CAMPO MAGNÉTICO E INDUCCIÓN

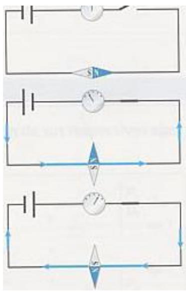
INTRODUCCIÓN.

Los fenómenos magnéticos se conocen desde la antigüedad. Así, en la Grecia clásica ya se conocían algunas sustancias como la magnetita (Fe_3O_4) que podían atraer pequeños trozos de hierro. A tales sustancias se les denominó imanes naturales; los imanes artificiales son aquellas sustancias (acero, hierro, níquel, etc) que tienen propiedades magnéticas si se las frota con imanes naturales. Ya se trate de uno u otro tipo, todos los imanes presentan las siguientes propiedades:

- Presentan la máxima atracción o repulsión en los extremos o *polos magnéticos*.
- Existe una zona neutra que no ejerce ningún tipo de interacción (generalmente, el centro del imán).
- Los polos se conocen con los nombres de polo norte (N) y polo sur (S), representados con los colores azul y rojo respectivamente, por semejanza con los polos norte y sur del planeta Tierra.
- Los polos no se pueden separar, es decir, por pequeño que sea, un imán presentará siempre dos polos (no existen los monopolos magnéticos).
- Los polos del mismo nombre se repelen y los de distinto nombre se atraen.

El magnetismo comenzó a ser estudiado de forma rigurosa a finales del siglo XVIII y principios del XIX. Así, el físico danés Hans Christian **Oersted** realizo en el año 1819 un experimento para estudiar los efectos de las corrientes eléctricas sobre los imanes.

Coloco una aguja imantada paralelamente a un conductor; observó entonces que la aguja se desviaba de su posición inicial cuando por el conductor circulaba una corriente eléctrica, tendiendo a colocarse perpendicularmente a la dirección del conductor. El sentido de la desviación cambiaba si también lo hacia el sentido de la corriente. De dicho experimento dedujo que la corriente eléctrica – cargas en movimiento – produce fuerzas magnéticas. En 1831, Michael **Faraday** observó el efecto reciproco: aproximando y alejando un imán a un conductor, entonces en éste se origina una corriente eléctrica. Ambos descubrimientos supusieron el inicio de una nueva rama de la Física llamada ***Electromagnetismo*.**



Sabemos que los electrones que forman parte de los átomos giran alrededor del núcleo y sobre sí mismos; estos movimientos dan lugar a campos magnéticos, de manera que todos los electrones de un átomo pueden ocasionar que el átomo posea, en conjunto, un campo magnético resultante y que se comporte como un pequeño imán. A los imanes atómicos se les llama dipolos magnéticos, y son los responsables del magnetismo natural de muchas sustancias. Ahora bien, en ausencia de un imán externo todos estos dipolos magnéticos suelen estar orientados al azar, de manera que sus efectos se compensan y la sustancia no tendrá propiedades magnéticas.

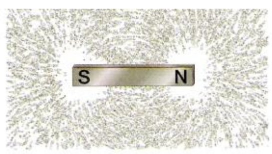
CAMPO MAGNÉTICO

DEFINICIÓN Y UNIDADES. LÍNEAS DE FUERZA. CARÁCTER RELATIVO

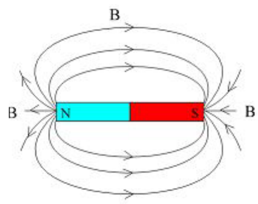
Del mismo modo que una masa crea un campo gravitatorio o una carga eléctrica crea un campo eléctrico, **una carga en movimiento -corriente eléctrica -** crea un campo magnético en el espacio circundante. El valor de dicho campo viene determinado por el vector $\vec{B}$, llamado vector inducción magnética, vector densidad de flujo magnético o, simplemente, vector campo magnético. Así, decimos que existe un campo magnético $\vec{B}$ en un punto, si una carga "q" que se mueve con una velocidad $\vec{v}$ por ese punto es desviada lateralmente debido a una fuerza cuyo valor depende del valor de la velocidad.

Análogamente a los campos gravitatorio y eléctrico, el campo magnético puede representarse mediante líneas de fuerza o de inducción, cuya dirección es tangente al vector inducción magnética en cada punto.

