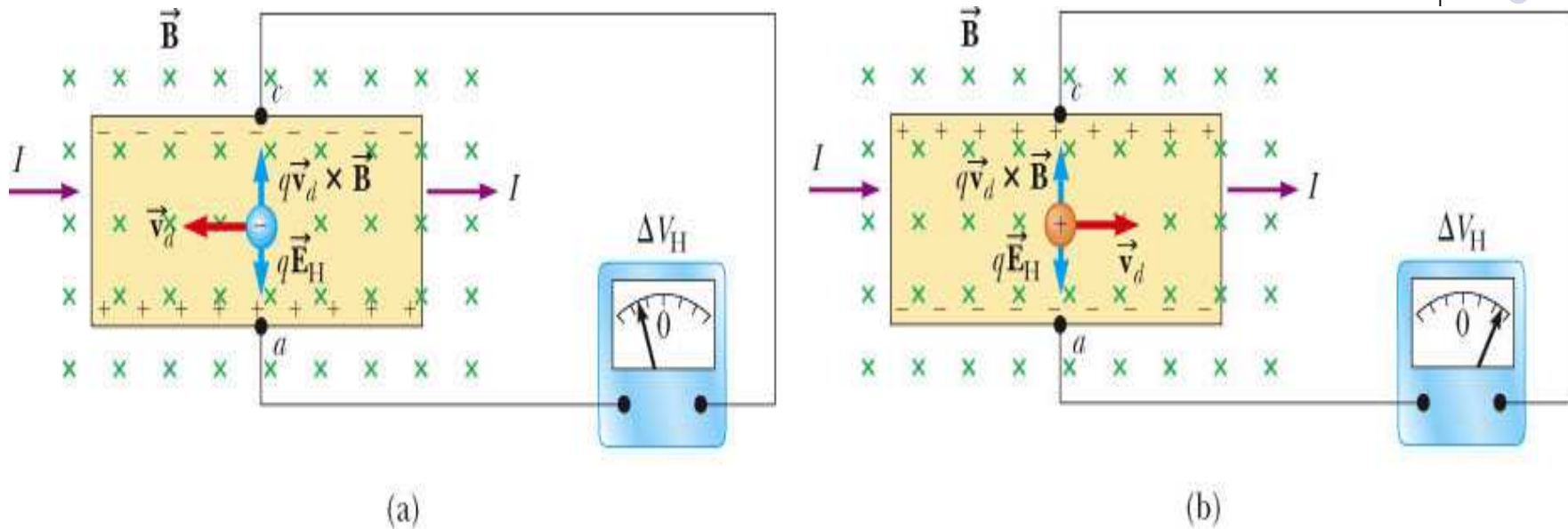
Hall Effect, a way to measure magnetic field



- When a current carrying conductor is placed in a magnetic field, a potential difference is generated in a direction perpendicular to both the current and the magnetic field
- This phenomena is known as the Hall effect
- It arises from the deflection of charge carriers (either positive, or negative, but not both) to one side of the conductor as a result of the magnetic forces they experience
- In the figure, the Hall voltage is measured between points *a* and *c*

