

FUERZAS MAGNÉTICAS

1. Interacción magnética

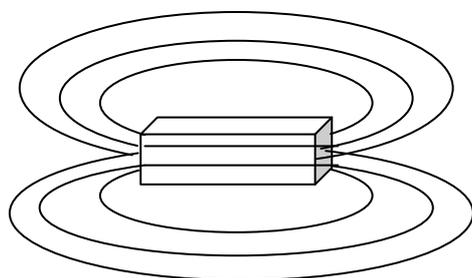
Este tema, que de alguna manera cierra un bloque que comenzaba con el anterior, gravitará en torno a aquellos aspectos no analizados en la lección de 'Fuentes del Campo Magnético'. Dichos aspectos estarían relacionados con los efectos que produce un campo magnético cuando actúa sobre distintos elementos.

Esta segunda parte, como parece obvio, tendrá una componente de aplicación tecnológica muy importante.



A.1 a) Una carga en movimiento respecto de un sistema de referencia inercial en reposo, ¿crea siempre un campo magnético respecto de ese sistema inercial? ¿Habría fuerza magnética? Razónalo.

b) ¿En cuál de los siguientes casos el campo magnético, creado por el imán, ejercerá fuerza?



a) \bigcirc $+Q$
 $v=0$

b) \bigcirc $-Q$
 $v \rightarrow$

c) \overrightarrow{I}

Comentario:

Una vez que en el tema anterior se han analizado las diferentes fuentes del campo magnético estacionario, los estudiantes deberían estar en situación de abordar el asunto de 'sobre qué' actúa dicho campo, en tanto que se ha visto en diferentes lecciones de la asignatura, el hecho de que los campos siempre, y sólo, actúan sobre sus fuentes.



A.2 De una partícula cargada que lleva una velocidad v respecto de un sistema de referencia inercial, se dice que un campo eléctrico en determinadas circunstancias la puede detener, argumentando que la fuerza eléctrica es central.

La misma partícula cargada, situada en una región donde exista únicamente un campo magnético, y como consecuencia de él, no puede modificar el módulo de

su velocidad y por tanto ser detenida (lo que conlleva que no tiene aceleración tangencial), debido a que la fuerza magnética no es central.

Dibuja, en un sistema de referencia los vectores campo, fuerza y velocidad de la partícula, en ambas situaciones justificando lo que se dice.

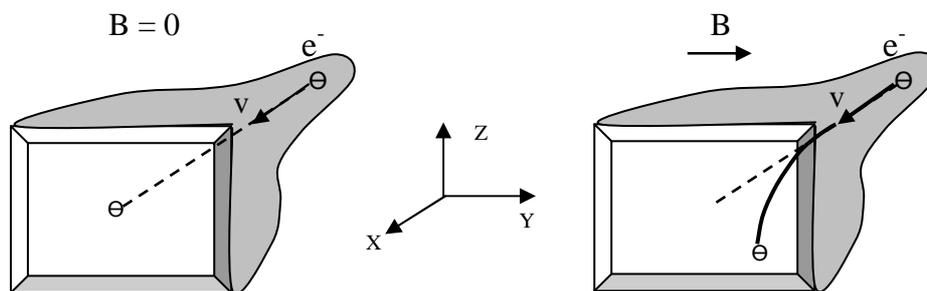
Comentario:

Se trataría de hacer una valoración, todavía cualitativa, en tanto que aún no se ha abordado la ley de la fuerza magnética, relacionada con la dirección que debe tener la fuerza magnética respecto a la que tiene la velocidad de la partícula sobre la que actúa el campo magnético. Del enunciado se deduce, que la fuerza magnética debe ser perpendicular a la velocidad.



A.3 Observa lo que sucede a los electrones del tubo de TV cuando se coloca un imán.

- Explica su desviación.
- Dibuja los vectores relevantes sobre los ejes de la figura.
- Si colocamos el imán en el plano XY formando un ángulo de 30° respecto a la dirección del movimiento de los electrones, ¿qué sucederá?, ¿y si lo situamos en la dirección del movimiento de los electrones?



Comentario:

Una vez observado, en la actividad anterior, que la fuerza magnética F_m y la velocidad de la partícula, son siempre perpendiculares entre sí; se trata ahora de llegar a la conclusión de que la fuerza magnética también es perpendicular al campo magnético B .



Una vez realizada una discusión respecto del posible modelo matemático para la fuerza magnética, que debería dar cuenta de los hechos empíricos observados, el profesor propondrá la expresión matemática de la ley de la fuerza magnética: $\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$



En lo que se refiere a la ley anterior, debería hacerse especial hincapié en varios aspectos: a) que la velocidad que aparece en la fórmula es la de la partícula respecto de un observador inercial; b) que de alguna manera, aquí también la fuerza es el producto de la fuente ($q\vec{v}$) por el campo; c) que resulta de interés

analizar, detenidamente, el hecho de que la velocidad no tiene por qué ser perpendicular al campo magnético.

2. ¿Qué implicaciones tiene en el movimiento de la carga el hecho de que la fuerza magnética sea perpendicular a su velocidad?



A.4 a) Haciendo uso del teorema de las fuerzas vivas (T. de la energía cinética), evalúa el trabajo realizado por la fuerza magnética sobre una carga en movimiento en el seno de un campo magnético estacionario (no depende del tiempo).

b) ¿Se te ocurre otra manera de llegar al mismo resultado? Puedes apoyarte en la definición de trabajo.



A.5 Una partícula de masa m y carga $-q$, penetra en una región de campo magnético B uniforme, con velocidad v (respecto de un observador inercial) y perpendicular al campo.

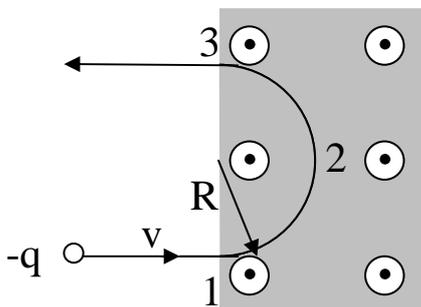
a) Dibuja la fuerza magnética en los puntos 1, 2 y 3 y justifica la trayectoria que sigue la partícula.

b) Previa emisión de hipótesis, calcula el radio de curvatura.

c) Dibuja comparando con la figura dada, las trayectorias seguidas para los casos:

c1) tenemos una carga positiva y un campo mayor.

c2) disponemos de una velocidad mayor para la partícula y un campo menor.



Comentario:

El fin que perseguimos con esta actividad es doble; por un lado, aplicar la fuerza magnética a una situación concreta, por otro, analizar, sin realizar el cálculo, las magnitudes físicas de las que dependería el radio R de la trayectoria circular. Veamos con más detenimiento este segundo aspecto.

El Radio, R , de la trayectoria dependerá de: $R = f(m, q, v, B)$. Esta dependencia será de la siguiente forma:

Si $m \uparrow \Rightarrow R \uparrow$ pues la inercia \uparrow

Si $q \uparrow \Rightarrow R \downarrow$ pues la fuerza magnética \uparrow

Si $B \uparrow \Rightarrow R \downarrow$ pues la fuerza magnética \uparrow



$$\text{Si } v \uparrow \Rightarrow \begin{cases} R \downarrow \text{ pues la fuerza magnética } \uparrow \\ R \uparrow \text{ pues la fuerza magnética } \uparrow \end{cases}$$

En este caso, por tanto, no está clara la relación final, aunque se espera que tenga un mayor peso el que R crezca, pues la fuerza centrífuga depende del cuadrado de la velocidad mientras que la fuerza magnética depende ‘sólo’ de la velocidad. En efecto, si se realizan los cálculos resulta: $R = mv/qB$ lo que es coherente con las hipótesis que habíamos previamente emitido.



A.6 De acuerdo con las valoraciones realizadas en A.5, el movimiento de la partícula es periódico: a) ¿De qué magnitudes dependerá el tiempo que tarda la carga en completar la circunferencia? b) Obtén la expresión matemática de dicho periodo. c) Contrasta el resultado obtenido con las hipótesis emitidas. ¿Se te ocurre alguna consecuencia de interés?

Comentario:

Teniendo en cuenta que el movimiento analizado en la actividad anterior es circular y uniforme, tiene sentido preguntarse por el período del movimiento $T = 2\pi/\omega$, donde $v = \omega R$ (siempre y cuando no salga de la región en la que existe campo magnético).

