8 ELECTROMAGNETISMO

8.1. LOS IMANES

1. En la actualidad vivimos rodeados de imanes. Cita tres lugares, al menos, donde existan imanes.

El uso de imanes es muy frecuente en aparatos de uso cotidiano. Cualquier electrodoméstico (lavadora, batidora, secador de pelo, etc.) lleva imanes incorporados en su motor.

Los imanes aparecen, además, en todo tipo de aparatos electrónicos: ordenadores personales, teléfonos o altavoces de equipos musicales, por citar algunas de las aplicaciones más comunes que se les dan.

2. Consigue un par de imanes y algunas limaduras de hierro. Analiza cómo son las líneas de fuerza cuando los dos imanes se aproximan por el mismo polo y cuando se aproximan por polos diferentes. Utiliza una cartulina, situada sobre los imanes, para espolvorear sobre ella las limaduras de hierro. Debes obtener unos campos magnéticos similares a los que se muestran en esta página.

Se trata de una sencilla propuesta de actividad práctica que se recomienda que realicen los alumnos y las alumnas de forma autónoma.

8.2. LA EXPERIENCIA DE OERSTED

1. Indica cómo podemos fabricar un imán permanente.

Para fabricar un imán, tomamos una barra de acero o de hierro dulce y, alrededor de ella, arrollamos un cable conductor. A los terminales del cable conectamos una pila y dejamos que circule corriente. El paso de corriente por el cable conductor crea un campo magnético, que magnetiza al acero o al hierro dulce, obteniendo, de ese modo, un imán temporal o uno permanente.

2. La mayor parte de los imanes pierden sus propiedades magnéticas al calentarlos. Emite una hipótesis que explique ese fenómeno.

Las propiedades magnéticas de los imanes naturales se interpretan suponiendo que el imán puede dividirse en pequeñas regiones, denominadas dominios magnéticos, en las que el movimiento de los electrones (la orientación de sus espines) produce pequeños campos magnéticos.

Al calentar un imán, comunicamos energía al material con el que está fabricado, provocando la desalineación de los dominios magnéticos, lo que conlleva la pérdida de propiedades magnéticas.

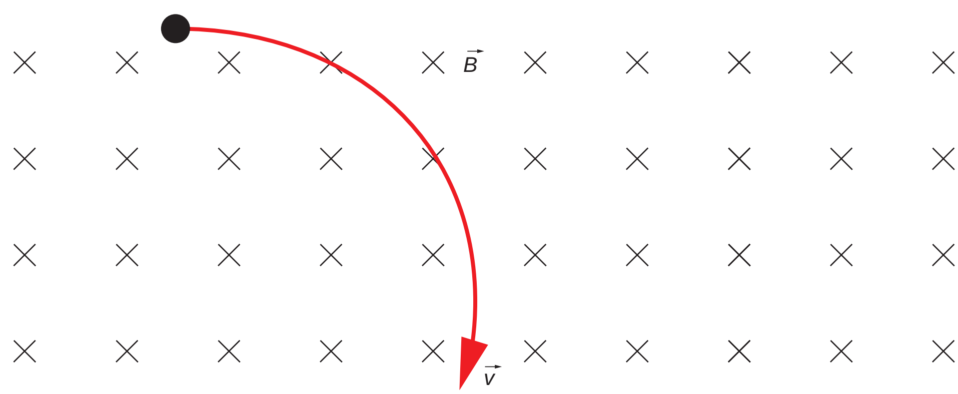
3. **Analiza los distintos elementos que forman parte de un ordenador personal e indica en qué dispositivos son necesarios imanes para su funcionamiento. Indica también, si lo sabes, el uso que se da a dichos imanes.**

Muchos de los componentes que posee un ordenador utilizan imanes: desde el pequeño motor que mueve el ventilador hasta los altavoces del equipo, pasando por las unidades de disco flexibles o los propios discos duros, en los que la información se almacena magnéticamente.

En informática, la información se almacena en formato binario (unos y ceros). Para conseguirlo, en un disco duro o en un disco flexible se hace corresponder el uno con una orientación magnética, por ejemplo, el norte; y el cero, con la orientación contraria, en este caso el sur. De este modo, cuando el lector de disco, que es básicamente otro imán, pasa por encima de las pistas grabadas, puede reconocer el código de unos y ceros, que posteriormente se descodifica y se traduce en información útil.

8.3. LEY DE LORENTZ

1. **Una carga eléctrica penetra en una región del espacio como se indica en la figura.**



En dicha región hay un campo magnético uniforme y constante, perpendicular al plano del papel y de sentido entrante. ¿Cuál es el signo de la carga eléctrica si esta se desvía en el campo como indica la figura?

Razona la respuesta.

La fuerza viene determinada por la ley de Lorentz:

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

El sentido del vector fuerza es el que corresponde al producto vectorial de la expresión anterior, $\vec{v} \times \vec{B}$, aunque está condicionado por el tipo de carga, q, que puede ser positiva o negativa.

En este caso, para que se dé la trayectoria que se indica en la figura que propone el enunciado, la carga debe ser negativa. De lo contrario, la fuerza sería un vector paralelo al plano del papel, dirigido hacia arriba, y la trayectoria sería curva, pero en sentido antihorario.

8.4. PRIMERA LEY DE LAPLACE

1. Calcula la fuerza que actúa sobre un conductor rectilíneo, de 10 cm de longitud, por el que circula una corriente de 5 A en el interior de un campo magnético de 10 T. Las líneas del campo magnético son perpendiculares al conductor. Represente gráficamente la situación.

De acuerdo con lo que establece la ley de Laplace:

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{L} \times \vec{B})$$

Como las líneas de campo son perpendiculares al conductor, el valor de la fuerza es:

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot sen\ \theta = I \cdot l \cdot B \cdot sen\ 90° = I \cdot l \cdot B = 5 \cdot 0{,}1 \cdot 2 = 1\ \text{N}$$

También se puede tener en cuenta el caso de que el ángulo formado sea de 270°.

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot sen\ \theta = I \cdot l \cdot B \cdot sen\ 270° = -I \cdot l \cdot B = -5 \cdot 0{,}1 \cdot 2 = -1\ \text{N}$$

La representación gráfica es como la mostrada en la segunda ilustración de la página 201 del libro del alumno.

2. Analiza el resultado que obtendríamos en la actividad anterior si las líneas del campo magnético:

a) Son paralelas al conductor.

b) Forman un ángulo de 30° con la dirección que señala el conductor.

a) Si el conductor se introduce paralelamente a las líneas de campo, la fuerza que actúa sobre el conductor en el supuesto anterior se anula:

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot sen\ \theta = I \cdot l \cdot B \cdot sen\ 0° = I \cdot l \cdot B \cdot 0 = 0\ \text{N}$$

b) Si el ángulo formado entre el campo magnético y el conductor es de 30°, obtenemos:

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot sen\ \theta = 5 \cdot 0{,}1 \cdot 10 \cdot sen\ 30° = 2{,}5\ \text{N}$$

8.5. ESPIRA INDEFORMABLE EN EL SENO DE UN CAMPO MAGNÉTICO

1. ¿Por qué se utiliza el hierro o el acero en los imanes? ¿No sería mejor utilizar cobre u oro, que conducen mucho mejor la corriente eléctrica?

Es mejor utilizar las primeras, ya que se trata de sustancias ferromagnéticas (el campo magnético en un interior es mucho mayor que el que existe en el vacío). La imantación que presentan el cobre y el oro al aplicar un campo magnético a una muestra de ellos es muy débil.

2. Busca información acerca de cómo está construido un motor eléctrico. ¿Puedes relacionar el motor eléctrico con lo que hemos estudiado hasta ahora en esta unidad?

Se trata de una respuesta abierta, en la que debe quedar claramente establecido el principio de funcionamiento de un motor eléctrico como la acción sobre una espira de un campo magnético.

8.6. CAMPOS MAGNÉTICOS CREADOS POR CARGAS MÓVILES

1. **Calcula la intensidad del campo magnético que crea a 10 cm de distancia un conductor rectilíneo indefinido por el que circula una corriente de 10 A. Considera que el conductor se encuentra rodeado de aire.**

   La expresión que permite calcular la inducción magnética que crea un conductor rectilíneo e indefinido por el que circula una corriente I a una distancia a de él, es:

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

   donde $\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot N \cdot A^{-2}$

   Por tanto:

$$B = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^{-2}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

2. **Imagina ahora que el conductor de la actividad anterior es una espira de 10 cm de radio que rodea a un núcleo de hierro. Si por dicha espira circula la misma intensidad de corriente que en el caso anterior, ¿cuál será ahora la intensidad del campo magnético?**

   Sea μ_{Fe} la permeabilidad magnética del hierro. El campo magnético que crea una espira circular, en su centro, es:

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot R}$$

   donde, en este caso:

$$\mu = \mu_{\text{Fe}} = \mu'_{\text{Fe}} \cdot \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \mu'_{\text{Fe}}$$

   El hierro es una sustancia ferromagnética; por tanto, $\mu'_{\text{Fe}} >> 1$; en consecuencia, el campo magnético creado será:

$$B = \frac{\mu_{\text{Fe}} \cdot I}{2 \cdot R} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \mu'_{\text{Fe}} \cdot 10}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-2}} = 6{,}28 \cdot \mu'_{\text{Fe}} \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

3. **Si en lugar de una espira, el conductor se arrolla cien veces en torno al núcleo de hierro, formando un solenoide de 10 cm de longitud, ¿cuál será ahora la intensidad del campo magnético? La intensidad de corriente es la misma en los tres casos.**

   En este caso, la intensidad de campo magnético en sus extremos será:

$$B = \frac{\mu_{\text{Fe}} \cdot I \cdot N}{2 \cdot L} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \mu'_{\text{Fe}} \cdot 10 \cdot 100}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-2}} = 6{,}28 \cdot 10^{-1} \cdot \mu'_{\text{Fe}} \text{ T}$$

8.7. LEY DE AMPÈRE DEL CAMPO MAGNÉTICO

1. **¿Qué nos permite afirmar, de forma contundente, que el campo magnético no es conservativo?**

El campo magnético no es conservativo, ya que la circulación de un campo a lo largo de una línea cerrada es no nula. No es posible definir en él un potencial del mismo modo que lo hacemos para el campo eléctrico o el campo gravitatorio.