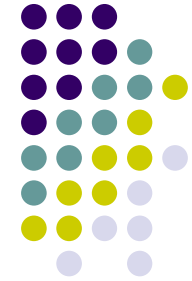


Hall voltage, negative (a) or positive (b) carriers

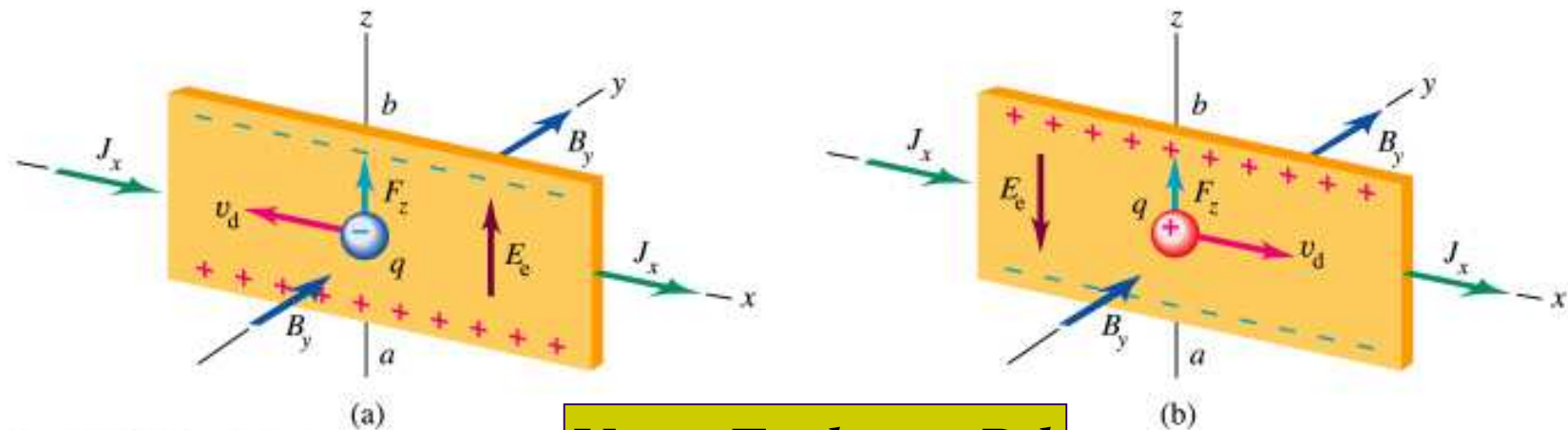


- When the charge carriers are negative (a), the upper edge of the conductor becomes negatively charged
 - **c is at a lower potential than a**
- When the charge carriers are positive (b), the upper edge becomes positively charged
 - **c is at a higher potential than a**

Efecto Hall



- Conductor plano situado en un campo magnético perpendicular



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$V_H = E_H d = v_d B d$$

- Se produce una redistribución de carga hasta que se equilibran fuerza eléctrica y magnética → se crea una diferencia de potencial → Campo eléctrico de Hall.