Dada la estrecha relación entre T y v, y la de v con R, se espera que la hipótesis de variables de T sea muy parecida a la de R (es por tanto una buena oportunidad para desarrollar el trabajo autónomo de los estudiantes). En todo caso, el valor del período es: $T = 2\pi m/qB$. Una vez calculado dicho período sería interesante analizar el resultado a la luz de las hipótesis previas, así como remarcar el hecho de la no dependencia de T ni con el radio ni con la velocidad; esto implicaría, por ejemplo, que si aumentásemos la velocidad, el radio no tendría que disminuir para que T fuese igual, lo que implicaría que la partícula podría describir circunferencias ‘grandes’ con velocidades ‘grandes’.



A.7 Valora de manera cualitativa y haz un dibujo del movimiento de una carga $-q$ que penetra con una cierta velocidad, respecto de un sistema de referencia inercial, en un campo magnético uniforme en dirección no perpendicular a él.

Sugerencia: es útil descomponer la velocidad en sus componentes paralela y perpendicular al campo.

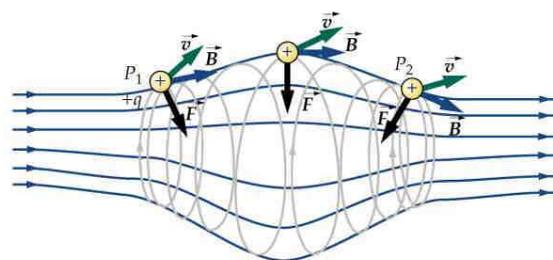
Comentario:

La resolución de esta actividad nos da la oportunidad de mostrar que el movimiento de una carga, en un campo magnético, no es siempre circular. Efectivamente, en este caso basta descomponer el estudio del movimiento en dos ejes (se supone que trabajamos en un plano), para llegar a la conclusión de que el movimiento resultante es helicoidal.





A.8 Cuando el campo magnético no es uniforme el movimiento de la carga puede ser ciertamente complejo. En la figura se representa una ‘botella magnética’. Interpreta el dibujo y obtén de él toda la información que puedas.

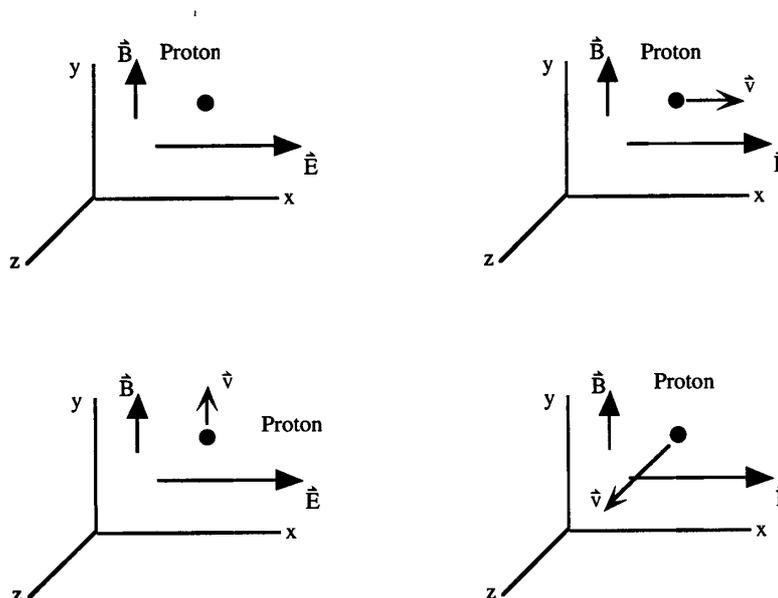


Comentario:

El enfoque de esta actividad tendrá más bien un carácter cualitativo y será el profesor el mayor protagonista a la hora de trabajarla. También tiene un objetivo C/T/S, puesto que al hilo de la resolución de la actividad, se puede comentar una ‘aplicación’ en nuestro planeta a través de los llamados cinturones de Van Allen, y cómo cuando una pequeña fracción de partículas escapa en los polos de su confinamiento magnético, dan lugar a las auroras, más conocidas por auroras boreales (en el polo norte) o australes (polo sur).



A.9 Explica razonadamente la fuerza que soportará el protón de la figura. Fuerza de Lorentz.



Comentario:

Con esta actividad, en principio, se trataría de que el estudiante se pusiera en la situación del observador del sistema de referencia y aplicara la superposición de fuerzas (eléctrica y magnética), con el fin de averiguar la fuerza total sobre el protón. Sin embargo, lo más importante es hacerle notar que la fuerza resultante



es la llamada fuerza de Lorentz: $\vec{F}=q\left[\vec{E}+(\vec{v}\times\vec{B})\right]$ que, como se verá en temas siguientes, desempeñará, junto con las leyes de Maxwell, aportaciones sustanciales al estudio del Electromagnetismo.

3. ¿Es la ley de Lorentz una simple consecuencia del Principio de Superposición o implica, desde el punto de vista físico, algo más profundo?

Hemos visto que tanto el campo magnético como la fuerza magnética dependen del sistema de referencia inercial elegido. Imaginémosnos que para analizar un cierto proceso electromagnético elegimos, inicialmente, un cierto sistema de referencia y posteriormente cambiamos dicho sistema, (suponemos que el nuevo sistema de referencia tiene una velocidad constante respecto del primero que no es comparable a la velocidad de la luz: $v\ll c$), en esas circunstancias...



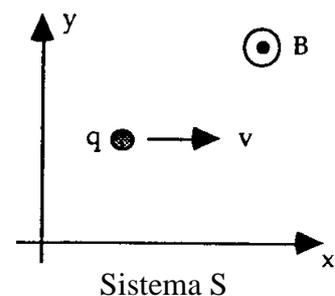
A.10 ¿Crees que la fuerza de Lorentz que actúa sobre una carga eléctrica será distinta en el nuevo sistema de referencia?, ¿Crees que los campos magnético y eléctrico serán diferentes en el nuevo sistema de referencia?

Comentario:

La pregunta tiene como meta fundamental averiguar las ideas previas de los estudiantes respecto de la invariancia o no de la fuerza de Lorentz, así como de los campos eléctrico y magnético, cuando cambiamos de sistema de referencia inercial (bajo el supuesto de que la velocidad entre sistemas de referencia no sea comparable a la de la luz). Una vez hecho este análisis, si no hubiera salido ya en la discusión, confirmar por parte del profesor, que, en ese supuesto, la fuerza de Lorentz es un invariante respecto a todos los sistemas de referencia inerciales (no parece lógico que sólo por cambiar de observador las cargas estuviesen sometidas a fuerzas distintas). Con respecto a los campos, donde es previsible que se afirme que tampoco van a cambiar; se esperará a analizar las siguientes cuestiones...



A.11 Considera un sistema de referencia, S, en el que un imán está en reposo creando un campo magnético \mathbf{B} como el que aparece en la figura, y una carga eléctrica $+q$ en movimiento con una velocidad \mathbf{v} . Calcula las componentes de los campos \mathbf{E} y \mathbf{B} así como las de la fuerza de Lorentz que soporta la carga. (Se suponen despreciables los campos que genera la carga q)



Comentario:

Se trata, en primer lugar, de utilizar la fuerza de Lorentz en un supuesto en el que el observador esté en reposo y vea moverse a la carga de la manera que indica la figura (típico caso que, casi en exclusiva, analizan los libros de texto).



Veamos su solución pormenorizada:

$$\vec{E} = (0,0,0)$$

$$\vec{B} = (0,0,B) \Rightarrow \vec{v} \times \vec{B} = -vB\hat{u}_y \Rightarrow \vec{F} = (0,0,0) + (0, -qvB, 0) = (0, -qvB, 0)$$

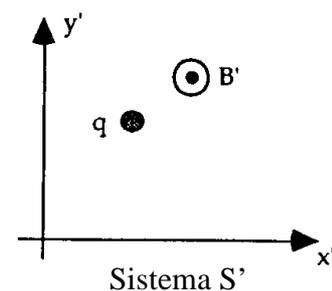
$$\vec{v} = (v, 0, 0)$$

Sería una fuerza dirigida en el sentido contrario al eje Y. En este caso, además, el observador la ‘vería’ como una fuerza exclusivamente magnética.



A.12 Consideremos ahora un sistema de referencia S' , donde la carga esté en reposo, ver figura. ¿Existiría en ese sistema de referencia un campo eléctrico distinto al vector nulo?, ¿cómo y cuál tendría que ser?

Relación entre campos eléctricos al cambiar de sistema de referencia (Transformada de Lorentz).