Las líneas de fuerza correspondientes al campo magnético originado por un imán salen del polo N y entran por el polo S (en el interior del imán su sentido es contrario); se tratan, por tanto, de **líneas cerradas**, lo cual es consecuencia del carácter inseparable de los dos polos del imán (a diferencia de lo que sucedía con los campos

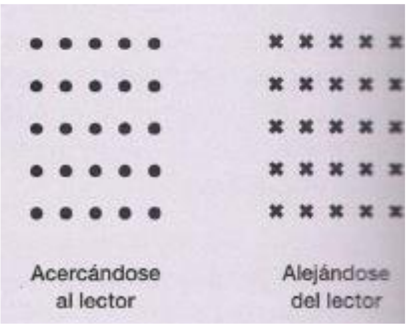


Líneas de fuerza del campo magnético creado por un imán recto.



gravitatorio y eléctrico) y del carácter no conservativo del campo magnético, como veremos más adelante.
El campo magnético se puede visualizar espolvoreando limaduras de hierro sobre un papel situado sobre un imán u observando la orientación adquirida por una aguja imantada situada en sus proximidades.

La unidad del campo magnético ***B*** en el S.I. es el **tesla (T)**, que se define como el valor de un campo magnético uniforme que ejerce una fuerza de 1 N sobre una carga de 1 C cuando se mueve con una velocidad de 1 m/s en el interior del campo y perpendicularmente a las líneas de inducción. Dicha unidad debe su nombre al científico yugoslavo Nikola Tesla. Se trata de una unidad muy grande (un imán convencional puede alcanzar valores de hasta 0´5 T), por lo que suelen utilizarse submúltiplos. Uno de ellos es el **gauss (G)**, correspondiente al sistema CGS (No del SI), cuya equivalencia con el tesla es la siguiente: 1 T = 10^4 G



Representación en el plano:
Si se crea un campo magnético perpendicular al plano del papel y dirigido hacia abajo, hacia el fondo, el campo magnético se representa por aspas)-
Si sale del papel y se dirige hacia nosotros se representa por puntos.
Mencionaremos finalmente que el campo magnético es relativo, es decir, depende del sistema de referencia escogido. Así, por ejemplo, si el sistema de referencia se encuentra justamente en la carga móvil, ésta no originara un campo magnético al encontrarse en reposo con respecto a dicho sistema de referencia.

FUERZAS MAGNÉTICAS SOBRE CARGAS EN MOVIMIENTO.

FUERZA DE UN CAMPO MAGNÉTICO SOBRE UNA CARGA MÓVIL: FUERZA DE LORENTZ.

Fue el físico holandés **H.A. Lorentz** quien estudio de forma cuantitativa el efecto de un campo magnético sobre una carga en movimiento. Sus observaciones fueron las siguientes:

- Si la carga se mueve en la misma dirección del campo, éste no ejerce acción alguna sobre ella.
- Para cualquier otra dirección, la dirección de la fuerza ejercida sobre la carga es perpendicular al plano determinado por los vectores inducción magnética y velocidad, y su sentido viene dado por la regla del sacacorchos al “llevar” el vector velocidad sobre el vector inducción magnética por el camino más corto.
- El módulo o valor de esta fuerza es directamente proporcional a:
  - El valor de la carga “q” que se mueve.
  - El valor de la velocidad con que “q” se mueve.
  - El modulo o valor de $\vec{B}$ en cada punto.
  - El seno del ángulo que forman las direcciones de los vectores $\vec{v}$ y $\vec{B}$.

Todas las observaciones anteriores quedan englobadas en la siguiente expresión matemática (producto vectorial):

$$\boxed{\vec{F} = q\,\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow F = q \cdot v \cdot B \cdot \operatorname{sen}\varphi}$$

De la expresión anterior deducimos que:

- F será máxima si $\vec{v}$ y $\vec{B}$ son perpendiculares, y nula si ambos vectores tienen la misma dirección.
- La fuerza magnética sobre una carga positiva tiene sentido opuesto al de la fuerza que actúa sobre una carga negativa que se mueva de la misma manera.

Velocidad con que se desplaza la carga

Valor del campo magnético

Fuerza ejercida sobre la carga por el campo magnético (fuerza de Lorentz)

$$\vec{F} = q\left(\vec{v} \wedge \vec{B}\right)$$

Valor de la carga

Producto vectorial

El producto vectorial de dos vectores ***es un vector*** definido de la forma siguiente:

Módulo: producto del módulo de ambos vectores por el seno del ángulo que forman.

Dirección: perpendicular al plano definido por ambos vectores.

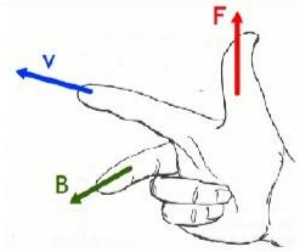
Sentido: el del sacacorchos que gira del primen al segundo vector por el camino más corto.