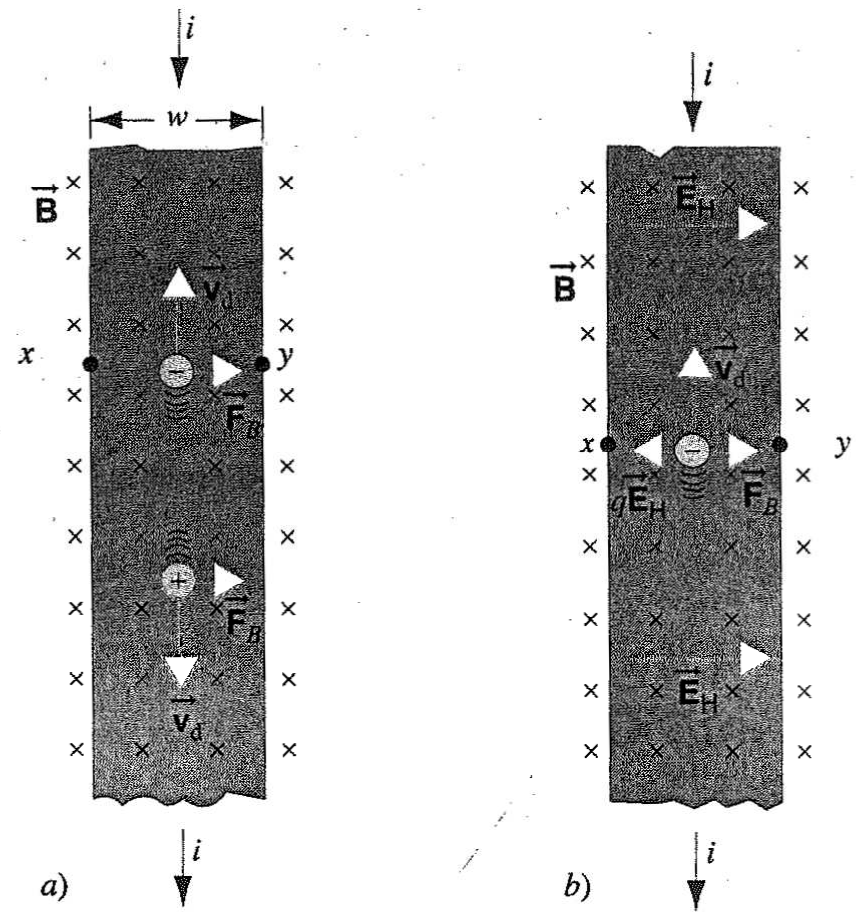


FIGURA 32-18. Una tira de cobre inmersa en un campo magnético \vec{B} transporta una corriente i . *a)* La situación poco después que el campo magnético ha sido activado y *b)* la situación en el equilibrio que aparece pronto. Las cargas negativas se acumulan en el lado derecho de la tira, dejando en la izquierda cargas positivas no compensadas. El punto x está en un potencial más alto que el punto y .

Tabla 32-2 Resultados del efecto Hall en algunos materiales

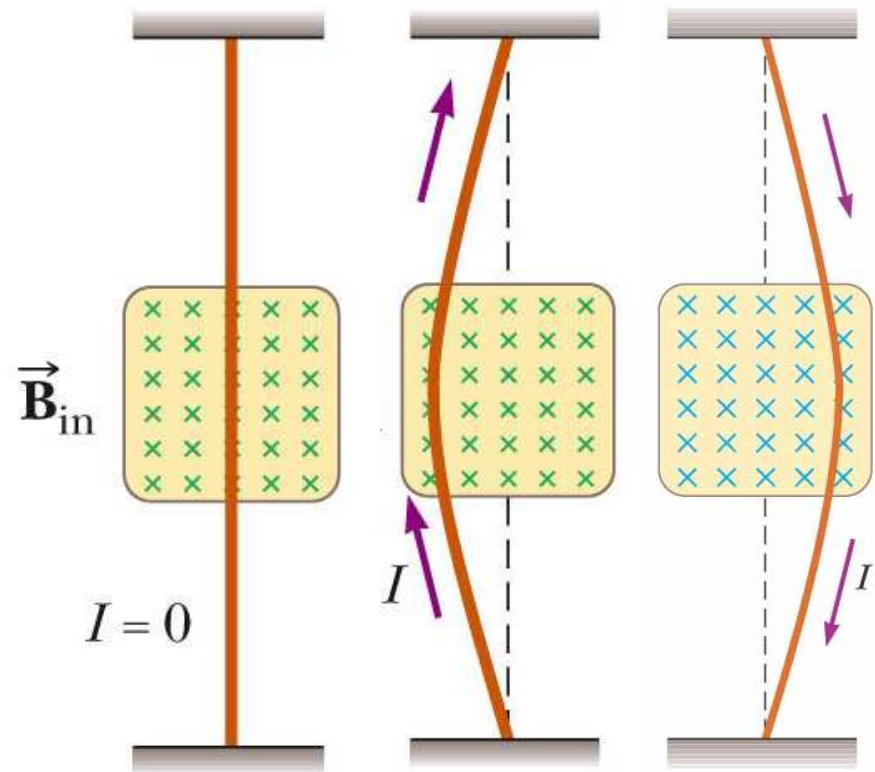
<i>Material</i>	$n(10^{28}/\text{m}^3)$	<i>Signo de</i> ΔV_H	<i>Número</i> <i>por átomo^a</i>
Na	2.5	—	0.99
K	1.5	—	1.1
Cu	11	—	1.3
Ag	7.4	—	1.3
Al	21	—	3.5
Sb	0.31	—	0.09
Be	2.6	+	2.2
Zn	19	+	2.9
Si (puro)	1.5×10^{-12}	—	3×10^{-13}
Si (tipo <i>n</i> común)	10^{-7}	—	2×10^{-8}

^aNúmero de los portadores de carga por átomo del material, que se determina mediante el número por unidad de volumen y mediante la densidad y la masa molar del material.