Comentario:

Partiendo del hecho, constatado por la teoría de la Relatividad, de la invariancia de la fuerza de Lorentz cuando utilizamos sistemas de referencia inerciales distintos, (siempre que la velocidad entre ellos no sea comparable a la de la luz), y puesto que el campo magnético actúa sólo sobre cargas en movimiento, parecería que, en este caso, la ley de Lorentz no es invariante. Veremos que esta aparente incoherencia no se da y, además, se presentará, por parte del profesor, la denominada ‘transformada de Lorentz para el campo eléctrico’.



Veamos la resolución detalladamente:

Teniendo en cuenta que la fuerza de Lorentz es un invariante y que en el Sistema S' no experimenta fuerza magnética alguna, únicamente un campo eléctrico puede explicar la fuerza a la que está sometida la carga y que tiene un valor obtenido en la actividad anterior. Ese campo será tal que cumpla la relación siguiente: $q\vec{E}' = (0, -qvB, 0) \Rightarrow \vec{E}' = (0, -vB, 0)$.

Por lo tanto se ve que para el observador de este sistema de referencia existe un campo eléctrico como el obtenido; así que al pasar del sistema de referencia S al S' el campo eléctrico se ha modificado. El observador de S' diría que la fuerza que soporta la carga, es de índole eléctrica.



La transformada de Lorentz (para el campo eléctrico), en su vertiente más general, afirma que: $\vec{E}' = \vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})$ (1), donde v representa la velocidad del

sistema de referencia S' respecto del S y \vec{E} el campo eléctrico medido por S (pero no creado por q).



A.13 Supongamos que tenemos una carga eléctrica estacionaria respecto del sistema de referencia S. Por otro lado, tenemos otro sistema de referencia S' moviéndose con velocidad \mathbf{u} respecto del sistema de referencia S. En el sistema S', ¿crearía la carga q un campo magnético B'? Razónalo. ¿Cuánto valdría?

Comentario:

Se debería llegar a concluir la existencia de un campo magnético, B', respecto del sistema S' que ha sido creado por la carga q, ya que con respecto al observador S' la carga está en movimiento con una velocidad $-\mathbf{u}$; así que bastará aplicar la ley de Biot y Savart para calcular el campo B'.



Aplicando la ley de Biot y Savart el campo sería:
$$\vec{B}' = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{u} \times \vec{u}_r}{r^2}$$



A.14 Relacionado con la actividad anterior, ¿debería existir algún campo en el sistema S?, ¿cómo sería?, ¿qué relación habría entre el campo en S y el campo magnético en S'? Dato: $\epsilon_0\mu_0 = 1/c^2$.

Relación entre campos magnéticos al cambiar de sistema de referencia (Transformada de Lorentz).

Comentario:

El objetivo fundamental de la actividad, es encontrar la relación entre los campos magnéticos en los dos sistemas. Para ello, en primer lugar, sería deseable que los estudiantes adviertan que el B' calculado en la actividad anterior se puede expresar en función del valor del campo eléctrico creado por q en el sistema S (que en ese sistema es el único campo, y que vendrá dado por la ley de Coulomb). Veamos como:



$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{u}_r$$
 (ii). Llevando el valor de (ii) a (i) de la actividad anterior, y teniendo en cuenta el dato de la actividad que estamos realizando \Rightarrow

$$\vec{B}' = -\frac{1}{c^2} E(\vec{u} \times \vec{u}_r) = -\frac{1}{c^2} (\vec{u} \times E\vec{u}_r) = -\frac{1}{c^2} (\vec{u} \times \vec{E})$$
 donde c es la velocidad de la luz y u la velocidad de un sistema respecto del otro.

Posteriormente el profesor completará la expresión más general que relaciona los campos magnéticos en los dos sistemas (transformada de Lorentz para campos magnéticos).

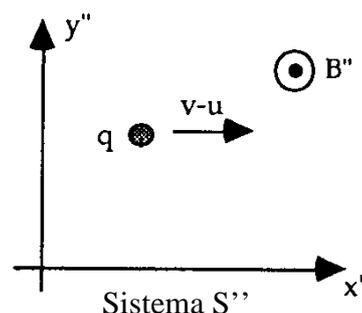


$$\vec{B}' = \vec{B} - \frac{1}{c^2} (\vec{u} \times \vec{E})$$
 (2). Como se observa, para $u \ll c$ (que es nuestro caso) los dos campos magnéticos son prácticamente idénticos.

Obsérvese que para relacionar los campos magnéticos, hemos seguido otra táctica distinta a aquélla que hemos utilizado para encontrar la relación entre los campos eléctricos; en concreto, en las actividades A.13 y A.14, hemos considerado los campos creados por q , mientras que en las A.11 y A.12, hemos analizado el efecto que sobre q producían ciertos campos, así cómo variaban éstos al cambiar de sistema de referencia. En otro orden de cosas, vemos que la carga q crea en el sistema S un campo eléctrico, mientras que en el S' , además, uno magnético.



A.15 Consideremos, ahora, un sistema de referencia inercial, S'' , moviéndose con velocidad $u < v$, respecto del sistema S , ver figura. ¿Cómo serían y cuánto valdrían los campos que se observan referidos a este sistema S'' ? En función del resultado anterior, ¿cuál sería la fuerza que soportaría la carga q en el sistema S'' ?



Comentario:

Se trataría de certificar que, para un caso más general, las expresiones que relacionan los campos eléctricos y magnéticos (transformadas de Lorentz), obtenidas en las actividades A.12 y A.14 son válidas. Además, volver a corroborar, que la fuerza de Lorentz es un invariante. A continuación presentamos una solución detallada del problema.

Utilizando las ecuaciones (1) y (2) (Transformadas de Lorentz) tendríamos:

$$\vec{E}'' = (0, 0, 0) + \vec{u} \times \vec{B}; \quad \vec{u} \times \vec{B} = -uB\vec{u}_y$$

$$\vec{E}'' = (0, -uB, 0)$$

$$\vec{B}'' = (0, 0, B) - \frac{1}{c^2} [(u, 0, 0) \times (0, 0, 0)] = (0, 0, B)$$

Luego la fuerza a la que estará sometida la carga será:

$$\vec{F}'' = q\vec{E}'' + q[(\vec{v}-\vec{u}) \times \vec{B}''] \quad \text{sustituyendo datos y haciendo el producto}$$

vectorial:

$$\vec{F}'' = (0, -quB, 0) + q[0, -(v-u)B, 0] = (0, -qvB, 0)$$

A la vista del resultado obtenido se demuestra que la fuerza que soporta la carga es un invariante, basta cotejar este resultado con los obtenidos en las actividades A.11 y A.12.



A.16 Un estudiante afirma: ‘Los campos eléctrico y magnético son aspectos de una misma entidad física, de la misma manera que un mismo objeto que sea visto desde diferentes ángulos’, ¿estarías de acuerdo con él? En función de lo anterior, ¿qué genera un imán?



Comentario:

Esta actividad, que es el colofón a las cinco anteriores debería servirnos para asumir que la electricidad y el magnetismo no son otra cosa que diferentes caras de una misma entidad física; a fin de cuentas, la 'fuente' es la misma: la carga eléctrica, bien en reposo o bien en movimiento, pero esta última característica depende sólo del observador. Como un ejemplo, muy familiar para los estudiantes, de aplicación de lo anterior se pregunta acerca de la creación de campos (eléctrico o magnético) por parte de un imán, según quien sea el observador en cuestión. En este sentido el imán puede crear algo más que simplemente un campo magnético..., crea algo que aparece como un campo magnético para un observador que lo percibe estacionario, pero para un observador que lo ve en movimiento el imán crea un campo eléctrico también; juntos se complementan dando lugar a la misma realidad dinámica definida por la fuerza de Lorentz. Es decir, a partir de este momento, las fuerzas eléctrica y magnética, se abordarán de forma conjunta, a través de una nueva y compleja expresión, la ley de Lorentz, de tal manera que aunque una de ellas varíe, según el observador que las mida, su suma es un invariante (cuando $v \ll c$) y, por lo tanto, representa un concepto físico.



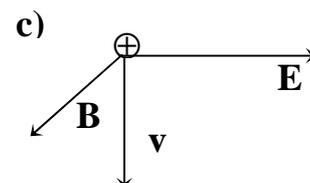
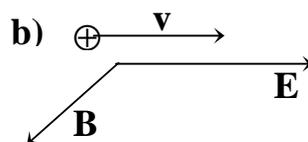
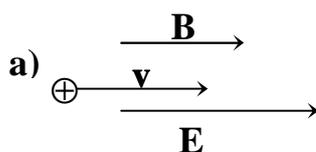
En definitiva, que para sistemas de referencia inerciales, en los que se cumple que $v \ll c$, aunque los campos, y por lo tanto los sumandos que aparecen en la fuerza de Lorentz puedan variar, la suma de ellos es un invariante.