2. Un cable rectilíneo de longitud $L = 0{,}5$ m transporta una corriente eléctrica $I = 2$ A. Este cable está colocado perpendicularmente a un campo magnético uniforme $B = 0{,}25$ T. Calcula el módulo de la fuerza que sufre dicho cable.

De acuerdo con la primera ley de Laplace:

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{L} \times \vec{B}) = I \cdot L \cdot B \cdot sen\ \theta = 2 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}25 \cdot sen\ 90° = 0{,}25 \text{ N}$$

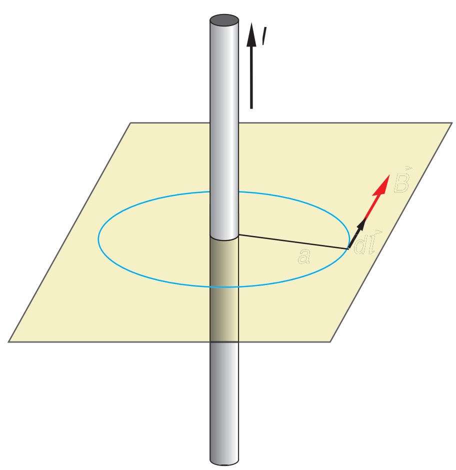
3. Calcula el campo creado por un conductor rectilíneo e infinito por el que circula una corriente de 4 A, en un punto situado a 0,2 m del conductor. Dibuja las líneas de fuerza y el vector campo en ese punto.

Dato: $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ T · m · A^{-1}

La ley de Biot y Savart establece que el campo creado se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot a} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 4}{2 \cdot \pi \cdot 0{,}2} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

La línea de fuerza y el vector campo en ese punto son las que se muestran en la siguiente ilustración:

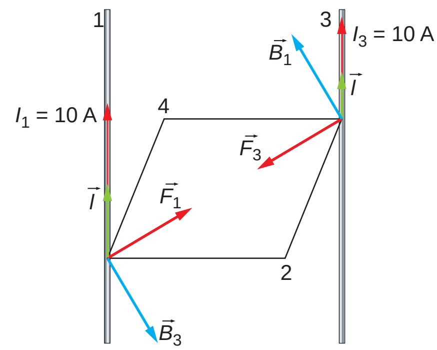


4. Dos hilos metálicos largos y paralelos, por los que circulan corrientes de 10 A, pasan por dos vértices opuestos de un cuadrado de 1 m de lado situado en un plano horizontal. Ambas corrientes discurren perpendicularmente a dicho plano, hacia arriba:

a) Dibuja un esquema en el que figuren las interacciones mutuas y el campo magnético resultante en uno de los dos vértices del cuadrado.

b) Calcula los valores numéricos del campo magnético en dicho vértice y de la fuerza por unidad de longitud ejercida sobre uno de los hilos. Considera $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ T · m · A^{-1}

a) El esquema que solicita el enunciado de la actividad es el que se muestra a continuación:



La fuerza a que está sometido el conductor 1 es:

$$F_1 = I_1 \cdot l_1 \cdot B_3$$

siendo B_3 el campo magnético creado por el conductor 3 a una distancia *d:*

$$B_3 = \frac{\mu_0 \cdot I_3}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

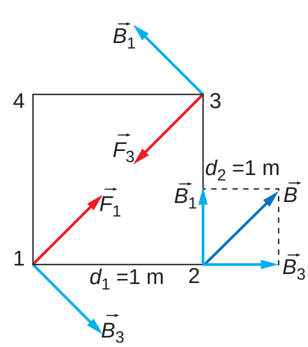
Por tanto:

$$F_1 = \frac{I_1 \cdot l_1 \cdot \mu_0 \cdot I_3}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

Del mismo modo, la fuerza a que está sometido el conductor situado en el vértice 3 es:

$$F_3 = \frac{\mu_0 \cdot l_3 \cdot I_1 \cdot I_3}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

Ambas fuerzas tienen la misma dirección, y sus sentidos son opuestos: recuerda que dos corrientes paralelas de igual dirección y sentido se atraen. El campo magnético resultante en uno de los otros dos vértices del cuadrado es el que se muestra en la siguiente ilustración:



b) El campo magnético que crea el conductor 1 en el vértice 2 es:

$$B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot d_1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{2 \cdot \pi \cdot 1} = 2 \cdot 10^{-6}\ \text{T}$$

y el que crea el conductor 3 en el vértice 2:

$$B_3 = \frac{\mu_0 \cdot I_3}{2 \cdot \pi \cdot d} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{2 \cdot \pi \cdot 1} = 2 \cdot 10^{-6}\ \text{T}$$

Como los campos creados por el conductor 1 y el conductor 3 forman entre sí un ángulo de 90°, la intensidad del campo magnético resultante es:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_3^2} = \sqrt{(2 \cdot 10^{-6})^2 + (2 \cdot 10^{-6})^2} = 2{,}83 \cdot 10^{-6}\ \text{T}$$

La fuerza que se ejerce sobre uno de los hilos conductores es:

$$F_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot I_1 \cdot I_3$$

Por tanto, la fuerza por unidad de longitud será:

$$\frac{F_1}{l_1} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot I_1 \cdot I_3$$

En esta expresión, d es la distancia que separa ambos conductores, que se corresponde con la diagonal del cuadrado:

$$d = \sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2}\ \text{m}$$

El valor de la fuerza por unidad de longitud es:

$$\frac{F_1}{l} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2}} \cdot 10 \cdot 10 = \sqrt{2} \cdot 10^{-5}\ \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$$

ACTIVIDADES DE LA UNIDAD

CUESTIONES

1. Las líneas de fuerza del campo magnético son:

a) Abiertas como las del campo eléctrico.

b) Siempre cerradas.

c) Abiertas o cerradas dependiendo del imán o la bobina.

Las líneas de fuerza del campo magnético son cerradas; el vector inducción es tangente a ellas en cada punto. La respuesta correcta es la **c).**

Por ejemplo, son las líneas de fuerza de un imán o las que corresponden al campo magnético creado por una corriente eléctrica rectilínea.

2. Dibuja las líneas del campo magnético que crean:

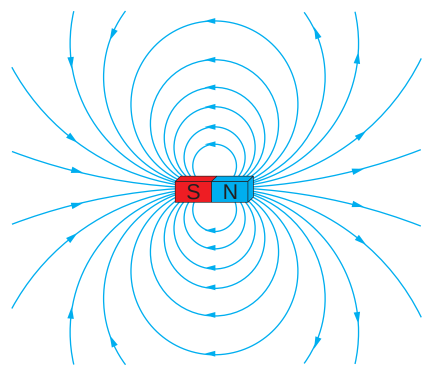
a) Un imán permanente de forma cilíndrica.

b) Una espira circular por la que circula una corriente continua.

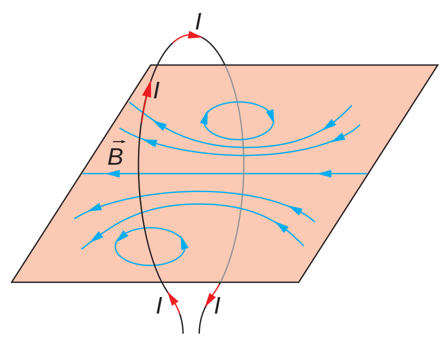
c) Un hilo rectilíneo muy largo por el que circula una corriente continua.

Las líneas de fuerza que solicita el enunciado son las siguientes:

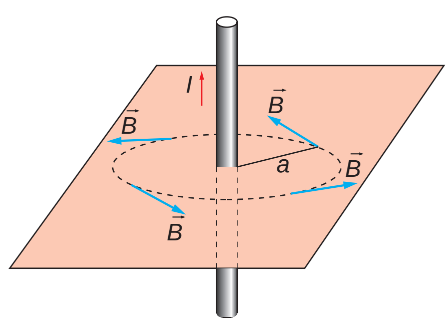
a) Las líneas de fuerza que corresponden a un imán permanente de forma cilíndrica son análogas a las de un imán recto:



b) Espira circular por la que circula una corriente continua:



c) Hilo rectilíneo muy largo por el que circula una corriente continua:



3. Una partícula, con carga *q*, penetra en una región en la que existe un campo. Explica cómo podríamos determinar, al observar la trayectoria de la partícula, si se trata de un campo eléctrico o de un campo magnético. ¿Hay algún caso en que no sería posible determinar el tipo de campo?

Las fuerzas eléctrica y magnética que se ejercen sobre una carga en movimiento son, respectivamente:

$$\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$$
$$\vec{F}_m = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

La fuerza eléctrica actúa en la misma dirección que el campo eléctrico, y la fuerza magnética, en dirección perpendicular al plano formado por la velocidad de la carga y el vector inducción magnética.

Si la partícula penetra en el campo con una velocidad que tiene una componente perpendicular al campo, se desviará de diferente forma, según el campo sea eléctrico o magnético.

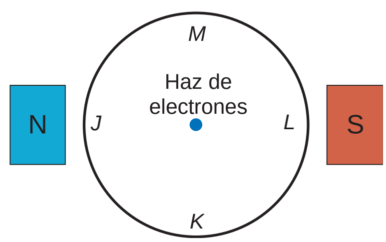
En el primer caso, si la carga es positiva, esta se verá acelerada en la dirección del campo, y la componente de la velocidad perpendicular al campo se mantendrá. Su movimiento será parabólico.

En el segundo caso, la fuera magnética la obligará a describir una circunferencia.

Si la partícula entra con una velocidad paralela a las líneas de fuerza del campo, no se modificará su trayectoria, (si es un campo eléctrico, acelerará y si es magnético, la fuerza que actuará sobre ella será nula, ya que $F_m = q \cdot v \cdot B \cdot sen\ 0° = 0$).

El razonamiento en el caso de que la carga de la partícula sea negativa es similar al expuesto.

4. En la figura se muestra un haz de electrones que se mueven perpendicularmente al plano del papel, en un recinto en que se ha realizado el vacío.



Se aproximan dos imanes a la vasija, de forma que el polo norte se encuentra a la izquierda del haz de electrones y el polo sur a la derecha de dicho haz. Indica hacia dónde se desviará la trayectoria del haz de electrones: *J, K, L, M,* o, si por el contrario, no se modificará.