El módulo de la fuerza viene dado por: $F = q\ v\ B\ \text{sen}\ \alpha$, donde α es el ángulo formado por el vector campo magnético y la velocidad de la carga. Esto implica:

- Que si la carga se desplaza en la misma dirección del campo no experimentará fuerza alguna.
- Que la fuerza adquirirá su máximo valor cuando la carga se mueva en dirección perpendicular al campo (F = q v B)

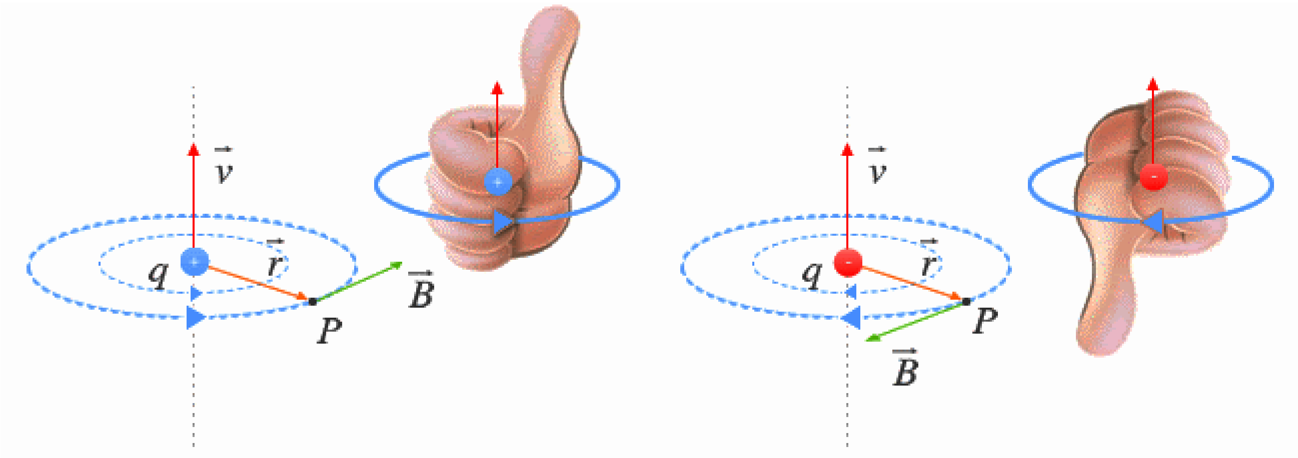
El vector fuerza, por tanto, es perpendicular al plano determinado por los vectores velocidad y campo magnético.

Su sentido es de un sacacorchos que gira de v a B por el camino más corto, si la carga es positiva. Si la carga es negativa, su sentido es opuesto.



Regla de la mano derecha

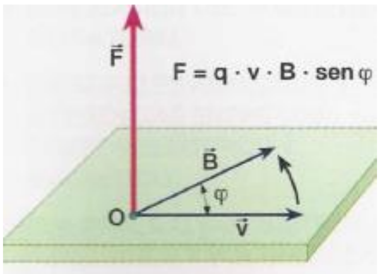
Son muy importantes las figuras siguientes:

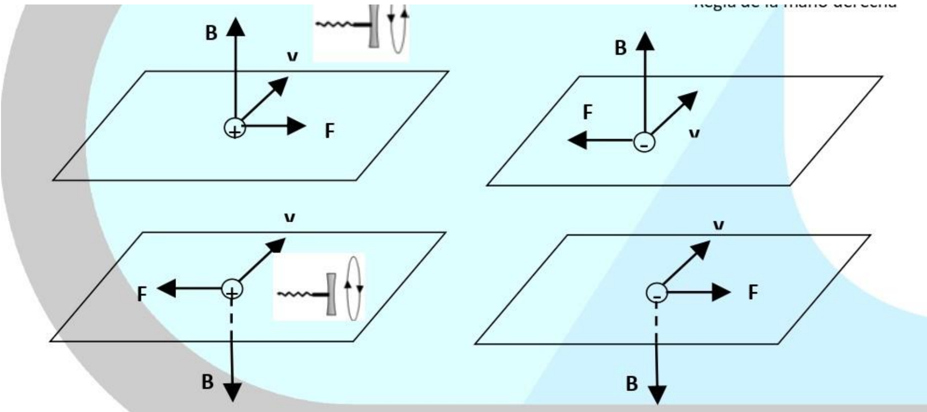


Sentido del campo magnético creado por una carga puntual

Si sitúas el pulgar de la mano derecha sobre la dirección del vector velocidad podrás determinar el sentido del campo [illegible] de la siguiente forma:

Si la carga en movimiento es positiva orienta el pulgar en el mismo sentido que el vector velocidad y sentido contrario si la carga es negativa, el resto de dedos determinará el sentido del vector campo magnético. Esto se conoce como la **regla de la mano derecha**.