Magnetic Force on a Current Carrying Conductor, a wire



- A force is exerted on a current-carrying wire placed in a magnetic field
 - The current is a collection of many charged particles in motion
- The direction of the force is given by the right-hand rule



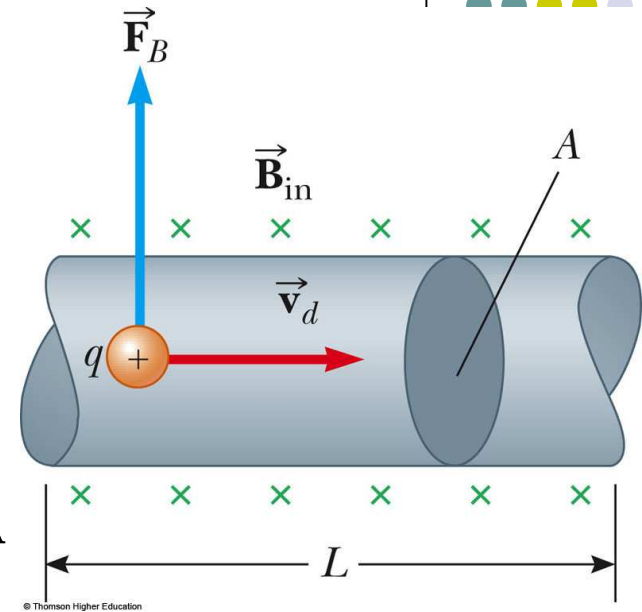
Force on a Wire, the formula



- The magnetic force is exerted on each moving charge in the wire
 - $\vec{F} = q\vec{v}_d \times \vec{B}$
- The total force is the product of the force on one charge and the number of charges in the wire
 - $\vec{F} = (q\vec{v}_d \times \vec{B})nAL = qnA\vec{v}_dL \times \vec{B} \quad \because I = nq\vec{v}_d \cdot \vec{A}$
- In terms of the current, this becomes

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

- I is the current
- \vec{L} is a vector that points in the direction of the current
 - Its magnitude is the length L of the segment