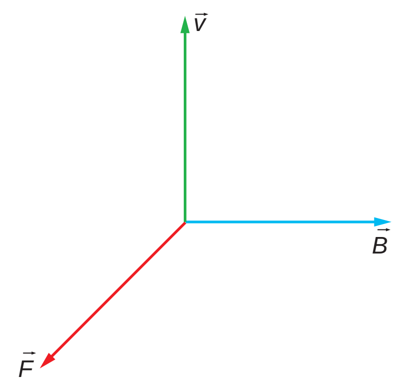
Observa que, en la experiencia:

- El haz de electrones de la figura no es más que una sucesión de cargas que se mueven con velocidad v, perpendicularmente al plano del papel y hacia fuera.
- Los imanes crean un campo magnético. La dirección de este campo es vertical, y se encuentra sobre el plano del papel, siendo su sentido de norte a sur (de izquierda a derecha en el dibujo).

Al penetrar en la región en la que existe el campo magnético, las cargas en movimiento se ven sometidas a la fuerza de Lorentz:

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

La fuerza de Lorentz actúa como fuerza centrípeta y obliga a la partícula cargada a describir una circunferencia.



Si averiguamos el sentido en que actúa la fuerza, sabremos hacia dónde se desviará el haz. Para ello, hemos de tener en cuenta que la carga es negativa, lo que da a la fuerza un sentido contrario al que le correspondería según el producto vectorial.

En el caso que nos ocupa, la fuerza va dirigida hacia el punto ***K.***

5. Dos partículas cargadas se mueven con la misma velocidad y, al aplicarles un campo magnético perpendicular a dicha velocidad, se desvían en sentidos contrarios y describen trayectorias circulares de distintos radios:

a) ¿Qué puede decirse de las características de estas partículas?

b) Si en vez de aplicarles un campo magnético se les aplica un campo eléctrico paralelo a su trayectoria, indica razonadamente cómo se moverán las partículas.

a) La fuerza magnética a que se ve sometida una partícula de velocidad $\vec{v}$ y carga q cuando entra en el seno de un campo magnético de inducción $\vec{B}$ es:

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

Si las partículas describen una trayectoria circular, debe existir una fuerza centrípeta que las obligue a describirla. Por tanto:

$$F_e = F_m \rightarrow \frac{m \cdot v^2}{R} = q \cdot v \cdot B \cdot sen\ \theta$$

El radio de la trayectoria que describen se calcula a partir de la expresión anterior:

$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B \cdot sen\ 90°}$$

Como la velocidad de las partículas es la misma y penetran en el mismo campo magnético, el radio de la circunferencia que describen depende de v y de q. En consecuencia, como los radios son distintos, la masa, la carga o ambas, de cada partícula deben ser distintas.

Además, como se desvían en sentidos contrarios, el signo de su carga debe ser distinto.

b) La fuerza eléctrica que actúa sobre una partícula cargada es:

$$\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$$

Si la carga es positiva, la fuerza eléctrica y el campo eléctrico tienen la misma dirección y sentido; la carga acelerará siguiendo la dirección y sentido de las líneas de campo eléctrico. Si la carga es negativa, se verá sometida a una deceleración en la misma dirección del campo.

6. ¿Puede ser nula la fuerza magnética que se ejerce sobre una partícula cargada que se mueve en el seno de un campo magnético? ¿Y la fuerza eléctrica sobre una partícula cargada que se mueve en el seno de un campo eléctrico?

La fuerza magnética viene dada por la ley de Lorentz:

$$\vec{F}_m = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} = q \cdot v \cdot B \cdot sen\ \alpha$$

Por tanto, cuando $\alpha = 0$, es decir, cuando el vector velocidad sea paralelo al vector inducción magnética, $sen\ \alpha = 0 \rightarrow \vec{F}_m = 0$.

La fuerza eléctrica viene dada por la ley de Coulomb:

$$\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$$

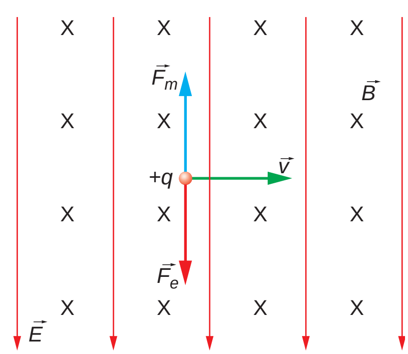
El módulo de esta fuerza es:

$$F_e = q \cdot E$$

Y tendrá la misma dirección y sentido que el campo eléctrico si la carga es positiva y sentido opuesto si la carga es negativa. La fuerza eléctrica no es nula en ningún caso.

7. ¿Cómo se han de aplicar un campo eléctrico y otro magnético, perpendiculares y uniformes, para que sus fuerzas respectivas sobre una carga con velocidad $\vec{v}$ se anulen? ¿Cuál ha de ser la relación entre sus módulos?

En la siguiente figura se muestra cómo se deben aplicar dichos campos:



Al imponer la condición de que los módulos de ambas fuerzas sean iguales, obtenemos la relación entre ellos:

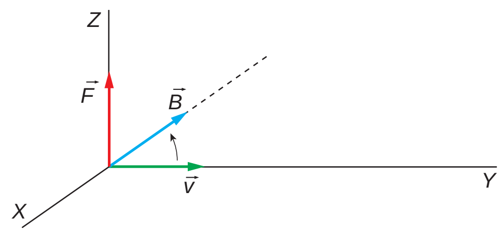
$$F_m = F_e \rightarrow q \cdot v \cdot B = q \cdot E \rightarrow \frac{E}{B} = v$$

8. Un protón que se mueve en un plano horizontal con una velocidad $\vec{v}$ entra en una región en la que hay un campo magnético $\vec{B}$ perpendicular al plano horizontal. Explica y justifica la trayectoria que describirá el protón.

Cuando el protón entra perpendicularmente al campo magnético, se ve sometido a la fuerza de Lorentz:

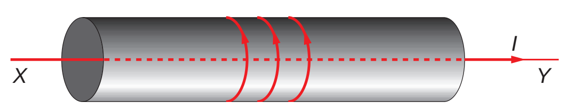
$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \rightarrow F = q \cdot v \cdot B \cdot sen\, 90° = q \cdot v \cdot B$$

La dirección y el sentido de esta fuerza magnética son los que se muestran en la ilustración:



Esta fuerza actúa como una fuerza normal que obliga al protón a describir una trayectoria circular.

9. **Por el conductor horizontal *XY* circula cierta intensidad de corriente, de *X* a *Y*. Cuando hacemos que circule corriente por el solenoide, en la dirección que se indica, es posible que el conductor se mueva. En este caso, el conductor:**

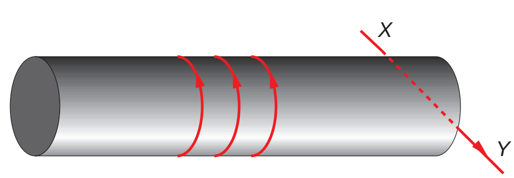


a) Se mueve hacia arriba.

b) Permanece en reposo.

c) Se mueve hacia abajo.

Si el dispositivo experimental es el que se indica ahora en la figura, el conductor:



a) Se mueve hacia arriba.

b) Permanece en reposo.

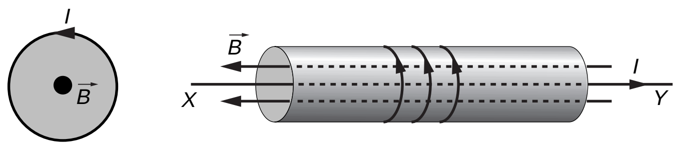
c) Se mueve hacia abajo.

Según la ley de Laplace, la fuerza que ejerce un campo magnético sobre un conductor recorrido por cierta intensidad de corriente resulta:

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{L} \times \vec{B})$$

Se trata, por tanto, de averiguar la dirección y el sentido del campo magnético que crea el solenoide.

El campo magnético es perpendicular al plano por el que circula la intensidad de corriente. El sentido que corresponde a las líneas del campo viene establecido por la regla de tornillo.



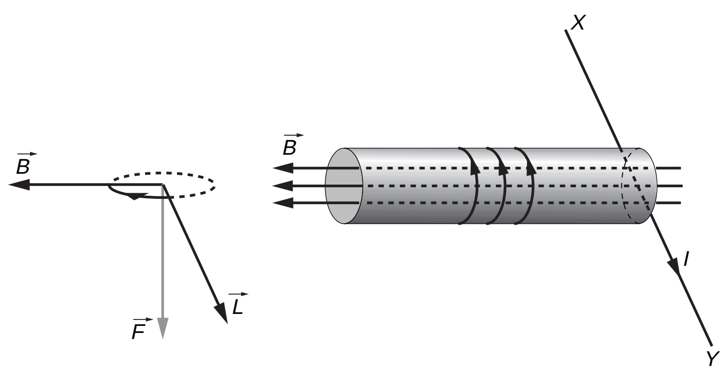
Como vemos, el campo magnético y la dirección de la intensidad son antiparalelos. Por tanto:

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{L} \times \vec{B}) = I \cdot L \cdot B \cdot sen\ 180° = 0$$

Como vemos, el conductor permanece en reposo, ya que no actúa ninguna fuerza sobre él.

La respuesta correcta es **b).**

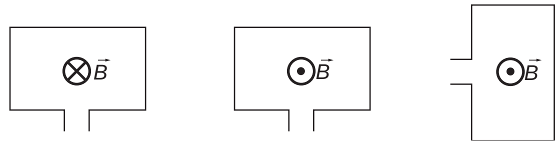
En el segundo caso, el campo magnético no ha variado, dado que la intensidad de corriente que recorre las bobinas lo hace en el mismo sentido que antes.



Aplicando de nuevo la ley de Laplace, vemos que, de acuerdo con la regla del tornillo, se ejerce sobre el conductor una fuerza hacia abajo, como se aprecia en la figura. Por tanto, el conductor se desplazará hacia abajo.