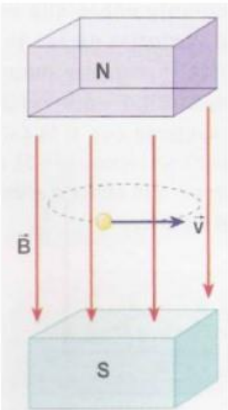




Dirección y sentido del vector fuerza para una carga ***positiva*** que se desplaza con velocidad v

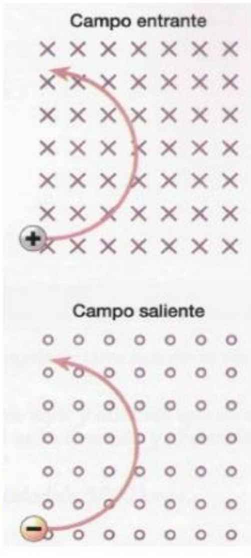
Dirección y sentido del vector fuerza para una carga ***negativa*** que se desplaza con velocidad v

MUY IMPORTANTE



- Una partícula cargada que se mueva perpendicularmente a un campo magnético uniforme describirá una trayectoria circular. En efecto, si $\vec{v}$ es perpendicular a $\vec{B}$, entonces la fuerza que experimentará la partícula será perpendicular a ambos vectores; dicha fuerza es la fuerza normal, radial o centrípeta, la cual curvará la trayectoria de la partícula haciéndole describir un m.c.u. de radio R (aunque *no se modificará el módulo de su velocidad*). Podemos calcular dicho radio aplicando la 2ª ley de Newton:

$$\Sigma \vec{F} = m \cdot \vec{a} \Rightarrow q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R} \Rightarrow \boxed{R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} = \frac{p}{q \cdot B}}$$



Lógicamente, las partículas de mayor momento lineal (o cantidad de movimiento) describirán trayectorias de mayor radio. La velocidad angular y el período del m.c.u. que describirá la partícula en el interior del campo magnético uniforme vendrán dados por:

$$\boxed{\omega = \frac{v}{R} = \frac{q \cdot B}{m}} \qquad \boxed{T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{q\,B}}$$

Observar que la velocidad angular es independiente del valor de la velocidad y del radio de la trayectoria.

El sentido del movimiento circular descrito por la partícula dependerá del sentido del campo magnético y del signo de la carga eléctrica (ver figura a la derecha). Si la carga no se moviera perpendicularmente al campo, su trayectoria sería helicoidal.

Si una carga eléctrica se mueve en una región en la que existan simultáneamente un campo eléctrico $\vec{E}$ y otro magnético $\vec{B}$, la fuerza total actuante sobre ella se llama **fuerza de Lorentz**, y será la suma vectorial de las fuerzas eléctrica y magnética:

$$\boxed{\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)}$$

ALGUNOS PROBLEMAS RESUELTOS

1. Un electrón penetra en una región del espacio donde existe un campo magnético uniforme *B* con velocidad constante *v*. Contesta.
a) ¿Qué fuerza actúa sobre el electrón?
b) ¿Bajo qué condiciones el campo magnético no influye en su movimiento?

a) Sobre el electrón actúa la fuerza de Lorentz, cuyo módulo es igual al producto del campo magnético por la carga de la partícula y por la velocidad que lleva. Además, hay que multiplicar por el seno del ángulo que forman la velocidad y el campo magnético.

$$\boxed{\vec{F}=q\,\vec{v}\times\vec{B}\Rightarrow F=q\cdot v\cdot B\cdot \mathrm{sen}\,\varphi}$$

b) El campo magnético no influye en su movimiento cuando el producto vectorial de la velocidad por el campo magnético es cero, es decir, cuando ambos forman un ángulo de 0º: son paralelos.

2. Una partícula con carga *q* y velocidad *v* entra en un campo magnético perpendicular a la dirección de movimiento.
a) Analiza el trabajo realizado por la fuerza magnética y la variación de energía cinética de la partícula.
b) Si la partícula se moviese en dirección paralela al campo, ¿qué ocurriría ahora con el trabajo realizado por la fuerza magnética? ¿Y con la variación de energía cinética de la partícula? Explica las diferencias entre ambos casos.

a) Si el campo magnético es perpendicular a la dirección de movimiento, ejercerá sobre la partícula una fuerza llamada fuerza de Lorentz:

$$\boxed{\vec{F}=q\,\vec{v}\times\vec{B}\Rightarrow F=q\cdot v\cdot B\cdot \mathrm{sen}\,\varphi}$$

F_B = q v B sen90º = q v B
Como vemos en la expresión anterior, la fuerza es perpendicular a la velocidad de la partícula; en consecuencia, no se realiza trabajo porque el producto escalar de la fuerza por el desplazamiento es nulo al intervenir un ángulo de 90º en el producto escalar:
W = ***F.Δr*** = F.Δr.cos90º = 0
En consecuencia, como el trabajo es igual a la variación de energía cinética, no habrá variación en la energía cinética de la partícula. La partícula cambia de dirección, pero el módulo de su velocidad no varía.