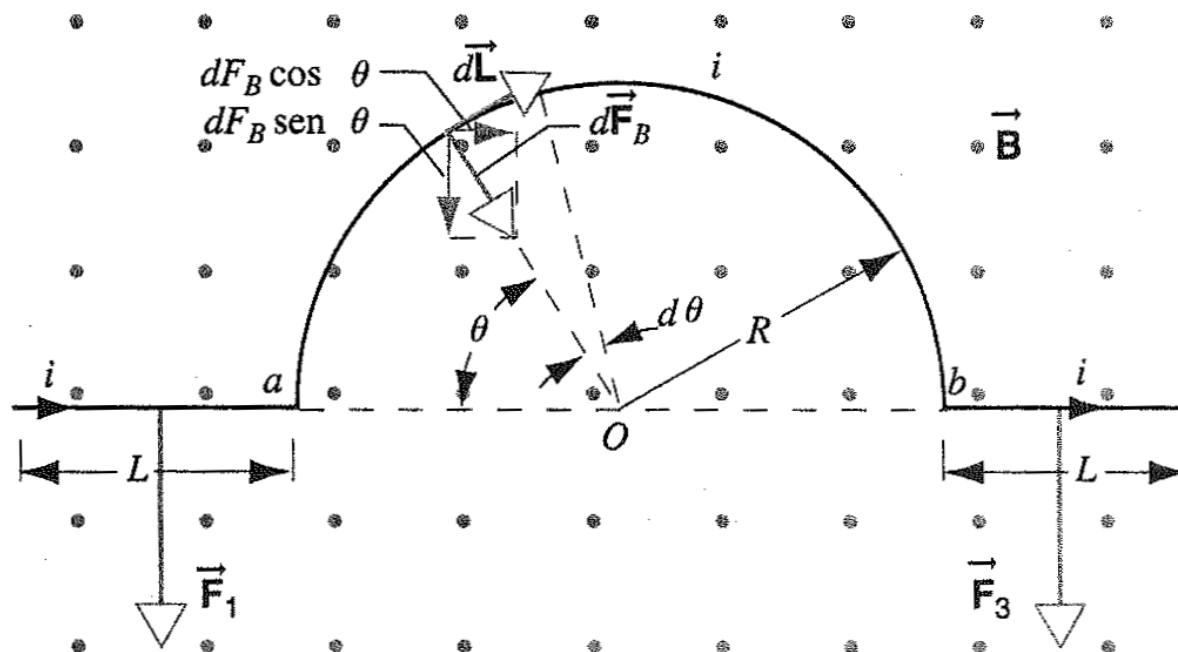


FIGURA 32-24. Problema resuelto 32-5. Un segmento de alambre que transporta una corriente i está inmerso en un campo magnético. La fuerza resultante en el alambre se dirige hacia abajo.