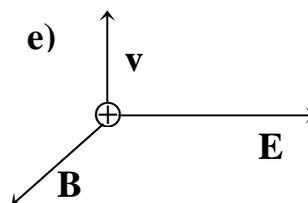
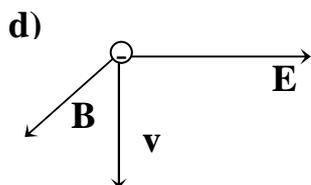
4. ¿Qué aplicaciones prácticas se derivan de la fuerza de Lorentz?



A.17 Una partícula cargada penetra con velocidad v respecto a un observador inercial, en una región en la que existen campos uniformes eléctrico y magnético. Para cada una de las situaciones representadas a continuación, indica si:

- La partícula no se desvía, independientemente del valor de su velocidad.
- La partícula se desvía, independientemente del valor de su velocidad.
- La partícula no se desvía para un determinado valor de su velocidad y sí lo hace para otros. En este caso determinar el valor de la velocidad para la que la partícula no se desvíe de su trayectoria, y determinar hacia donde se desvía para otras velocidades.





Comentario:

En esta actividad tenemos una primera oportunidad para llegar a comprender, mediante sus representaciones gráficas, cuáles han de ser las relaciones entre los vectores E, B y v para que las partículas cargadas puedan ser discriminadas en función de su velocidad. Este análisis, nos permitirá abordar, con conocimiento de causa, el denominado ‘selector de velocidades’.



A.18 Explica, en base a los resultados de la actividad anterior, el significado del siguiente párrafo extraído de un texto de física: “Un dispositivo, llamado selector de velocidades, trata de conseguir un haz de partículas con velocidades casi idénticas. El haz debe pasar a través de dos agujeros pequeños, en una línea paralela al producto vectorial de E por B. Los campos eléctrico y magnético son uniformes y perpendiculares entre sí. Sólo las partículas cuya velocidad es casi igual a E/B pueden pasar por ambos agujeros.”

Comentario:

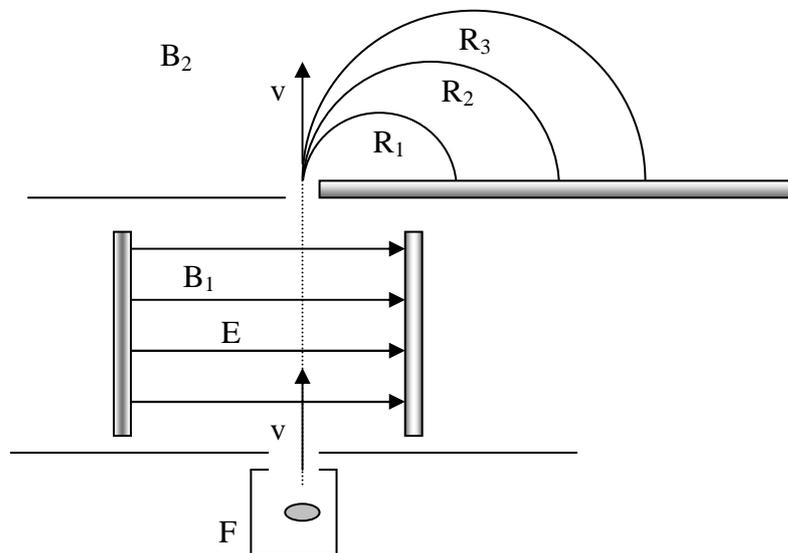
Se trataría de realizar una descripción del selector de velocidades haciendo uso de las conclusiones de la actividad anterior. En concreto, en las situaciones c) y d) de la actividad previa, en la que los campos E y B son ‘cruzados’, la partícula (positiva o negativa), entra en la dirección de $\vec{E} \times \vec{B}$, lo que permitirá discriminar a las partículas según sus velocidades, de tal forma que si $v = E/B$ no sufrirán desviación alguna. Esta es la base del selector de velocidades que se describe.



A.19 En la figura se representa de forma esquemática el espectrómetro de masas diseñado por Bainbridge. F, es una fuente de iones que salen acelerados bajo una diferencia de potencial. Posteriormente estos iones atraviesan un selector de velocidades. Finalmente penetran en una región en la que existe un campo magnético y son desviados. Los impactos se recogen en una placa fotográfica.

- Explica, cualitativamente, lo que ocurre con los iones (misma carga, distinta masa) en cada una de las tres fases del proceso.
- ¿Por qué crees necesaria la existencia de un ‘selector de velocidades’ en la 2ª fase?
- ¿Qué dirección y sentido tendrían que tener, en este caso, los campos magnéticos B_1 y B_2 ?

- d) ¿De qué magnitudes dependerá el radio, R , de cada trayectoria semicircular que se produce en la 3ª fase?
- e) Calcula, en función de dichas magnitudes, el radio, R , de cada trayectoria.



Comentario:

Situación problemática que permite aplicar conceptos previamente analizados y desarrollar aspectos metodológicos de interés, los cuales se solicitan explícitamente. Veamos el desarrollo de algunas de las cuestiones planteadas:

a) Los iones, en la primera fase son acelerados bajo una diferencia de potencial V por lo que serán emitidos con una velocidad v que se podría deducir

de: $qV = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \left(\frac{2qV}{m}\right)^{1/2}$. Con la segunda fase conseguimos que los

iones que salgan de ella tengan la misma velocidad (en este caso dicha velocidad es $v = E/B_1$; para ello B_1 deberá ir dirigido hacia adentro). En la tercera fase, los iones que llegan con la misma velocidad describirán distintas semicircunferencias debido a la distinta masa, por lo que los iones de la misma carga pero diferente masa se podrán discriminar (función del espectrómetro de masas). En este caso el campo B_2 deberá dirigirse hacia fuera.



b) La existencia del selector se hace imprescindible para tener la certeza que los diferentes radios en la tercera fase no se deben a que llegan a ella partículas que teniendo la misma carga y masa pero con diferente velocidad; si esto fuera así no podríamos utilizar el aparato como discriminador de partículas con la misma carga, pero diferente masa.

d) Esta situación ya se encuentra previamente analizada en la actividad A.5, con $R = f(m,v,q,B_2)$; en este caso, $v = f(E_1,B_1)$. Como respecto de m , q , B_2 , ya se hizo la discusión en aquella actividad, haremos sólo la valoración de v , veamos:

Si $E_1 \uparrow \Rightarrow v \uparrow$ (de las partículas sin desviarse) ya que la F_m debe crecer $\Rightarrow R \uparrow$
 Si $B_1 \uparrow \Rightarrow v \downarrow$ (de las partículas sin desviarse), debe compensarse con B_1 para que
 $F_m = F_e \Rightarrow R \downarrow$

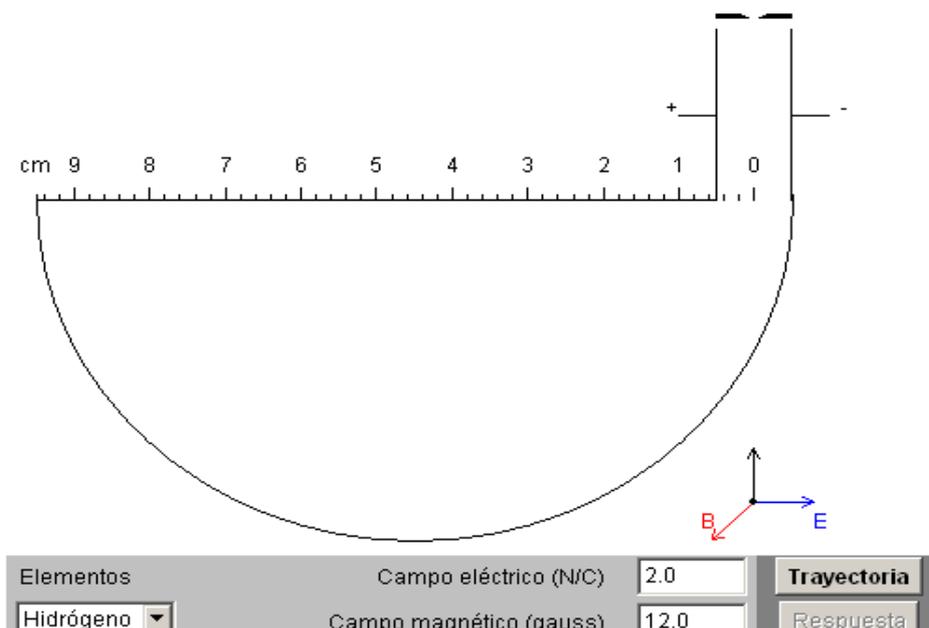
e) Siguiendo un proceso equivalente al que se desarrolló en la actividad A.5, el valor del radio pedido sería: $R = mE/qB_1B_2$.