b) Si la partícula se mueve en dirección paralela al campo, la fuerza de Lorentz será nula, y entonces tampoco habrá trabajo realizado, y tampoco habrá variación en la energía cinética de la partícula.
F_B = q v B sen0º = 0

3. En una región del espacio hay un campo magnético uniforme dirigido en el sentido negativo del eje X y dado por *B* = - 2.8.10^{-5} *i* T. Calcula la fuerza magnética que actúa sobre una partícula de carga *q* = 2.10^{-6} C que penetra en el seno del campo magnético con una velocidad *v* = 2.10^{4} *k* m/ s .

La fuerza de Lorentz ejercida sobre la partícula vendrá dada por:

$$\boxed{\vec{F}=q\,\vec{v}\times\vec{B}\Rightarrow F=q\cdot v\cdot B\cdot \mathrm{sen}\,\varphi}$$

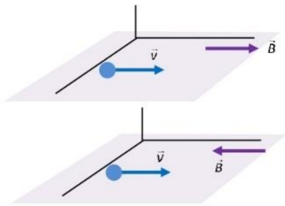
$\boldsymbol{F_B}$ = (2.10^{-6}) (2.10^{4} ***k***) (- 2.8.$\mathbf{10^{-5}}$ ***i***) = -1,12.10^{-6} *j* N

4. En una región del espacio existe un campo magnético constante perpendicular al plano del papel y sentido hacia dentro del mismo. Penetran por los extremos de la región donde hay campo magnético dos electrones con la misma velocidad y dirección, pero en sentidos contrarios, tal y como indica la figura.

a) Dibuja la fuerza magnética que actúa sobre cada electrón. Justifica y dibuja las trayectorias de los dos electrones e indica el sentido de giro.
b) Imagina que eliminamos este campo magnético y lo sustituimos por otro campo magnético. En este caso, los electrones no se desvían cuando entran en esta región. Dibuja cómo debe ser este nuevo campo magnético. Justifique la respuesta.
Nota: No es válida la respuesta *B* = 0 .

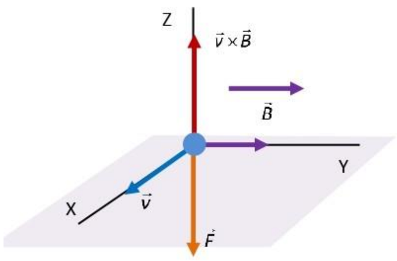
a) Respuesta gráfica.

La fuerza es perpendicular tanto al campo magnético como a la velocidad de cada electrón y viene dada por la fuerza de Lorentz. En la imagen para el electrón que penetra con velocidad hacia la derecha, la fuerza tendrá un sentido vertical y hacia abajo, pues se trata de una partícula con carga negativa. Por tanto, este electrón girará hacia abajo, en el sentido de las agujas del reloj.
Razonando de forma similar para el electrón que se mueve hacia la izquierda en la figura la fuerza tendrá sentido hacia arriba. Por tanto, este electrón girará hacia arriba, en el sentido de las agujas del reloj también.



b) Si en la región existe, en vez de este, otro campo magnético que no desvía los electrones, es porque este campo magnético es paralelo al movimiento de los electrones y entonces la fuerza de Lorentz es nula.
Es decir, el campo magnético debe estar contenido en el plano del papel y sus líneas de campo, paralelas al movimiento de los electrones, bien hacia la derecha o hacia la izquierda.
La fuerza de Lorentz ejercida sobre la partícula será F = 0 (el ángulo será de 0º o de 180º)

5. En una región del espacio existe un campo magnético uniforme *B* en la dirección positiva del eje Y. En esta región entra un electrón que se mueve con velocidad *v* en la dirección positiva del eje X. Indica cuál será la trayectoria que seguirá el electrón en esa región.



El producto vectorial de la velocidad por el campo magnético tiene dirección vertical y sentido hacia abajo, pues el electrón tiene carga negativa. Por tanto, el electrón sufrirá una fuerza vertical y hacia abajo, y se moverá en el plano XZ siguiendo una curva.
$\boldsymbol{F} = q\, \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} = (-q)\, \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} = (-q)\, v\, B\, (\boldsymbol{i} \times \boldsymbol{j}) = = -q\, v \times B\, \boldsymbol{k}$

6. Un protón penetra con una velocidad *v* en el seno de un campo magnético uniforme *B*. Explica la trayectoria que seguirá el protón:
a) Si la velocidad del protón es paralela a *B*.
b) Si la velocidad del protón es perpendicular a *B*.

a) Según la expresión de la fuerza de Lorentz, si la velocidad es paralela al campo magnético el ángulo que forman es 0^o, por lo que la fuerza es nula. Por tanto, si la velocidad del protón es paralela al campo magnético, el protón no sufrirá fuerza alguna y seguirá moviéndose como lo hacía antes, con movimiento rectilíneo.

b) Si la velocidad es perpendicular al campo magnético, existirá una fuerza de Lorentz perpendicular a la velocidad del protón y al campo magnético, de modo que la trayectoria del protón se curvará.