Momento magnético

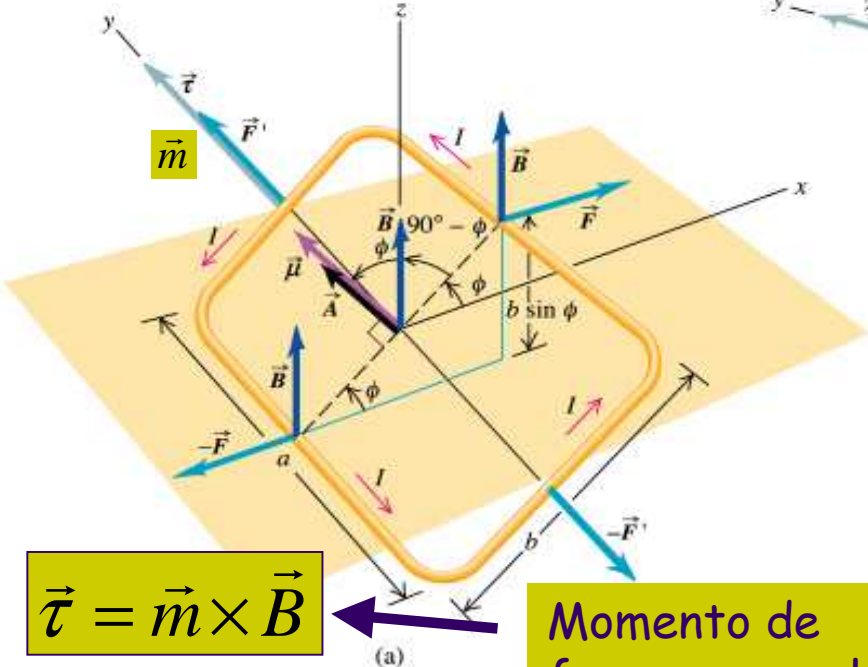


- Fuerza y momento magnético sobre una espira

Momento magnético de la espira

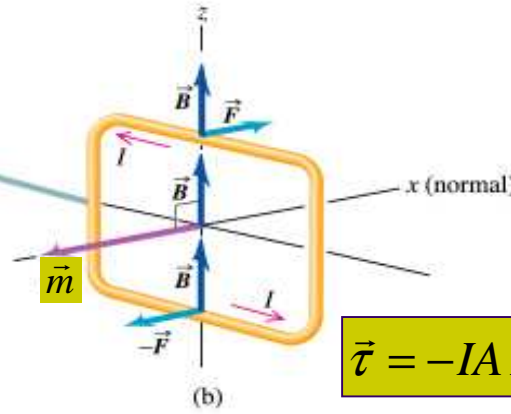
$$\vec{m} = I\vec{A}$$

$$\vec{F}_{total} = \vec{F} + \vec{F}' - \vec{F} - \vec{F}' = 0$$

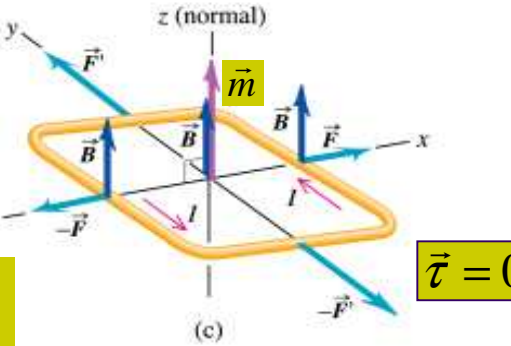


$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}$$

Momento de fuerzas no nulo



$$\vec{\tau} = -IAB \hat{j}$$

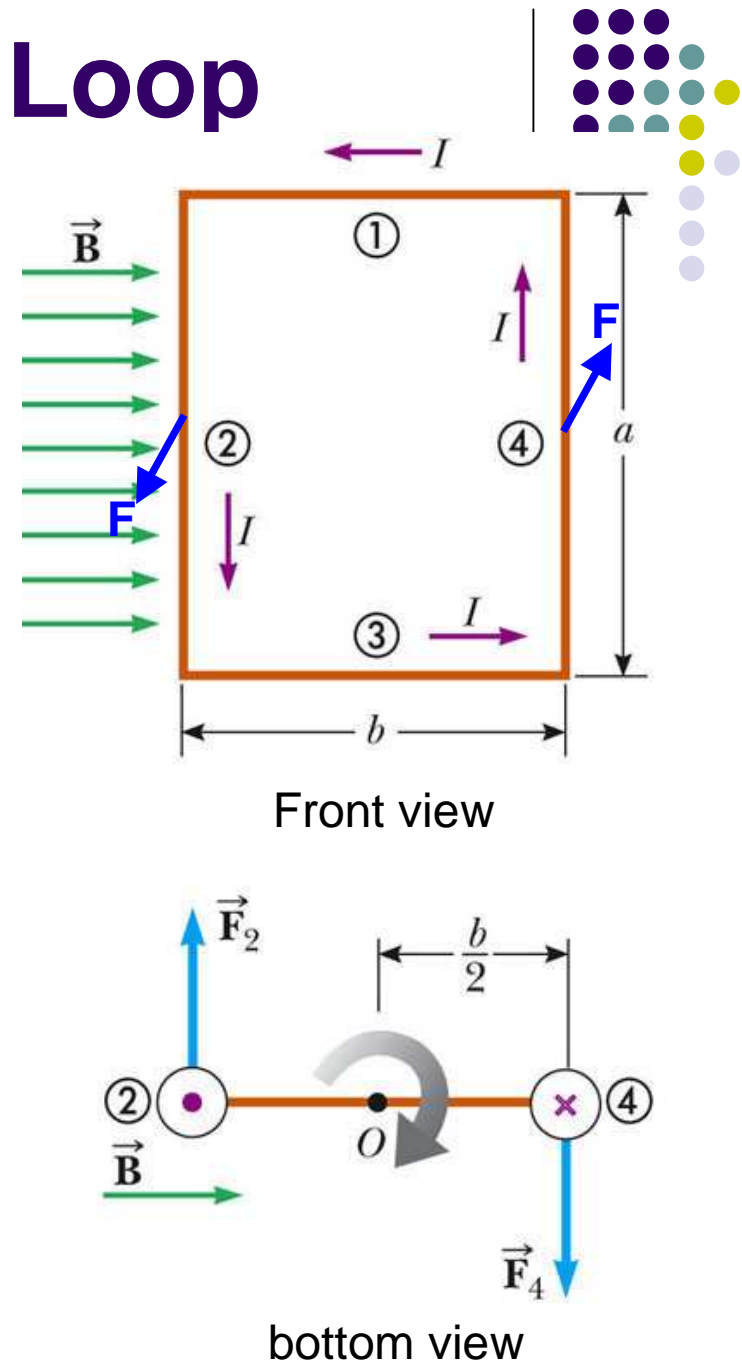


$$\vec{\tau} = 0$$

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Torque on a Current Loop

- The rectangular loop carries a current I in a uniform magnetic field
- No magnetic force acts on sides 1 & 3.
- The magnitude of the magnetic force on sides 2 & 4 is
 - $F_2 = F_4 = I a B$
- The direction of F_2 is out of the page; The direction of F_4 is into the page
- The forces are equal and in opposite directions, but not along the same line of action \rightarrow rotation.
- The forces produce a torque around point O (bottom view)