A.20 En la simulación ‘El Espectrómetro de masas’ puedes contrastar algunas de las valoraciones que has realizado en la actividad previa,

A.19:

- Dependencia del radio de las trayectorias con el campo eléctrico del selector de velocidades.
- Dependencia de ese mismo radio con el campo magnético existente en el selector de velocidades y el que hay en la 3ª fase.
- Desde un punto de vista cualitativo, ambas dependencias, la del campo eléctrico y la de los campos magnéticos, ¿tienen alguna diferencia? En el caso de que así fuera, ¿para qué te podría valer dicha diferencia a la hora de manejar el programa de simulación?



Comentario:

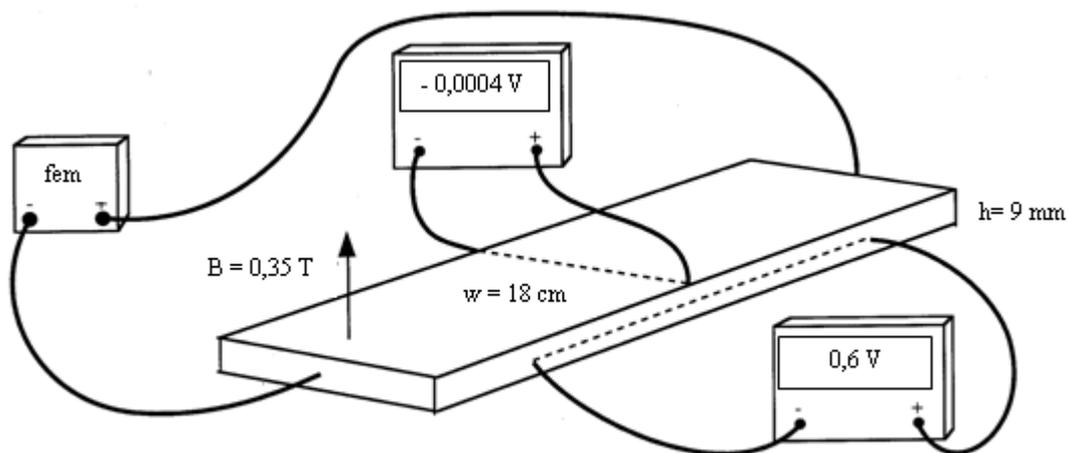
En este fislet se podrán cotejar los diferentes aspectos tratados en la actividad anterior. En cuanto al apartado c) se plantea porque en la simulación hay elementos para los que las trayectorias, (en función de los datos que se dan por defecto) no se discriminan del todo; para ello es conveniente disminuir los radios de los trayectorias, lo que podemos hacer aumentando E y/o disminuyendo los B.





A.21 Una plancha de material desconocido es conectada a una fuente de alimentación como se indica en la figura. Existe un campo magnético uniforme de 0.35 T perpendicular a la plancha y dirigido hacia arriba. Al conectar dos voltímetros a la plancha, se obtienen las lecturas indicadas en la figura. Las conexiones del voltímetro colocado en el ancho de la plancha, se realizan de manera que los conectores queden justamente el uno frente al otro. El voltímetro que indica una medida de 0.6 V sitúa los electrodos distantes entre sí 20 cm.

a) Si sólo existe un tipo de carga móvil en el material, determinar su signo. Efecto Hall.



b) ¿Cuál es la velocidad de desplazamiento de las cargas móviles? c) ¿Cuál es la movilidad de las cargas móviles? d) La intensidad de la corriente a lo largo de la plancha es de 0.3A. Si cada partícula portadora sólo transporta una carga ($|q|=e$), ¿cuántas cargas móviles hay en 1m^3 de este material? e) ¿Cuál es la resistencia eléctrica de esta plancha?

Comentario:

Situación problemática para introducir el efecto Hall. En la primera parte, la contribución del profesor es necesaria. Además, este problema permite conectar con otras lecciones del temario (corriente eléctrica) y en estos aspectos los estudiantes deberían ser capaces de desenvolverse sin la colaboración del profesor. Veamos con cierto detalle el primer apartado:

- La lectura del voltímetro que marca $-0,0004\text{ V}$, indica que la parte posterior de la plancha se encuentra a mayor potencial que la parte frontal, por lo tanto existe un campo eléctrico transversal, E_H , (éste es el efecto Hall). Las cargas se desviarían hacia las paredes aludidas hasta que $F_m = F_{e,Hall}$



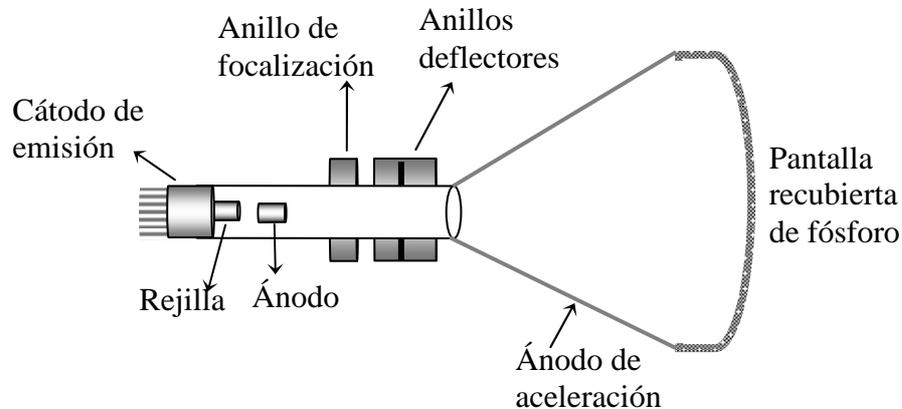
- Por otro lado, la corriente convencional fluye en la misma dirección que el campo E , que apunta hacia potenciales decrecientes, en este caso y dada la lectura del otro voltímetro, hacia 'abajo'. Esto va a servir, junto con lo anterior, para conocer el signo de los portadores de carga que se mueven; en este caso se deberían descartar las cargas negativas.



Finalmente, destacaríamos que lo que se nos dice en el enunciado, relativo a la posición de los voltímetros, no es algo baladí, ya que al ser $V \gg V_H$, los bornes del 'voltímetro Hall' hay que situarlos justamente enfrentados pues si no distorsionarían fuertemente la medición de éste.



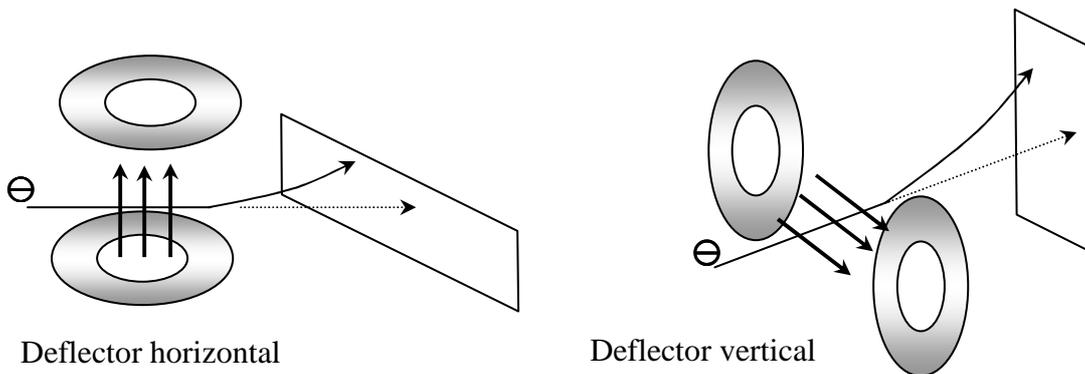
A.22 De un modo esquemático podemos resumir el funcionamiento del tubo de imagen de un televisor en blanco y negro como sigue: Los puntos de luz se forman en el interior de la pantalla cuando los electrones colisionan con el fósforo que la recubre. Estos electrones son emitidos por una superficie a altas temperaturas en el cuello del tubo de imagen y son acelerados hacia la carga positiva que contiene la pantalla. Cuando los electrones chocan contra el fósforo, le transmiten energía y haciendo uso de esta energía el fósforo se vuelve luminiscente dando lugar al punto de luz. Responde, a continuación, a los siguientes interrogantes:



- 1) Una vez que los electrones salen de la rejilla del cátodo de emisión formando un estrecho haz, ¿qué crees que les ocurrirá mientras avanzan hacia la pantalla?
- 2) ¿Cómo podríamos solucionar este problema? (Observa el esquema del cuello del tubo de imagen).
- 3) El haz de electrones deberá impactar sobre algún punto de la pantalla de fósforo, pero no necesariamente en el centro. Es preciso desviar los electrones hacia las diferentes partes de la pantalla. Para ello se utilizan los anillos deflectores. Explica razonadamente el funcionamiento básico de los deflectores horizontales y verticales representados en las figuras siguientes:

4) Cuando el haz de electrones impacta contra la pantalla de fósforo, se transfiere energía al fósforo y entonces este emite luz blanca. Crear una imagen brillante requiere mucha energía, por lo que los electrones deben ser acelerados en su camino hacia la pantalla. Una fuente de alimentación de alto voltaje (15.000, 25.000V) introduce carga positiva en la pantalla y en el ánodo acelerador que la rodea, y esta carga atrae a los electrones. En un aparato de TV se puede leer la siguiente advertencia: AVISO, *Este aparato contiene peligrosos altos voltajes incluso cuando ha sido desconectado.* ¿A qué crees que se puede deber esta circunstancia?

5) Los electrones del tubo de imagen salen de la rejilla a muy bajas velocidades. Si son acelerados bajo una ddp de 15.000V entre la rejilla y la pantalla, ¿con qué velocidad alcanzarán la pantalla? f) Con objeto de que los electrones impacten en la parte superior de la pantalla se necesita desviarlos con un radio de curvatura de unos 20cm. Calcular el campo magnético necesario.



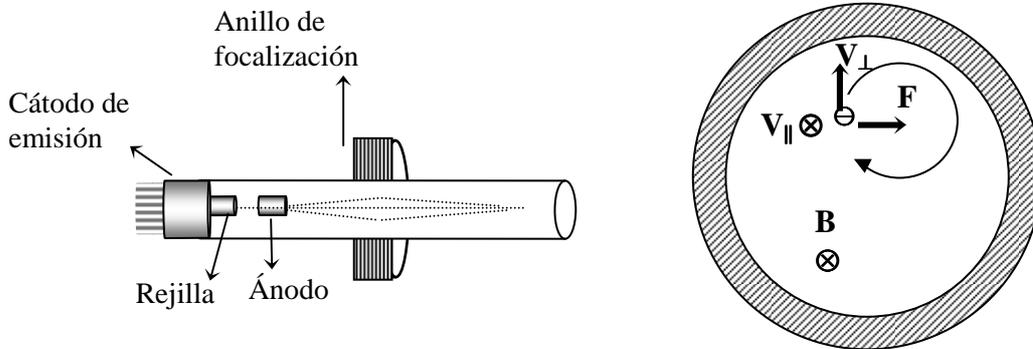
Comentario:

El objetivo de esta actividad es aplicar los conceptos estudiados en la lección a una situación CTS. Las valoraciones son bastante cualitativas, aunque al final se piden cálculos sencillos. A continuación, presentamos un análisis más detallado de cómo se podría abordar esta situación.

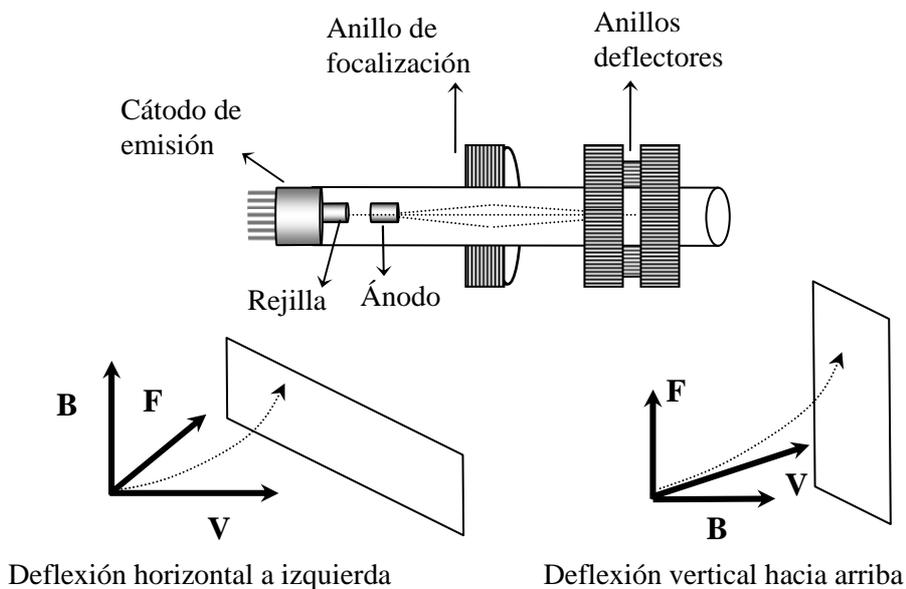
1. Efectivamente los electrones emergen del cátodo cargado negativamente. Este cátodo se calienta por medio de un filamento y es por eso que los tubos de imagen tardan unos segundos en activarse. La rejilla, que está cargada negativamente, contiene un pequeño agujero a través del cual algunos electrones pueden pasar. Estos electrones son atraídos por el ánodo cargado positivamente y forman un estrecho haz. Sin embargo, los electrones del haz se repelerán entre sí, por lo que deberán ser redirigidos para que todos ellos impacten en el mismo punto de la pantalla.
2. Se hace uso de la interacción magnética sobre cargas en movimiento. Para crear el campo magnético adecuado se colocan espiras de corriente rodeando el cuello del tubo de imagen (anillo de focalización), de manera que el campo magnético sea paralelo a la velocidad de avance de los electrones y



perpendicular a la velocidad causada por la repulsión entre ellos. Los electrones del haz avanzan en espiral como consecuencia de las aceleraciones que sufren en la dirección del cuello del tubo y de la interacción magnética que hace que curven su trayectoria.



3. Un par de espiras, por encima y por debajo del cuello del tubo de imagen, producen un campo magnético vertical que desvía el haz de electrones horizontalmente. Ajustando la magnitud y el sentido de la corriente que circula por las espiras, se puede controlar la posición horizontal de impacto sobre la pantalla. (Los estudiantes pueden realizar un análisis detallado de las diferentes posibilidades).
4. Los televisores utilizan condensadores para mantener la carga eléctrica separada, en la fuente de alimentación de alto voltaje que utilizan. Las elevadas diferencias de potencial pueden persistir durante muchos minutos tras ser desconectado.



5. a) Aunque no conozcamos la distancia que recorren los electrones, considerando el carácter conservativo del campo eléctrico se tendrá: $\Delta E_k + \Delta E_p = 0$; $q\Delta V = \frac{1}{2}mv^2$ y, por tanto,
 $v = (2 q\Delta V/m)^{1/2} = (2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5 \cdot 10^4 / 9 \cdot 10^{-31})^{1/2} = 7,3 \cdot 10^7 \text{ m/s}$, que es casi la cuarta parte de la velocidad de la luz.
- b) De acuerdo con análisis ya realizados, el campo magnético se relaciona con el radio de la circunferencia descrita por el electrón por medio de $B = (vm/qR) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ T}$.

6. Observaciones:

Los grises se consiguen controlando la corriente electrónica del haz. Este control se realiza ajustando la cantidad de carga negativa en la rejilla del cuello del tubo de imagen. Cuanto más carga negativa en la rejilla, más dificultad para los electrones que pretenden atravesarla y menor corriente electrónica en el haz.

La imagen completa se consigue escaneando las 625 líneas que componen la pantalla a alta frecuencia. Aproximadamente tarda 1/60 de segundo en completar la pantalla.

5. ¿Qué implicaciones se derivan de la fuerza magnética entre corrientes?



A.23 Ya que las corrientes eléctricas no suponen otra cosa que cargas en movimiento, cabe esperar que la acción de campos magnéticos sobre corrientes origine fuerzas, de carácter magnético.