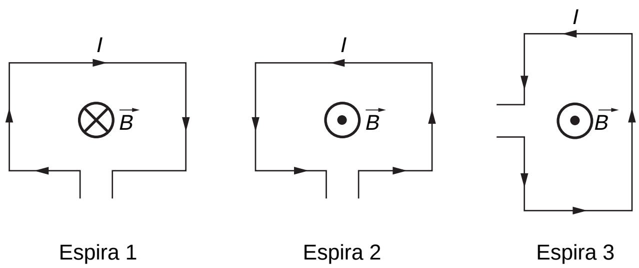
La respuesta correcta es **c).**

10. Las espiras de la figura están atravesadas por un campo magnético creado por la corriente eléctrica que circula por ellas, que es perpendicular al plano de la espira. Indica el sentido en que circula la corriente en cada caso.



El criterio que seguimos para determinar el sentido del campo o de la corriente se corresponde con la regla de la mano derecha:

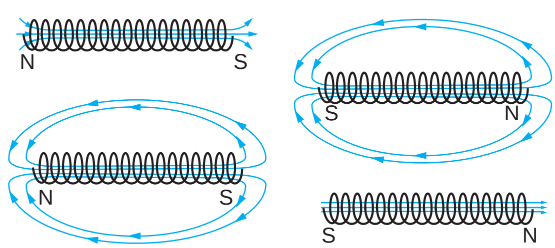
- Si la corriente circula en sentido antihorario, el vector campo magnético que se crea es perpendicular al plano de la espira, siendo su sentido hacia fuera del plano del papel.
- Si la corriente circula en sentido horario, el vector campo magnético que se crea es perpendicular al plano de la espira, siendo su sentido hacia dentro del plano del papel.



Por tanto, podemos afirmar lo siguiente:

1. La corriente de la espira 1 es en sentido horario; de este modo, el sentido del vector campo magnético es tal que entra en la superficie del papel.
2. La corriente de las espiras 2 y 3 es en sentido antihorario; de este modo, el sentido del vector campo magnético es tal que sale de la superficie del papel.

11. Se conecta un solenoide a una diferencia de potencial ε. Indica cuál de las cuatro ilustraciones muestra cómo será el campo magnético en el interior y en el exterior del solenoide.



En las figuras se representan las posibles líneas de fuerza del campo magnético creado por un solenoide.

Se denomina polo norte al extremo por el que “salen” las líneas de campo, y polo sur al extremo por el que estas “entran” en la bobina. Por otra parte, hemos de recordar que el campo en el interior de la bobina es más intenso. Debido a ello, las líneas en el interior están más juntas.

De acuerdo con esto, la ilustración correcta es la de la derecha, arriba.

12. De los fenómenos que se indican, ¿cuáles son característicos de los campos gravitatorio y eléctrico, pero no del magnético?

a) Fuerzas a distancia.

b) Campos cuya acción llega, teóricamente, hasta el infinito.

c) Existencia de monopolos.

d) Fuerzas de atracción.

El fenómeno que aparece en los campos gravitatorio y eléctrico, pero no en el magnético, es la existencia de monopolos.

En el campo gravitatorio podemos considerar una masa puntual, del mismo modo que en el campo eléctrico podemos considerar una carga puntual. Sin embargo, en un imán debemos tener en cuenta que existen dos polos: norte y sur. Si partimos un imán en dos partes, cada una de ellas se comportará de nuevo como un imán, con sus respectivos polos norte y sur.

La respuesta correcta es, por tanto, **c).**

13. **Explica razonadamente la acción de un campo magnético sobre un conductor rectilíneo, perpendicular al campo, por el que circula una corriente eléctrica y dibuja en un esquema la dirección y el sentido de todas las magnitudes vectoriales que intervienen.**

Explica qué modificaciones se producirían en los casos siguientes:

a) Si el conductor forma un ángulo de 45° con el campo.

b) Si el conductor es paralelo al campo.

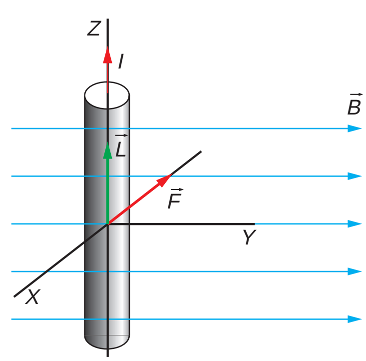
Si el campo magnético, $\vec{B}$, es uniforme, de acuerdo con la primera ley de Laplace:

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \rightarrow F = I \cdot l \cdot B \cdot sen\ \theta$$

Como el conductor rectilíneo está situado perpendicularmente al campo magnético,

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot sen\ 90° = I \cdot l \cdot B$$

La dirección y el sentido de la fuerza magnética son las que se muestran en la siguiente ilustración:



a) Si el conductor forma un ángulo de 45° con el vector inducción magnética, el módulo de la fuerza magnética varía:

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot sen\ 45° = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot I \cdot l \cdot B$$

Su dirección y sentido son los mismos que en el caso anterior, por las propiedades del producto vertical.

b) Si el conductor es paralelo al campo magnético, la fuerza que se ejerce sobre él es nula:

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot sen\ 0° = 0$$

14. El campo magnético creado por un hilo infinito y recto por el que circula una corriente de 1 A en un punto a distancia *r* m del hilo:

a) Depende de la inversa del cuadrado de la distancia.

b) Tiene la dirección de las líneas circulares en torno al hilo.

c) Depende del cuadrado de la intensidad de corriente.

El campo magnético que describe el enunciado se calcula de acuerdo con la ley de Biot y Savart:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

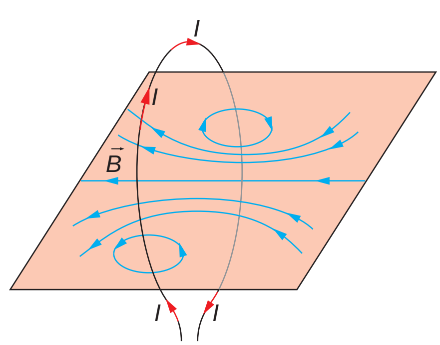
La dirección y el sentido del campo magnético vienen dados por la regla de la mano derecha. Si cogemos el conductor con la mano derecha, de modo que el pulgar se oriente en el sentido de la corriente que circula por él, el sentido de giro de las líneas de campo es el del resto de los dedos de la mano. En este caso, se trata de líneas circulares en planos perpendiculares al hilo rectilíneo.

Por tanto, la respuesta correcta es la **b).**

Observa que el campo magnético creado depende de la inversa de la distancia y es directamente proporcional a la intensidad de corriente, no de sus cuadrados, como se indica en los apartados a) y c) del enunciado.

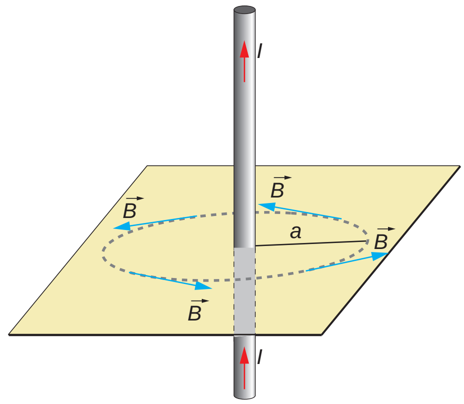
15. Traza razonadamente el diagrama de líneas de campo magnético para el campo creado por una espira circular por la que circula una corriente eléctrica. No olvides incluir en el diagrama el sentido de dicha corriente. Haz lo mismo para el caso de un conductor rectilíneo y muy largo.

Las líneas de fuerza del campo magnético creado por una espira circular por la que circula una corriente eléctrica son las que se muestran en la ilustración.



Para explicar la forma de dichas líneas de fuerza, considera que la corriente circular está formada por elementos de corriente rectilíneos, cada uno de los cuales forma su propio campo, que será perpendicular a la dirección de la corriente y cuyo sentido vendrá determinado por la aplicación de la regla de Maxwell.

En el caso de un conductor rectilíneo y muy largo, aplicando la regla de Maxwell de la mano derecha, se obtiene el campo que se muestra a continuación:



16. ***X, Y*** **y** ***Z*** **son tres conductores perpendiculares al plano del papel que equidistan entre sí. Las corrientes** ***X*** **e** ***Y*****, entran hacia el papel, mientras que la corriente** ***Z*** **sale del plano del papel.**

La fuerza electromagnética que actúa sobre el conductor ***Y*** **es:**

a) Nula.

b) Perpendicular a la línea que une a los tres conductores.

c) En dirección y sentido de ***Y*** **a** ***Z*****.**

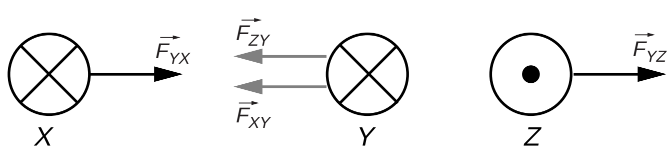
d) En dirección y sentido de ***Y*** **a** ***X*****.**

e) La dirección depende de las intensidades de cada una de las tres corrientes.

A lo largo de la unidad, hemos estudiado la interacción entre corrientes paralelas. Allí concluíamos que, cuando las corrientes son de sentidos opuestos, se repelen y, cuando son del mismo sentido, se atraen. Así pues (despreciando la interacción entre las corrientes *X* y *Z*):

- Sobre las corrientes *Y* y *Z* aparece una fuerza de repulsión.
- Sobre las corrientes *X* e *Y* aparece una fuerza de atracción.

Debido a la posición relativa que ocupan los conductores, la fuerza resultante sobre *Y* es perpendicular a su línea de corriente, estando dirigida de *Y* a *X*.



$$\vec{F}_Y = \vec{F}_{XY} + \vec{F}_{ZY}$$

$$F_Y = F_{XY} + F_{ZY}$$

La respuesta correcta es, por tanto, **d).**

17. Supongamos que en una región del espacio tenemos un campo eléctrico y otro magnético de sentidos opuestos y que en el interior de esta región dejamos en reposo una carga positiva. Explica el movimiento que realizará dicha carga.