Torque on a Current Loop, Equation



- The maximum torque is found by:

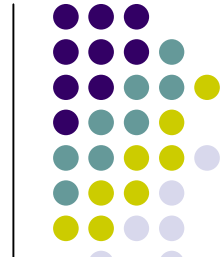
$$\tau_{max} = F_2 \frac{b}{2} + F_4 \frac{b}{2} = (I a B) \frac{b}{2} + (I a B) \frac{b}{2} = I a b B$$

- The area enclosed by the loop is $A=ab$, so

$$\tau_{max} = I A B$$

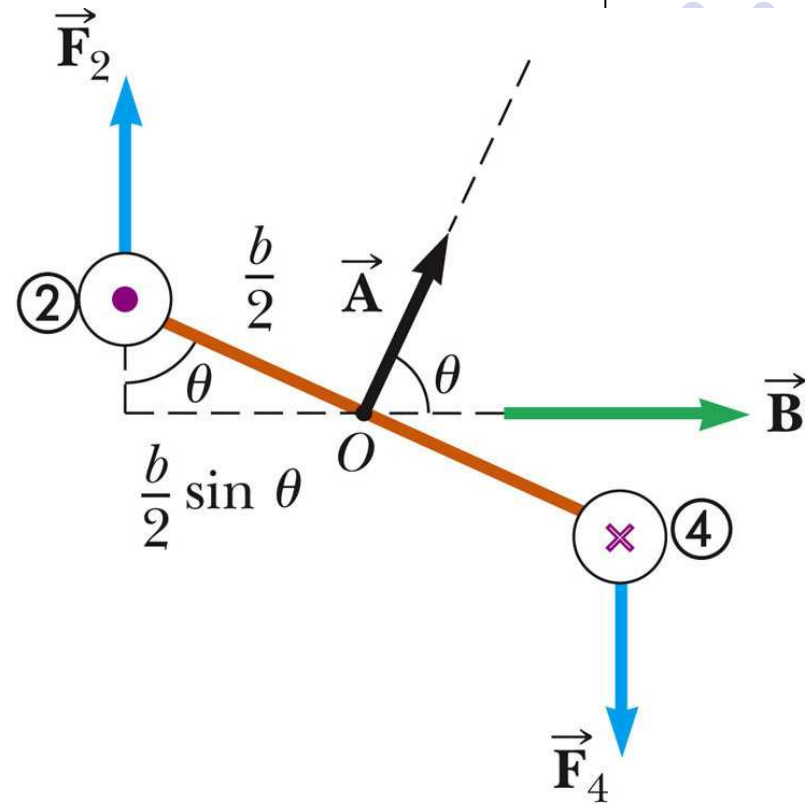
- This maximum value occurs only when the field is parallel to the plane of the loop

Torque on a Current Loop, General



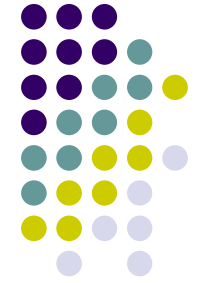
- Assume the magnetic field makes an angle of $\theta < 90^\circ$ with a line perpendicular to the plane of the loop (the direction of a loop, next slide)
- The net torque about point O will be $\tau = IAB \sin \theta$
- When the direction of the loop area is defined, the torque can be expressed in its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

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



© Thomson Higher Education

Momento dipolar magnético de una espira de corriente



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

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

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