- Aplicando esta idea (es decir, la expresión matemática asociada a ella) y la definición de corriente, obtén la fuerza sobre un elemento de corriente $I \cdot d\mathbf{l}$
- Extiende la expresión obtenida, al caso en que el conductor sea delgado y tenga una longitud L , en una región donde el campo sea constante.
- ¿Sería aplicable la expresión obtenida en el apartado anterior de esta actividad para el cálculo de la fuerza que un conductor rectilíneo ejerce sobre una espira de corriente?
- Dibuja las fuerzas entre un imán y un conductor rectilíneo.

Comentario:

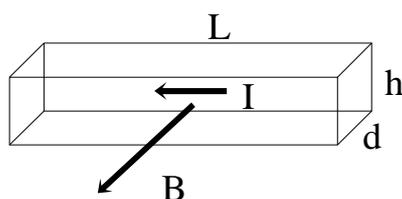
Con esta actividad se comienza un conjunto de ellas, que tienen por objetivo (en muchas ocasiones de gran aplicación tecnológica) valorar qué sucede cuando hilos de corriente se encuentran inmersos en un campo magnético. En ese sentido, en los primeros apartados obtendremos la ley de Laplace, hasta llegar al caso más general: $\vec{F} = \int I d\vec{l} \times \vec{B}$



En el apartado d) tratamos de incidir en la ley de acción y reacción fuera del contexto de la Mecánica, ya que los estudiantes presentan muchas dificultades en su aplicación. Así, éstos deberían dibujar una fuerza sobre el hilo y otra igual y de sentido contrario sobre el imán con el que interactúa.



A.24 Un alambre de cobre recto de sección transversal cuadrada transporta una corriente I hacia la izquierda. En la región existe un campo magnético B uniforme y perpendicular (ver figura), para un observador en reposo.



- a) Obtener razonadamente la dirección y magnitud del campo eléctrico transversal debido al efecto Hall para dicho observador. Explica el proceso.
- b.1) Calcula la fuerza de Lorentz en la dirección transversal sobre los portadores de carga (electrones) una vez alcanzado el equilibrio. b.2) Repite el cálculo para los núcleos estáticos positivos del cobre (módulo, dirección y sentido). b.3) Calcula la fuerza magnética neta sobre el alambre conductor (módulo, dirección y sentido).
- c) En base a los resultados anteriores razona si estás de acuerdo con la siguiente afirmación: “El campo eléctrico Hall produce una fuerza eléctrica sobre los núcleos positivos estáticos y a través de ellos sobre todo el alambre, que juega el papel transmisor de la fuerza magnética sobre la totalidad del alambre”.

Comentario:

Como el icono de la actividad indica, al estudiante se le plantea la oportunidad de utilizar, en un ejemplo de aplicación, el conjunto de aspectos analizados en las actividades inmediatamente anteriores.

Con respecto al apartado c), el estudiante debería evaluar todas las fuerzas que se ejercen sobre las partículas positivas y negativas, así como en las paredes, para llegar a la conclusión que, aunque es inicialmente el desencadenante del proceso la fuerza magnética sobre los portadores de carga móviles, finalmente la resultante de todas las fuerzas coincide con la que el campo eléctrico Hall ejerce sobre los núcleos del material.



A.25 ¿Puedes explicar cuál es la razón por la que dos conductores paralelos, por los que pasa una determinada corriente, pueden

atraerse? ¿En qué condiciones podrían repelerse?

Suponiendo que por ambos conductores circule la misma corriente, ¿cuál será ésta para que los conductores separados por una distancia de 1m. se atraigan o repelan con una fuerza por unidad de longitud de $2 \cdot 10^{-7} \text{ N/m}$?

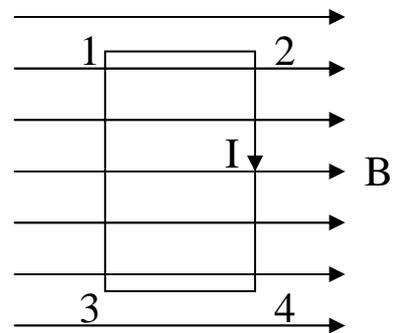
Definición de Amperio.

Comentario:

Se trata en esta actividad, de analizar, a la luz de lo que se observado en las actividades previas, la famosa experiencia de Ampère sobre los dos hilos rectilíneos, que se estudia en todos los libros de texto y que, a día de hoy, sirve de base para definir el amperio. Es una buena oportunidad para que los estudiantes se entrenen en la tarea de búsqueda bibliográfica.



A.26 Determina la fuerza, debida al campo magnético, que soporta el circuito recorrido por una intensidad de corriente I cuando se encuentra en una región con un campo magnético constante B .



- a) ¿Puedes interpretar lo que sucede en el circuito?
- b) En el siguiente fislet, ‘Fuerza y momento sobre una espira’, puedes observar cómo sería la fuerza y el momento sobre una espira, ¿es coherente con lo que has previsto en el apartado anterior.

Momento $7.2E-4 \text{ Nm}$

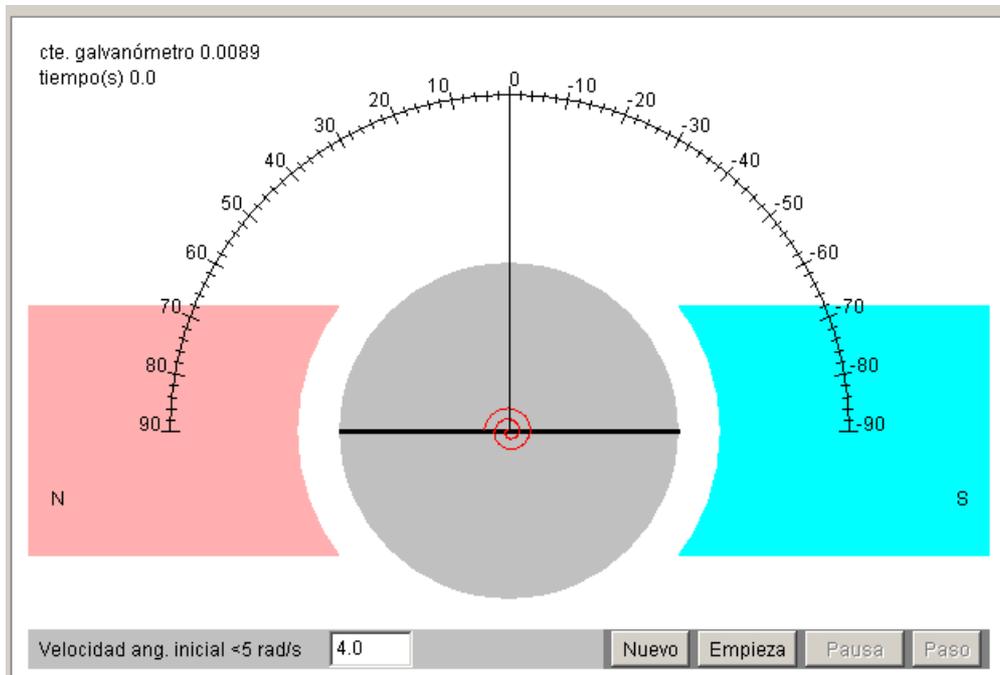
— corriente
— campo magnético
— fuerza

Campo magnético (<50 gauss) 40.0 Angulo 0 Empieza Pausa Paso
 Intensidad (A) 3.0

c) Motores y Galvanómetros.



d) Ver la simulación del ‘Galvanómetro Balístico’ para visualizar la base física de su comportamiento, pero sin realizar su cálculo.



Comentario:

En primera instancia se trataría de aplicar la ley de Laplace a una espira rectangular, inmersa en un campo magnético constante, con el fin de observar su movimiento de giro.



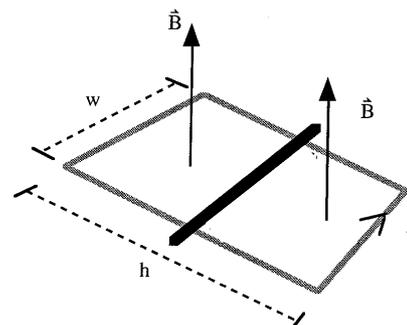
Finalmente, o bien el profesor, o bien a través de un ‘rastreo’ bibliográfico de los propios estudiantes, se abordaría las bases físicas fundamentales para el entendimiento de los motores y de los galvanómetros. Un estudio tecnológico más a fondo sería motivo de análisis para otras asignaturas; en todo caso, en el programa de simulación se visualizaría el comportamiento de un galvanómetro.