Al liberar la carga positiva en reposo, esta se verá sometida a la acción del campo eléctrico, moviéndose en la misma dirección y sentido que este:

$$\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$$

Al estar en reposo ($v = 0$), no actúa la fuerza magnética sobre ella:

$$\vec{F}_m = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) = 0$$

Una vez la carga se encuentre en movimiento, al ser el campo magnético y el eléctrico de sentidos opuestos, el ángulo que formarán el vector velocidad y el vector campo magnético será de 180°. En consecuencia, tampoco actuará ninguna fuerza magnética sobre ella, ya que:

$$F_m = q \cdot v \cdot B \cdot sen\ 180° = 0$$

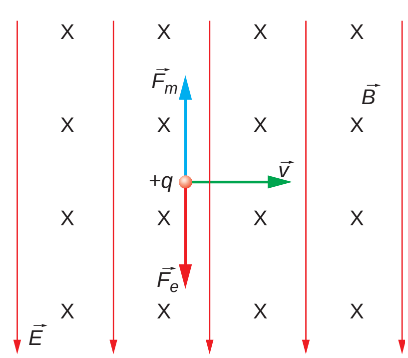
Por tanto, sobre la carga actuará tan solo la fuerza eléctrica. Si el campo eléctrico, $\vec{E}$, es uniforme, la partícula efectuará un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado.

18. Se tienen dos corrientes eléctricas paralelas y de sentidos contrarios. ¿Se repelen o se atraen?

Dos corrientes paralelas por las que circulan corrientes de sentidos contrarios se repelen (consúltese la página 206 del libro del alumno para una explicación más amplia de este fenómeno).

19. ¿Cómo deben ser las direcciones y sentidos de un campo eléctrico y otro magnético uniformes para que la fuerza resultante sobre una carga con velocidad $\vec{v}$ sea cero? ¿Cuál ha de ser la relación entre sus módulos? Razona la respuesta.

En la siguiente figura se muestra cómo se deben aplicar dichos campos:



Al imponer la condición de que los módulos de ambas fuerzas sean iguales, obtenemos la relación entre ellos:

$$F_m = F_e \rightarrow q \cdot v \cdot B = q \cdot E \rightarrow \frac{E}{B} = v$$

EJERCICIOS

20. Un electrón con una velocidad de 3 000 km · s^{-1} penetra perpendicularmente en una región del espacio en la que hay un campo magnético uniforme *B* = 0,15 T. Calcula el radio de su órbita.

Datos: $m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg, $q_e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C

Para que el electrón describa una órbita circular, debe existir una fuerza centrípeta que le obligue a describirla. Esta fuerza centrípeta es, precisamente, la fuerza magnética a que se ve sometido. Por tanto:

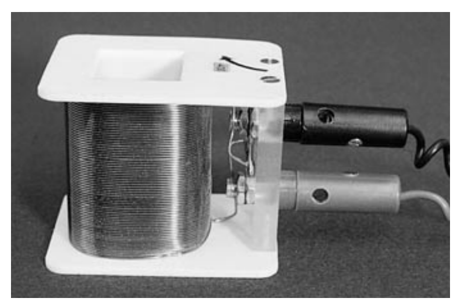
$$F_c = F_m \rightarrow \frac{m \cdot v^2}{R} = q \cdot v \cdot B \cdot sen\ \alpha$$

$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B \cdot sen\ \alpha} = \frac{9 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^6}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}15 \cdot sen\ 90°} = 1{,}14 \cdot 10^{-4}\ \text{m}$$

21. Busca información al respecto y explica cómo funciona un amperímetro analógico. Indica, sobre todo, qué dispositivo permite que se desplace la aguja que proporciona las lecturas.

Cuando circula corriente por la bobina, se origina un campo magnético en su interior que magnetiza el núcleo en que está arrollada. Ello hace que el sistema se reoriente respecto al imán permanente que rodea la bobina.

Esta fuerza se ve compensada por una fuerza de reacción que hace que el sistema se oponga al giro, de modo que, a mayor intensidad, mayor sea el ángulo de giro de la bobina. Ello permite medir, de forma indirecta, la intensidad que circula por la bobina: basta con conocer el ángulo de giro de la aguja unida al sistema.



Por lo general, esta aguja se encuentra sobre una carátula, previamente calibrada, en la que podemos leer directamente la intensidad que circula, en vez de medir el ángulo de giro.

22. Un protón con una energía cinética de 1 eV se mueve perpendicularmente a un campo magnético de 1,5 T. Calcula la fuerza que actúa sobre él, sabiendo que su masa es de 1,67 · 10^{-27} kg y su carga 1,6 · 10^{-19} C.

La fuerza magnética que actúa sobre una partícula cargada en el seno de un campo magnético viene dada por la ley de Lorentz:

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

La energía cinética del protón es:

$$E_c = 1\ \text{eV} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \frac{\text{J}}{\text{eV}} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

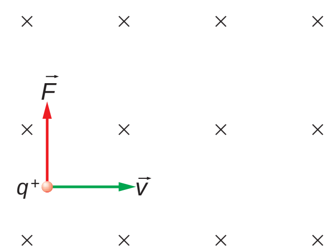
Y la velocidad con que se mueve:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_c}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}{1{,}67 \cdot 10^{-27}}} = 1{,}38 \cdot 10^4\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

El módulo de la fuerza magnética que actúa sobre el protón es:

$$F_m = q \cdot v \cdot B \cdot sen\ \alpha = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 1{,}38 \cdot 10^4 \cdot 1{,}5 \cdot sen\ 90° = 3{,}32 \cdot 10^{-15}\ \text{N}$$

La dirección y el sentido de la fuerza magnética son los que se muestran en el siguiente esquema:



23. Un grupo de excursionistas se encuentran perdidos en el campo. Como son precavidos, llevan consigo una brújula con la que esperan orientarse y, de ese modo, conseguir llegar al pueblo más cercano. Sin embargo, al utilizar la brújula no advierten que a 8 metros por encima de ellos hay una línea de alta tensión por la que circula una corriente de 150 A. ¿Es relevante ese dato? Si lo es, indica el ángulo que se desviará la brújula, suponiendo que la línea de corriente vaya en sentido oeste-este y que la componente horizontal del campo magnético terrestre sea 0,2 gauss en ese punto.

La corriente que transportan las líneas de alta tensión es alterna. La corriente alterna cambia el sentido en que se propaga, siendo su frecuencia 50 hertz. Por tanto, crea un campo magnético variable, que no modifica la dirección del campo magnético terrestre, que es el que detecta la brújula.

Si se tratase de una corriente continua, sí apreciaríamos el fenómeno, ya que aparecería en las proximidades de las torres de alta tensión un campo magnético cuya componente afectaría a la dirección y el sentido del campo magnético terrestre.

24. Un protón tiene una energía cinética de $2 \cdot 10^{-3}$ J y sigue una trayectoria circular en un campo magnético de módulo $B = 0{,}6$ T. Calcula:

a) El radio de la trayectoria.

b) La frecuencia con que gira.

Datos: Carga del protón = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C

Masa del protón = $1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg

a) La fuerza centrípeta que hace que el protón describa una trayectoria circular es la fuerza magnética. Al aplicar la segunda ley de Newton y operar, obtenemos la expresión que nos permite calcular el radio de la trayectoria que describe:

$$F_c = F_m \rightarrow \frac{m \cdot v^2}{R} = q \cdot v \cdot B \cdot sen\ \alpha$$

En este caso, al ser la trayectoria circular, $sen\ \alpha = \text{sen}\ 90° = 1$. Por tanto:

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

A partir de la energía cinética del electrón, podemos calcular su velocidad:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_c}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-13}}{1,7 \cdot 10^{-27}}} = 1,53 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

Fe de erratas del libro del alumnado: el valor de la energía cinética del protón proporcionado por el enunciado debe ser $2 \cdot 10^{-13}$ J. Con el valor que aparece, la velocidad del electrón superaría a la de la luz.

El radio de la trayectoria que describe es:

$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} = \frac{1,7 \cdot 10^{-27} \cdot 1,53 \cdot 10^7}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,6} = 0,27 \text{ m}$$

b) El tiempo que tarda el protón en recorrer la longitud que corresponde a una circunferencia de radio $R = 0,27$ m es el período de su movimiento circular:

$$T = \frac{s}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,27}{1,53 \cdot 10^7} = 1,11 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

La frecuencia es la inversa del período:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,11 \cdot 10^{-7}} = 8,99 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

PROBLEMAS

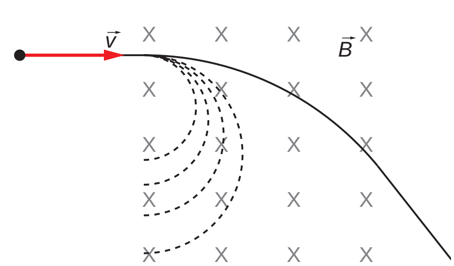
25. Una carga eléctrica, $q = 3,2 \cdot 10^{-19}$ C, de masa $6,7 \cdot 10^{-27}$ kg, entra en una zona con un campo magnético $\vec{B}$ uniforme, dirigido perpendicularmente a la hoja y hacia dentro del papel. La anchura de la zona es de 2 m:

a) Indica dos o tres trayectorias posibles para la carga dentro de esta zona según el módulo de la velocidad con la que entra ($\vec{v}$ es perpendicular a $\vec{B}$).

b) Si el módulo de $\vec{B}$ vale 10^{-3} T, ¿cuál es la velocidad mínima que debe tener la carga para que atraviese toda la zona?

c) ¿Qué tipo de partícula podría ser esta carga? Si cambiásemos el signo de la carga, ¿qué cambiaría en los apartados anteriores?

a) La trayectoria que describe una partícula cargada al penetrar en una región en la que existe un campo magnético depende del ángulo que forman los vectores velocidad e inducción. En este caso, ese ángulo es de 90°, por lo que la partícula describirá una trayectoria circular. Al ser su radio proporcional al módulo de la velocidad con que penetra la partícula en el campo, existirán tantas trayectorias circulares como velocidades posibles para la partícula.



b) Para que la partícula pueda atravesar la región del campo magnético, su velocidad debe ser tal que el radio de la trayectoria circular sea mayor que la anchura de dicha región.