7. En una región del espacio existe un campo magnético uniforme de inducción 0,8 mT en el sentido positivo del eje OX. Penetra en el campo un electrón que se mueve en dirección OY y con una energía cinética de 8.10^{-18} J.
a) Calcula la velocidad con la que penetra el electrón en el campo magnético.
b) Halla el módulo de la fuerza a la que está sometido el electrón.
c) ¿Qué tipo de movimiento tiene el electrón?
d) Determina el radio de la trayectoria que describe.
Datos: *m*e = $9{,}11.10^{-31}$ kg; *q*e = $1{,}602.10^{-19}$ C.

a) La velocidad del electrón se puede calcular a partir de su energía cinética.

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_C}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8 \cdot 10^{-18}\ \text{J}}{9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}}} = 4{,}19 \cdot 10^6\ \text{m/s}$$

b) El módulo de la fuerza a la que está sometido el electrón viene dado por la expresión de la fuerza de Lorentz:

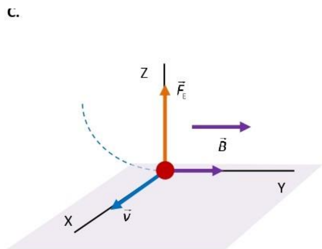
$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} = 0 \rightarrow |\vec{F}| = |q| \cdot v \cdot B = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 4{,}19 \cdot 10^6\ \text{m/s} \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-3}\ \text{T} = 5{,}37 \cdot 10^{-16}\ \text{N}$$

c) La fuerza es perpendicular al movimiento del electrón, por lo que la trayectoria del electrón se curva. El módulo de su velocidad no varía, pero sí su dirección. Por tanto, el electrón tendrá un movimiento circular.

d) Podemos identificar la fuerza de Lorentz con la fuerza centrípeta que hace girar al electrón y así calcular el radio de la trayectoria que sigue el electrón.

$$F_C = F_B \rightarrow \frac{m \cdot v^2}{r} = |q| \cdot v \cdot B \rightarrow r = \frac{m \cdot v^{\cancel{2}}}{|q| \cdot \cancel{v} \cdot B} = \frac{9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \cdot 4{,}19 \cdot 10^6\ \text{m/s}}{1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-3}\ \text{T}} = 2{,}978 \cdot 10^{-2}\ \text{m} = 2{,}978\ \text{cm}$$

8. Un protón penetra en el seno de un campo magnético *B* con velocidad *v* perpendicular al campo. El protón describe una trayectoria circular con un periodo de $2 \cdot 10^{-6}$ s.
a) Dibuja un esquema con los vectores *v* , *B* y *F* en un punto de la trayectoria.
b) Calcula el valor del campo magnético.
c) Si introdujéramos en el campo un electrón con la misma velocidad *v* , ¿cómo cambiaría la trayectoria?
Datos: m_p = 1,67.10^{-27} kg; m_e = 9,11.10^{-31} kg; q_p = 1,602.10^{-19} C.



a) Respuesta gráfica. El protón seguirá una trayectoria circular en un plano perpendicular al campo magnético.

b) La fuerza magnética es la fuerza centrípeta que obliga al protón a describir una órbita circular. Por tanto, podemos escribir (en módulo):

$F_C = F_B$ $\quad$ $m_p \cdot v^2 / r = q\ v\ B$ $\quad$ $m_p \cdot v / r = q\ B$

Teniendo en cuenta que la velocidad lineal es igual al producto de la velocidad angular por el radio de la trayectoria: $v = \omega\ r$ y que la velocidad angular, a su vez, está relacionada con el periodo: $\omega = 2\pi / T$

Obtenemos:

$$\frac{m_p \cdot \left(\frac{2\pi \cdot r}{T}\right)}{r} = |q| \cdot B \rightarrow \frac{m_p \cdot 2\pi \cdot \cancel{r}}{\cancel{r} \cdot T} = |q| \cdot B \rightarrow B = \frac{2\pi \cdot m_p}{|q| \cdot T} = \frac{2\pi \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}}{1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 2 \cdot 10^{-6}\ \text{s}} = 3{,}27 \cdot 10^{-2}\ \text{T}$$

c) Si introducimos un electrón con la misma velocidad el sentido del giro será opuesto, puesto que tiene carga negativa. Además, como la masa del electrón es bastante menor que la del protón, el periodo de la órbita descrita por el electrón será diferente del periodo del protón. En el caso del electrón, el periodo se puede calcular así:

$$F_C = F_B \rightarrow \frac{m_e \cdot v^{\cancel{2}}}{r} = |q| \cdot \cancel{v} \cdot B \rightarrow \frac{m_e \cdot v}{r} = |q| \cdot B \rightarrow \frac{m_e \cdot \left(\frac{2\pi \cdot r}{T}\right)}{r} = |q| \cdot B \rightarrow \frac{m_e \cdot 2\pi \cdot \cancel{r}}{\cancel{r} \cdot T} = |q| \cdot B \rightarrow$$

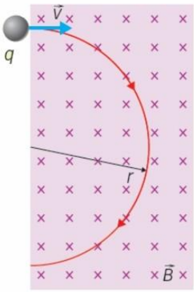
$$\rightarrow T = \frac{2\pi \cdot m_e}{|q| \cdot B} = \frac{2\pi \cdot 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}}{1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 3{,}27 \cdot 10^{-2}\ \text{T}} = 1{,}09 \cdot 10^{-9}\ \text{s}$$

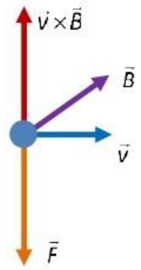
c) Si introducimos un electrón con la misma velocidad, el sentido del giro será opuesto, puesto que tiene carga negativa. Además, como la masa del electrón es bastante menor que la del protón, el periodo de la órbita descrita por el electrón será diferente del periodo del protón. En el caso del electrón, el periodo se puede calcular así:

$$F_C = F_B \rightarrow \frac{m_e \cdot v^{\cancel{2}}}{r} = |q| \cdot \cancel{v} \cdot B \rightarrow \frac{m_e \cdot v}{r} = |q| \cdot B \rightarrow \frac{m_e \cdot \left(\frac{2\pi \cdot r}{T}\right)}{r} = |q| \cdot B \rightarrow \frac{m_e \cdot 2\pi \cdot \cancel{r}}{\cancel{r} \cdot T} = |q| \cdot B \rightarrow$$

$$\rightarrow T = \frac{2\pi \cdot m_e}{|q| \cdot B} = \frac{2\pi \cdot 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}}{1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 3{,}27 \cdot 10^{-2}\ \text{T}} = 1{,}09 \cdot 10^{-9}\ \text{s}$$

9. En una región del espacio donde existe un campo magnético uniforme en dirección perpendicular al plano del dibujo se introduce una carga eléctrica, con velocidad *v* constante. Determina cuál debe ser el signo de la carga eléctrica para que esta se desvíe en el campo siguiendo la trayectoria indicada en la figura. Justifica la respuesta.





La carga sufre una fuerza cuyo sentido está determinado por la expresión de la Ley de Lorentz.
Si aplicamos la regla de la mano derecha al producto vectorial de los vectores velocidad y campo magnético, obtenemos un vector perpendicular a ambos y con sentido hacia arriba. Como la trayectoria se curva hacia abajo, eso implica que la carga tiene que ser negativa para que el sentido de la fuerza sea hacia abajo y produzca esta trayectoria.

10. Una carga negativa penetra en una región con un campo eléctrico y otro magnético sin desviarse. Si la partícula fuera positiva, ¿se desviaría?, ¿y si lo hiciera, hacia dónde se desviaría? Justifica la respuesta.

Si la partícula con carga negativa no se desvía, es porque la fuerza eléctrica y la fuerza magnética se compensan.
Por ejemplo, si la partícula se mueve horizontalmente hacia la derecha y el campo eléctrico es vertical hacia abajo, la fuerza eléctrica es vertical y hacia arriba (la carga es negativa) y la fuerza magnética debe ser vertical y hacia abajo. Entonces, el campo magnético será perpendicular al plano que definen la velocidad y el campo eléctrico, tal que:

$\boldsymbol{F_E} + \boldsymbol{F_M} = 0 \quad \rightarrow \quad F_E = F_M \quad \rightarrow \quad q \cdot E = q \cdot v \times B \quad \rightarrow \quad \boldsymbol{E} = \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$

En nuestro caso, para que esto ocurra el campo magnético debe entrar en el papel.
Si la carga es un protón el resultado no varía, porque en este caso la fuerza eléctrica estaría dirigida hacia abajo, en el sentido del campo eléctrico, y la fuerza magnética estaría dirigida hacia arriba. Igual que en el caso anterior, la fuerza neta sería nula.