A partir de la expresión de la fuerza de Lorentz, deduciremos el valor de la velocidad de la partícula:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \rightarrow F = q \cdot v \cdot B \cdot sen\ 90°$$

Esta fuerza es la que obliga a la partícula a describir una trayectoria circular. Se trata, por tanto, de una fuerza centrípeta:

$$F = F_c \rightarrow q \cdot v \cdot B \cdot sen\ 90° = \frac{m \cdot v^2}{R}$$

Despejando y sustituyendo los valores conocidos, obtenemos la velocidad mínima que debe tener la partícula para atravesar la zona en la que está confinado el campo magnético:

$$v = \frac{R \cdot q \cdot B}{m} \rightarrow v = \frac{2 \cdot 3{,}2 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-3}}{6{,}7 \cdot 10^{-27}} = 95{,}5 \cdot 10^{3}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

c) Para determinar el tipo de partícula con la que estamos trabajando, tendremos en cuenta su carga y su masa. Expresada en unidades de masa atómica, esta masa es:

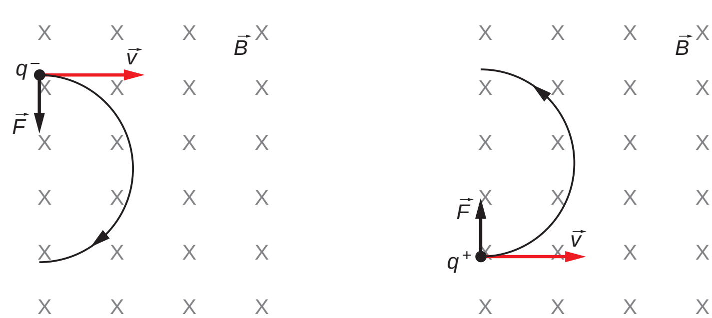
$$m = 6{,}7 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} \cdot \frac{1\ \text{u}}{1{,}67 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}} = 4\ \text{u}$$

En cuanto a su carga, su valor es el doble del que corresponde a la carga del electrón ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C):

$$q = 3{,}2 \cdot 10^{-19}\ \text{C} = 2 \cdot |e|$$

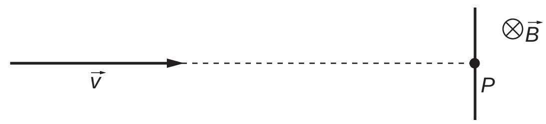
Podría tratarse, por tanto, de un núcleo de helio, que está formado por dos protones (de donde proviene la carga de la partícula) y dos neutrones, que en total suman cuatro unidades de masa atómica. A este núcleo se le denomina también partícula α.

Si se cambiase el signo de la carga, variaría el sentido de la fuerza de Lorentz (fuerza magnética), lo que obligaría a la carga a describir la trayectoria circular en sentido opuesto:



NOTA: la resolución de este problema se ofrece también en el CD-ROM para el alumnado.

26. Un electrón (masa, $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg; carga eléctrica, $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C) se mueve en una región sin ningún campo de fuerzas, con una velocidad de 10^8 m · s^{-1}, en la dirección y en el sentido indicados en la figura, y llega a un punto *P*, en el que entra en una región con un campo magnético $\vec{B}$, perpendicular al papel y hacia dentro:



a) ¿Qué intensidad ha de tener $\vec{B}$ para que el electrón vuelva a la primera región por un punto *Q* situado a 30 cm de *P*?

b) ¿A qué lado de *P* está situado *Q*?

c) Si aumentásemos en un factor 2 la intensidad de $\vec{B}$, ¿a qué distancia de *P* volvería el electrón a la primera región?

a) Cuando el electrón penetra en una región donde existe un campo magnético, el campo ejerce sobre él una fuerza dada por la expresión:

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

Esta fuerza se denomina fuerza de Lorentz y obliga al electrón a describir una trayectoria circular ($\vec{F}$ es perpendicular a $\vec{v}$ y a $\vec{B}$). Se trata, por tanto, de una fuerza centrípeta:

$$F = F_c$$

$$q \cdot v \cdot B \cdot sen\ 90° = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

Para que el electrón regrese a la primera región por un punto que dista 30 cm del punto *P*, esta distancia debe ser el diámetro de la circunferencia descrita por el electrón:

$$R = \frac{0{,}3}{2} = 0{,}15 \text{ m}$$

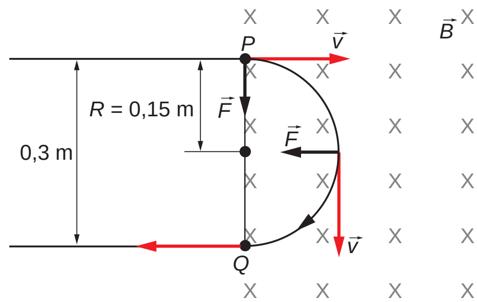
$$q \cdot v \cdot B \cdot sen\ 90° = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

Despejando, obtenemos la intensidad del campo magnético:

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

$$B = \frac{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^8}{0{,}15 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 3{,}79 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

b) El vector $\vec{F}$ está dirigido según el producto vectorial de $\vec{v}$ por $\vec{B}$, y su sentido está determinado por la carga de la partícula. En este caso, al tratarse de un electrón, el sentido de la fuerza es el contrario al correspondiente a dicho producto vectorial, tal como se aprecia en la figura de la página siguiente.



Por tanto, la carga describe la trayectoria circular en el sentido de las agujas del reloj, y el punto Q se encuentra 30 cm por debajo de P.

c) Si aumenta la intensidad del campo magnético manteniéndose constante la velocidad de la partícula, variará el radio de la circunferencia descrita por ella:

$$\left.\begin{aligned} B' &= \frac{m \cdot v}{R' \cdot q} \\ B &= \frac{m \cdot v}{R \cdot q} \end{aligned}\right\} \rightarrow \frac{B'}{B} = \frac{R}{R'} \rightarrow \frac{2 \cdot B}{B} = \frac{R}{R'} \rightarrow R' = \frac{R}{2} = \frac{0{,}15}{2} = 0{,}075 \text{ m}$$

El electrón saldrá a la primera región pasando por un punto situado a una distancia $2 \cdot R' = 0{,}15$ m de P; es decir, la mitad de distancia que en el caso anterior.

NOTA: la resolución de este problema se ofrece también en el CD-ROM para el alumnado.

27. Un protón penetra en una zona de un campo magnético uniforme de 10^{-3} T y lleva una velocidad de 500 m · s^{-1}, perpendicular al campo magnético. Determina las siguientes magnitudes del protón en la zona con campo magnético:

a) Módulo de la fuerza que experimenta y de su aceleración.

b) Potencial eléctrico producido por el protón en el centro de la órbita que describe.

Datos: $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg; $|e| = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C
$1/(4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0) = 9 \cdot 10^9$ en unidades del S.I.

a) La fuerza a que se ve sometido el protón viene dada por la ley de Lorentz:

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

Esta fuerza obliga al protón a describir una trayectoria circular. Su módulo es:

$$F_m = q \cdot v \cdot B \cdot sen\ \theta = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 500 \cdot 10^{-3} \cdot sen\ 90° = 8 \cdot 10^{-20} \text{ N}$$

La aceleración centrípeta que experimenta es:

$$F_c = F_m \rightarrow m \cdot a_c = F_m \rightarrow a_c = \frac{F_m}{m} = \frac{8 \cdot 10^{-20}}{1{,}67 \cdot 10^{-27}} = 4{,}79 \cdot 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

b) El potencial en el centro de la órbita de radio R que describe el protón es:

$$V = K \cdot \frac{q}{R}$$

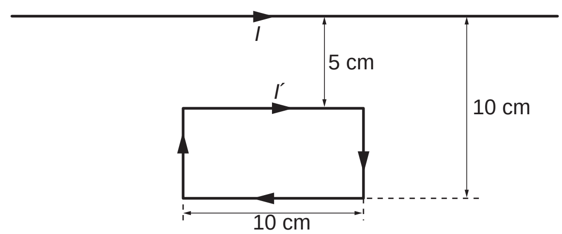
A partir de la aceleración centrípeta, podemos calcular el radio de la órbita que describe el protón:

$$a_c = \frac{v^2}{R} \rightarrow R = \frac{v^2}{a_c} = \frac{500^2}{4{,}79 \cdot 10^7} = 5{,}22 \cdot 10^{-3}\ \text{m}$$

Por tanto, el potencial en el centro de la órbita es:

$$V = K \cdot \frac{q}{R} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}}{5{,}22 \cdot 10^{-3}} = 2{,}76 \cdot 10^{-7}\ \text{V}$$

28 Por un conductor rectilíneo de gran longitud circula una corriente $I = 2$ A. Situamos junto a él una espira rectangular rígida por la que circula una corriente de $I' = 2$ A:



a) Calcula la fuerza que actúa sobre cada uno de los dos lados paralelos del conductor.

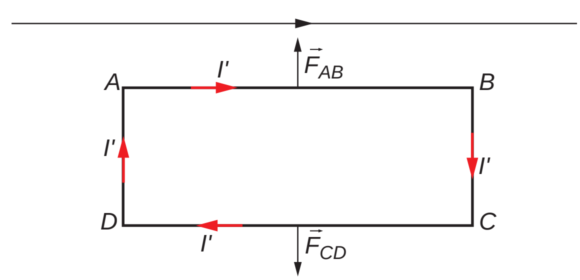
b) ¿Qué fuerza neta actúa sobre toda la espira?

Dato: $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ T · m · A^{-1}

a) De acuerdo con la primera ley de Laplace, la fuerza que actúa sobre cada uno de los lados paralelos al conductor se calcula mediante la siguiente expresión:

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

La dirección y el sentido de la fuerza que actúa sobre cada uno de los dos lados de la espira paralelos al conductor son los que se muestran en la siguiente ilustración:



Recuerda que dos corrientes paralelas, de igual dirección y sentido, se atraen y que si sus sentidos son opuestos, se repelen.

El módulo de la fuerza que ejerce el conductor sobre el lado *AB* de la espira es:

$$F_{AB} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot I' \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot d_{AB}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{-2}} = 1{,}6 \cdot 10^{-6}\ \text{N}$$

El módulo de la fuerza que ejerce el conductor sobre el lado CD de la espira es:

$$F_{CD} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot I' \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot d_{CD}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^{-2}} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

FE DE ERRATAS DEL LIBRO DEL ALUMNO: los valores que aparecen como solución en el apéndice del libro del alumno se obtienen considerando $I' = 1$ A.

b) La fuerza neta que actúa sobre la espira está dirigida hacia el conductor rectilíneo:

$$F = F_{AB} - F_{CD} = 1{,}6 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-7} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ N} \rightarrow \vec{F} = 8 \cdot 10^{-7} \cdot \vec{j} \text{ N}$$

29 Un solenoide está construido enrollando uniformemente 600 vueltas de un fino hilo conductor sobre un cilindro hueco de 30 cm de longitud. Por el bobinado se hace circular una corriente $I = 2$ A:

a) Calcula el campo magnético en el interior del solenoide y representa gráficamente, de forma aproximada, las líneas de campo magnético dentro y fuera del solenoide.

b) Una partícula cargada entra en el solenoide moviéndose con velocidad $\vec{v}$ a lo largo de su eje. Debido a la existencia del campo magnético, ¿se curvará en algún sentido su trayectoria? ¿Por qué?