11. Un ion de potasio, K^+ penetra en un campo magnético uniforme de intensidad $\boldsymbol{B} = 0{,}2\ \mathbf{k}$ T con una velocidad $\boldsymbol{v} = 16 \cdot 10^4\ \mathbf{i}$ m/ s. Si describe una trayectoria circular de 65 cm de diámetro, calcula:
a) La masa de la partícula.
b) El módulo, dirección y sentido del campo eléctrico que habría que aplicar en esa región para que el ion no se desvíe.
Dato: $q_e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C.

a) Si describe una trayectoria circular, es porque sufre una fuerza de Lorentz donde podemos identificar dicha fuerza con la fuerza centrípeta. Por tanto, podemos escribir:

$$F_C = F_{\text{Lorentz}} \rightarrow \frac{m \cdot v^{\cancel{2}}}{r} = |q| \cdot \cancel{v} \cdot B \rightarrow \frac{m \cdot v}{r} = |q| \cdot B \rightarrow m = \frac{|q| \cdot B \cdot r}{v} = \frac{1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 0{,}2\ \text{T} \cdot 0{,}65\ \text{m}}{16 \cdot 10^4\ \text{m/s}} = 1{,}3 \cdot 10^{-25}\ \text{kg}$$

b) Para que el ion no se desvíe la fuerza magnética debe ser del mismo módulo y dirección que la fuerza eléctrica, pero de sentido opuesto. Es decir:

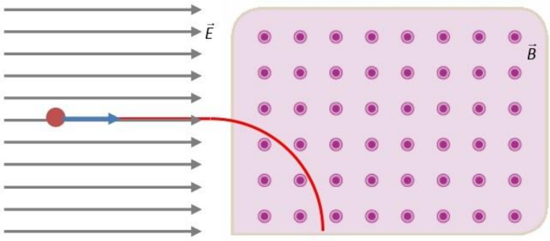
$$\vec{F}_E + \vec{F}_M = 0 \rightarrow \vec{F}_E = -\vec{F}_M \rightarrow \cancel{q} \cdot \vec{E} = -\cancel{q} \cdot \vec{v} \times \vec{B} \rightarrow \vec{E} = -\vec{v} \times \vec{B} = -16 \cdot 10^4\ \vec{i}\ \text{m/s} \times 0{,}2\ \vec{k}\ \text{T} = 32\,000\ \vec{j}\ \text{N/C}$$

El campo eléctrico debe ser perpendicular tanto a la velocidad como al campo magnético, y su sentido debe ser el opuesto al que indica el producto vectorial de la velocidad por el campo magnético.

12. Una partícula α en reposo es acelerada por una diferencia de potencial de 2500 V. A continuación, se introduce en un campo magnético de 125 mT perpendicular a su velocidad.
a) Dibuja un esquema de la trayectoria de la partícula y calcula la velocidad con la que penetra en el campo magnético.

b) Calcula el radio de la trayectoria.
Datos: $m_\alpha = 6{,}7.10^{-27}$ kg; $q_\alpha = 3{,}2.10^{-19}$ C.

a) Un esquema de la situación presentada sería el siguiente. Si el campo sale del papel:



En la primera parte la partícula es acelerada debido a la existencia de un campo eléctrico. La diferencia de potencial es de 2500 V. Al principio, la partícula solo tiene energía potencial debido a esta diferencia de potencial, al final de la zona donde está el campo eléctrico, solo posee energía cinética. Por tanto, aplicando el principio de conservación de la energía en la zona del campo eléctrico podemos calcular la velocidad que adquiere:

$$E_P = E_C \rightarrow q_\alpha \cdot V = \frac{1}{2} \cdot m_\alpha \cdot v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot q_\alpha \cdot V}{m_\alpha}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3{,}2 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 2500\ \text{V}}{6{,}7 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}}} = 4{,}89 \cdot 10^5\ \text{m/s}$$

Esta es la velocidad con la que penetra en la región donde existe el campo magnético.

b) La trayectoria se curva porque aparece una fuerza de Lorentz dirigida hacia abajo, perpendicular tanto a la velocidad como al campo magnético. Esta fuerza se puede identificar con la fuerza centrípeta y de aquí deducir el radio de la trayectoria:

$$F_C = F_{\text{Lorentz}} \rightarrow \frac{m \cdot v^2}{r} = |q| \cdot v \cdot B \rightarrow r = \frac{m \cdot v^{\cancel{2}}}{|q| \cdot \cancel{v} \cdot B} = \frac{6{,}7 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} \cdot 4{,}89 \cdot 10^5\ \text{m/s}}{3{,}2 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 125 \cdot 10^{-3}\ \text{T}} = 0{,}082\ \text{m} = 8{,}2\ \text{cm}$$