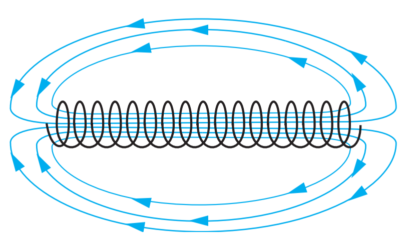
a) En el interior del solenoide, el campo magnético es constante, de valor:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{L} \rightarrow B = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 600 \cdot 2}{0{,}3} = 5{,}03 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

En los extremos del solenoide y en las zonas próximas a ellos, las líneas de campo se separan. El campo magnético en esos puntos vale:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2 \cdot L} \rightarrow B = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 600 \cdot 2}{2 \cdot 0{,}3} = 2{,}51 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

La representación gráfica de las líneas de campo en el interior y en el exterior del solenoide es la siguiente:



b) Como se aprecia en la figura anterior, las líneas de campo en el interior del solenoide y, en particular, en su eje, tienen la dirección señalada por la longitud de este. Por tanto, cuando la partícula entra en el solenoide con velocidad coincidente con su eje, los vectores velocidad y campo magnético son paralelos. En consecuencia, la fuerza magnética que actúa sobre la partícula es nula:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \rightarrow F = q \cdot v \cdot B \cdot sen\ (\vec{v}, \vec{B}) = q \cdot v \cdot B \cdot sen\ 0° = 0$$

Por tanto, la trayectoria de la partícula no se modifica.

NOTA: la resolución de este problema se ofrece también en el CD-ROM para el alumnado.

30. **Un hilo conductor, rectilíneo e indefinido, situado en el vacío sobre el eje *OZ* de un sistema de referencia cartesiano (*OXYZ*), transporta una corriente eléctrica de intensidad $I = 2$ A en el sentido positivo de dicho eje. Calcula la fuerza magnética que actuará sobre una partícula cargada, con $q = 5$ C, en el instante en que pasa por el punto de coordenadas (0,4, 0) m con una velocidad $\vec{v} = 20 \cdot \vec{j}$ m · s^{-1}.**

Dato: $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ **T · m · A^{-1}**

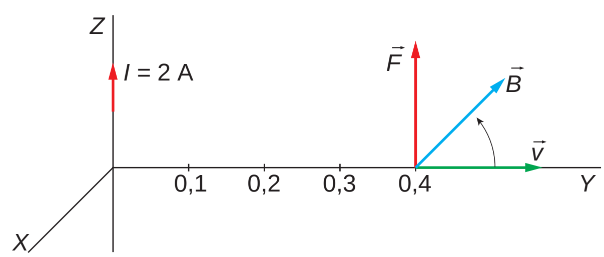
La fuerza que actúa sobre la partícula la calculamos aplicando la expresión de la ley de Lorentz:

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

Para obtenerla, necesitamos calcular, en primer lugar, el valor de la inducción magnética que crea la corriente en el punto de coordenadas (0,4, 0, 0), cuyo módulo se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot d} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot 0{,}4} = 10^{-6} \text{ T}$$

La dirección y el sentido de $\vec{B}$, $\vec{v}$ y $\vec{F}$ son los que se muestran en la siguiente ilustración:



El valor de la fuerza magnética que actuará sobre la partícula es:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \rightarrow F = q \cdot v \cdot B \cdot sen\ \theta = 5 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot sen\ 90° = 10^{-4} \text{ N}$$

31 **Dos isótopos, cuyas masas son 19,91 · 10^{-27} kg y 21,59 · 10^{-27} kg, respectivamente, y que tienen la misma carga de ionización, son acelerados hasta que adquieren una velocidad constante de 6,7 · 10^{5} m · s^{-1}. Se les hace atravesar una región de campo magnético uniforme de 0,85 T, cuyas líneas de campo son perpendiculares a la velocidad de las partículas:**

a) Determina la relación entre los radios de las trayectorias que describe cada isótopo.

b) Si han sido ionizados una sola vez, determina la separación entre los dos isótopos cuando han descrito una semicircunferencia.

Dato: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ **C**

a) La fuerza centrípeta que obliga a los isótopos a describir la trayectoria circular es la fuerza magnética:

$$F_c = F_m \rightarrow \frac{m \cdot v^2}{R} = q \cdot v \cdot B \cdot sen\ \theta$$

En este caso, al ser las líneas de campo perpendiculares a la velocidad de los isótopos, *sen* θ = *sen* 90° = 1.

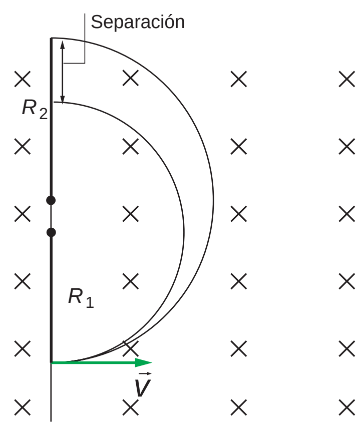
Despejando el radio en la expresión anterior, se obtiene:

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

La relación entre los radios de ambos isótopos es:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\dfrac{m_1 \cdot v}{q \cdot B}}{\dfrac{m_2 \cdot v}{q \cdot B}} = \frac{m_1}{m_2} = \frac{19{,}91 \cdot 10^{-27}}{21{,}59 \cdot 10^{-27}} = 0{,}92$$

b) De acuerdo con la siguiente ilustración:



la separación se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$separación = 2 \cdot R_2 - 2 \cdot R_1$$

El enunciado del problema indica que los isótopos han sido ionizados una sola vez; por tanto, la carga que posee cada uno se corresponde con la del electrón: $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Teniendo esto en cuenta, podemos calcular el radio de la trayectoria que describe cada isótopo:

$$R_1 = \frac{m_1 \cdot v}{q \cdot B} = \frac{19{,}91 \cdot 10^{-27} \cdot 6{,}7 \cdot 10^5}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}85} = 0{,}098 \text{ m}$$

$$R_2 = \frac{m_2 \cdot v}{q \cdot B} = \frac{21{,}59 \cdot 10^{-27} \cdot 6{,}7 \cdot 10^5}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}85} = 0{,}106 \text{ m}$$

Por tanto, la separación entre los isópotos tras describir media semicircunferencia es:

$$separación = 2 \cdot R_2 - 2 \cdot R_1 = 2 \cdot (R_2 - R_1) = 2 \cdot (0{,}106 - 0{,}098) =$$

$$= 0{,}0166 \text{ m} = 1{,}66 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

32. **Una corriente *I* está distribuida uniformemente en toda la sección transversal de un conductor recto y largo de radio 1,40 mm. En la superficie del conductor, el campo magnético tiene una magnitud $B = 2{,}46 \cdot 10^{-3}$ T:**

a) Determina la magnitud del campo magnético a 2,20 mm del eje.

b) Determina la intensidad, *I*, de la corriente.

a) El campo magnético que crea la corriente se puede calcular a partir de la ley de Biot y Savart:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

Por simetría, podemos suponer que toda la corriente pasa por el eje del hilo. Al aplicar la expresión anterior a las distancias 1,40 mm (distancia del eje a la superficie del conductor) y 2,20 mm, se obtiene el valor del campo magnético a 2,20 mm del eje:

$$\left.\begin{array}{l} B_1 = \dfrac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot d_1} = \dfrac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot 1{,}40 \cdot 10^{-3}} = 2{,}46 \cdot 10^{-3}\ \text{T} \\[2ex] B_2 = \dfrac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot d_2} = \dfrac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot 2{,}20 \cdot 10^{-3}} \end{array}\right\} \rightarrow \frac{B_2}{B_1} = \frac{d_2}{d_1} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{B_2}{B_1} = \frac{1{,}40}{2{,}20} \rightarrow B_2 = B_1 \cdot \frac{1{,}40}{2{,}20} = 2{,}46 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1{,}40}{2{,}20} = 1{,}57 \cdot 10^{-3}\ \text{T}$$

b) El valor de la intensidad lo podemos obtener a partir de la expresión de B_1 o B_2:

$$B_1 = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot 1{,}40 \cdot 10^{-3}} = 2{,}46 \cdot 10^{-3}\ \text{T} \rightarrow$$

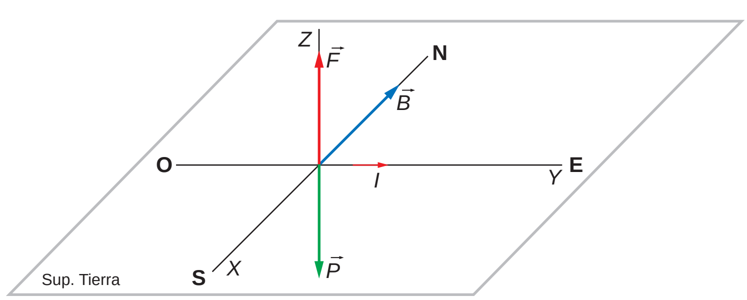
$$\rightarrow I = \frac{2{,}46 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1{,}40 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 17{,}22\ \text{A}$$

33 **Un alambre recto horizontal transporta una corriente de 16 A de oeste a este en el campo magnético terrestre en un lugar donde $\vec{B}$ es paralelo a la superficie, apunta hacia el norte y tiene un valor de 0,04 mT:**

a) Calcula la fuerza magnética sobre 1 m de ese alambre.

b) Si la masa de ese trozo de alambre es de 50 g, ¿qué corriente debe transportar para quedar suspendido de forma que su peso sea compensado por la fuerza magnética?

a) La situación física que describe el enunciado es la que se muestra en la siguiente ilustración:



La fuerza magnética que actúa sobre 1 m del alambre es:

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B} = 16 \cdot 1 \cdot \vec{j} \times 4 \cdot 10^{-5} \cdot (-\vec{i}) = 64 \cdot 10^{-5} \cdot \vec{k} \text{ N}$$

b) El peso que corrsponde al alambre es:

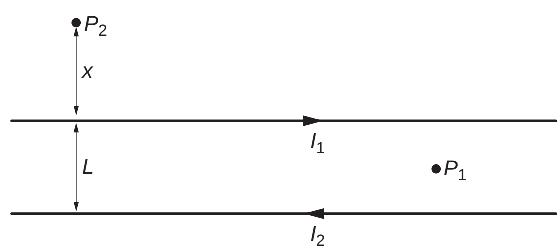
$$\vec{P} = m \cdot g \cdot (-\vec{k}) = -50 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}8 \cdot \vec{k} = -0{,}49 \cdot \vec{k} \text{ N}$$

La intensidad de corriente que debe recorrer el alambre ha de producir una fuerza magnética del mismo valor. Por tanto:

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot sen\ \theta = I \cdot l \cdot B \cdot sen\ 90° = I \cdot l \cdot B = 0{,}49 \text{ N} \rightarrow$$

$$\rightarrow I = \frac{0{,}49}{l \cdot B} = \frac{0{,}49}{1 \cdot 4 \cdot 10^{-5}} = 12\,250 \text{ A}$$

34 **Por dos largos conductores rectilíneos y paralelos, separados una distancia $L = 0{,}5$ m, circula una corriente $I_1 = 2$ A e $I_2 = 4$ A en sentidos opuestos:**



a) Calcula el campo magnético (módulo y orientación) en un punto como el P_1, equidistante de ambos conductores y situado en su mismo plano.

b) Considera un punto P_2, donde el campo magnético total es nulo. Razona por qué ha de estar situado a la izquierda de ambas corrientes y en su mismo plano, como se indica en la figura.

c) Calcula la distancia x de P_2 a I_1.

a) El modulo del campo magnético que crea cada corriente rectilínea en el punto P_1 se obtiene mediante la ley de Biot y Savart:

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

donde I es la corriente que circula por cada conductor; d es la distancia que separa el conductor del punto en que deseamos calcular el campo, y μ es la permeabilidad magnética del medio, que en este caso es el vacío.

Por tanto, el campo magnético creado por el conductor 1 en P_1 es:

$$B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot L/2} \rightarrow B_1 = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot 0{,}5/2} = 1{,}6 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

Y el creado por el conductor 2:

$$B_2 = \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot L/2} \rightarrow B_2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 4}{2 \cdot \pi \cdot 0{,}5/2} = 3{,}2 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

La dirección y el sentido de cada uno de estos campos se determina teniendo en cuenta que las líneas de campo generadas por una corriente rectilínea son circunferencias con centro en la línea de corriente y colocadas en planos perpendiculares a ella. El sentido de estas líneas es el indicado por los dedos de la mano derecha cuando se coge el conductor, de modo que el dedo pulgar señala el sentido de la corriente.

Por tanto, el campo magnético creado por el conductor 1 en P_1 es perpendicular al plano del papel y hacia dentro, al igual que el creado por el conductor 2.

El campo total creado en el punto P_1 es, por el principio de superposición:

$$\vec{B}_{total} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 \rightarrow B_{total} = B_1 + B_2 = 1{,}6 \cdot 10^{-6} + 3{,}2 \cdot 10^{-6} = 4{,}8 \cdot 10^{-6}\ \text{T}$$

La dirección y el sentido de este campo es el mismo que dedujimos para los campos $\vec{B}_1$ y $\vec{B}_2$.

b) El campo magnético creado por una corriente rectilínea en un punto es proporcional al valor de la corriente e inversamente proporcional a la distancia que les separa.

En nuestro caso, hemos visto que los campos magnéticos creados por ambas corrientes en los puntos situados entre ellas tienen la misma dirección y sentido, por lo que su suma no se anula nunca. El punto P_2 debe estar, por tanto, por encima o por debajo de ambas. Como la corriente 2 es mayor que la corriente 1, la única posibilidad de que la suma de los dos campos se anule en un punto es que dicho punto esté más cerca de la corriente menor, es decir, la corriente 1.

c) El conductor 1 crea en el punto P_2 un campo magnético:

$$B_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot x} \rightarrow B_1 = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2}{2 \cdot \pi \cdot x} = \frac{4 \cdot 10^{-7}}{x}\ \text{T}$$

Este campo es perpendicular al plano del papel y hacia fuera.

Por su parte, el conductor 2 crea un campo:

$$B_2 = \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot (x + L)} \rightarrow B_2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 4}{2 \cdot \pi \cdot (x + L)} = \frac{8 \cdot 10^{-7}}{x + L}\ \text{T}$$

Este campo es perpendicular al plano del papel y hacia dentro.

El campo magnético total en P_2 es:

$$\vec{B}_{total} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 \rightarrow B_{total} = B_1 - B_2$$

Aplicando la condición de que el campo total se anule en P_2, obtenemos la distancia x:

$$B_1 - B_2 = 0 \rightarrow \frac{4 \cdot 10^{-7}}{x} - \frac{8 \cdot 10^{-7}}{x + L} = 0$$

$$\frac{4 \cdot 10^{-7}}{x} = \frac{8 \cdot 10^{-7}}{x + L} \rightarrow 4 \cdot 10^{-7} \cdot (x + L) = 8 \cdot 10^{-7} \cdot x$$

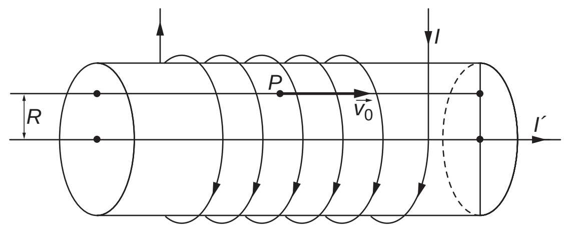
$$4 \cdot 10^{-7} \cdot L = 4 \cdot 10^{-7} \cdot x \rightarrow x = L = 0{,}5\ \text{m}$$

Por tanto, el punto en el que se anula el campo magnético total creado por las dos corrientes rectilíneas se encuentra 50 cm por encima del conductor 1.

NOTA: la resolución de este problema se ofrece también en el CD-ROM para el alumnado.

35 **Por el solenoide de la figura, que tiene 100 espiras por metro, circula una corriente de intensidad $I = 1$ A.**

En el eje del solenoide se dispone un conductor rectilíneo que transporta otra corriente de intensidad $I' = 20 \cdot \pi$ A:



a) Calcula el campo magnético total en el punto *P* de la figura, que dista $R = 0{,}1$ m del eje del solenoide.

b) Si se abandona un electrón en el punto *P* con una velocidad inicial $v_0 = 100\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, calcula el radio de curvatura de su trayectoria.

a) El campo magnético que crea un solenoide en un punto interior, alejado de sus extremos, es:

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{L}$$

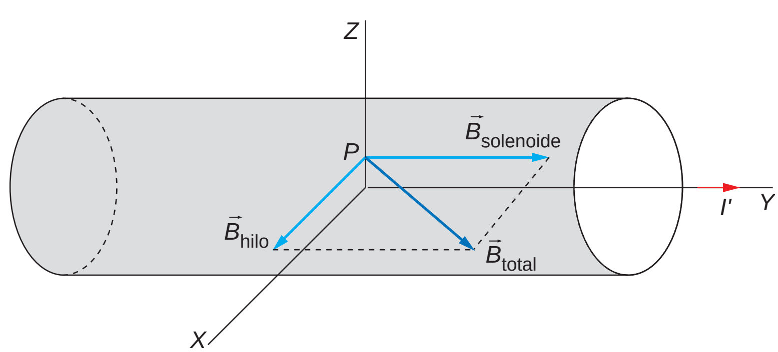
En este caso:

$$n = \frac{N}{L} = 100\ \frac{\text{espiras}}{\text{metro}}$$

Por tanto:

$$B_{solenoide} = \mu \cdot n \cdot I = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 100 \cdot 1 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-5}\ \text{T}$$

Este campo magnético se compone con el del conductor rectilíneo, como se muestra en la siguiente ilustración:



El módulo del campo magnético que crea el conductor rectilíneo se calcula aplicado la ley de Biot y Savart:

$$B_{hilo} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot d} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 20 \cdot \pi}{2 \cdot \pi \cdot 0{,}1} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-5}\ \text{T}$$

El módulo del campo magnético resultante, teniendo en cuenta que, de acuerdo con la ilustración anterior, el ángulo que forma el campo magnético del solenoide con el del hilo es de 90°, es:

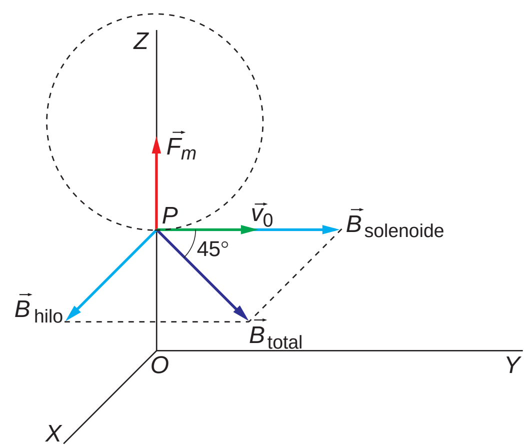
$$B_{total} = \sqrt{(4 \cdot \pi \cdot 10^{-5})^2 + (4 \cdot \pi \cdot 10^{-5})^2} = \sqrt{2 \cdot (4 \cdot \pi \cdot 10^{-5})^2} = 1,78 \cdot 10^{-4}\ \text{T}$$

b) La fuerza magnética a que se ve sometido el electrón es la fuerza centrípeta que lo hace girar:

$$F_c = F_m \rightarrow \frac{m \cdot v^2}{R} = q \cdot v \cdot B \cdot sen\ \theta \rightarrow R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B \cdot sen\ \theta}$$

NOTA: se supone que el electrón se desplaza en la dirección paralela al eje de rotación y en el sentido de I'.

Fíjate que, de acuerdo con la siguiente figura, el ángulo θ, formado por la velocidad del electrón y el campo magnético resultante, es de 45°:



El radio de curvatura de la trayectoria resulta:

$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B \cdot sen\ \theta} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 100}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{2} \cdot sen\ 45°} = 4,53 \cdot 10^{-6}\ \text{m}$$