6. ¿Podría un campo magnético, a través de la fuerza asociada a él, hacer girar una espira de corriente? y ¿trasladarla?..., ¿de qué dependería?



A.27 Considera una espira de corriente rectangular inmersa en un campo magnético uniforme, como se indica en la figura. Dibuja las fuerzas magnéticas que actúan sobre cada lado de la espira. ¿Qué tipo de movimiento provocaría en la espira?

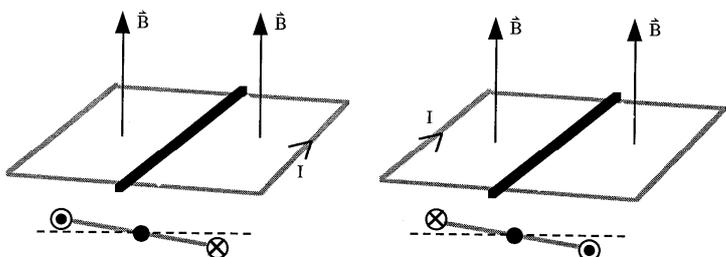


Comentario:

Se trata, por un lado, de que los estudiantes se entrenen en el cálculo vectorial inherente a la aplicación de la ley de Laplace y, por otro, que esa espira situada en un campo magnético constante va a moverse según un movimiento de rotación puro. Además con este problema, empezamos un recorrido que desembocará en la actividad A.30; actividad que tiene por objetivo comprender el comportamiento de una brújula.



A.28 Observa las figuras siguientes, ¿giraría la espira? Razónalo. A pesar de que en los dos casos sucede lo mismo, los dos estados no son idénticos; uno es ‘estable’ (si aparto la espira un poco de su posición de equilibrio vuelve a su posición inicial) y otro es ‘inestable’ (separada levemente del equilibrio se aleja de la posición anterior). ¿Cuál de los dos casos crees es ‘estable’? Explícalo.



Comentario:

Constatar que se trata de dos situaciones especiales, relacionadas con la actividad anterior, en el sentido de que en ambas la espira no giraría, pero que sin embargo no se trata de dos casos idénticos ya que aunque en ambos se da el equilibrio, uno de ellos es ‘estable’, el de la izquierda, y el otro es ‘inestable’. Es decir, en el caso de equilibrio estable, si separamos un poco la espira de esa situación, volverá por sí misma a la posición inicial; cosa que no sucede en el otro caso, en la que ya no retorna a la posición de partida.



A.29 Hablando en términos del momento magnético μ de la espira (concepto aparecido en el tema anterior), un estudiante afirma: “La espira de corriente tiende a girar de manera que los vectores \mathbf{B} y μ sean paralelos”, ¿estarías de acuerdo con él? En consecuencia, ¿a qué estado tiende la espira?

Comentario:

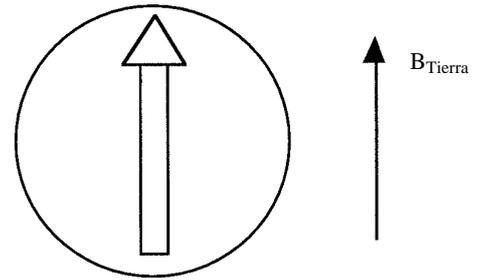
Se debería llegar a la conclusión, una vez analizada la cuestión anterior, de que la espira tendrá que girar de manera que \mathbf{B} y μ de la espira deben ser paralelos, porque así tiende a ubicarse en el estado de equilibrio estable.





A.30 Observa la figura, donde se ha esquematizado el campo magnético creado por la Tierra en una determinada zona de la misma, así como una brújula.

- Dibuja el momento magnético global de la brújula cuando apunta hacia el Norte. Explícalo.
- Si la brújula es apartada de la dirección Norte y luego es liberada ¿qué sucederá? Razónalo.



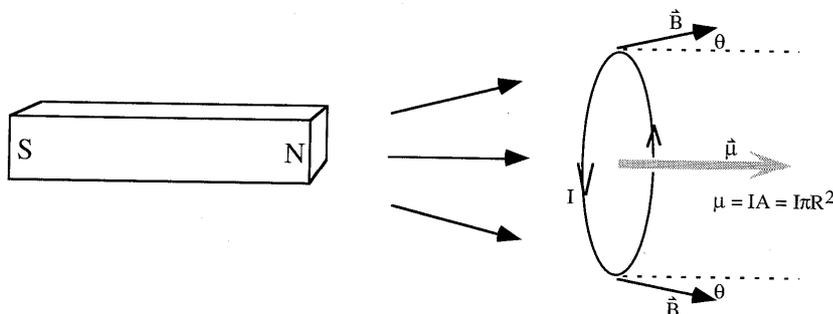
Comentario:

El objetivo sería que el estudiante fuese capaz de aplicar las conclusiones obtenidas en las actividades anteriores, A.28 y A.30, a la explicación del comportamiento de un elemento tan cotidiano y conocido para todos ellos como es el caso de una brújula.

En concreto, deberían hacer constar que la μ global de la brújula, que no es más que un imán y por lo tanto equivalente a una espira de corriente, sería paralelo al campo magnético de la Tierra, B_T , en esa zona puesto que tiende a quedarse en un estado de equilibrio estable y por lo tanto su momento magnético paralelo al B_T . Si la brújula fuera apartada de la dirección Norte y luego liberada, giraría para apuntar de nuevo hacia el Norte ya que la aguja es más estable cuando su momento magnético está alineado con el campo magnético de la Tierra, de manera que la brújula girará hasta que $\vec{\mu}$ y \vec{B}_T estén alineados de nuevo.



A.31 Observa la figura adjunta. Haz un dibujo indicando las fuerzas que actúan sobre cada pareja de elementos de la espira situados simétricamente respecto del centro de la misma (por ejemplo aquéllos donde está dibujado el campo magnético \mathbf{B}). ¿Girará la espira de corriente? Explícalo.



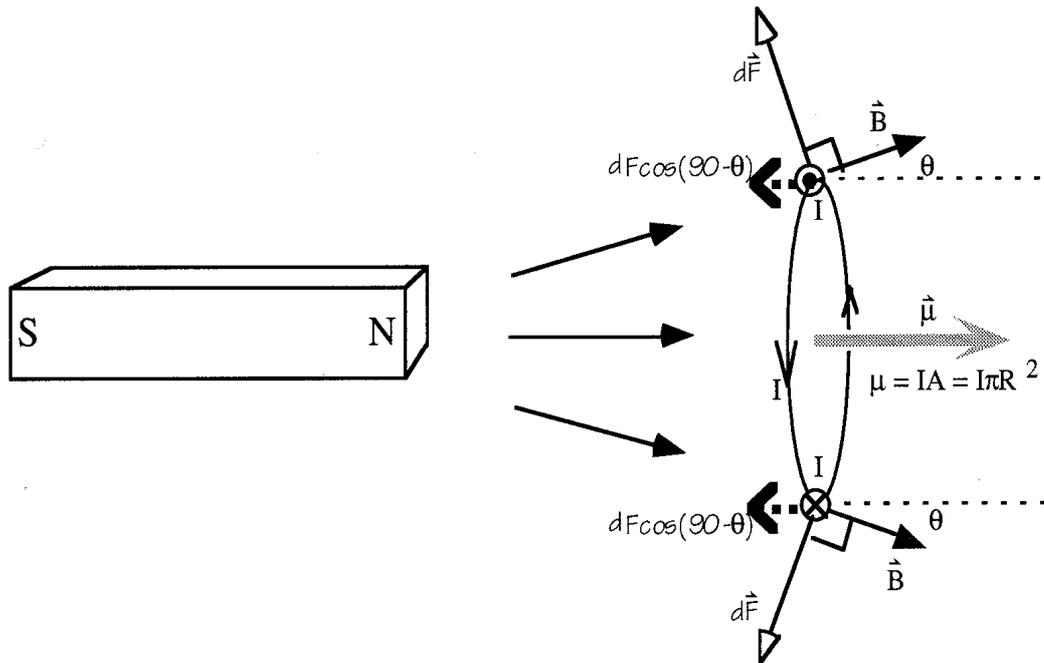
Comentario:

Una vez que en las actividades anteriores hemos visto que una espira de corriente, inmersa en un campo magnético uniforme, describía un movimiento de

rotación, llega el momento de comprobar si, desde el punto de vista mecánico, sucede lo mismo si el campo magnético no es el mismo en todos los puntos de la espira. (El que el campo magnético lo hagamos mediante un imán se debe a que en la actividad siguiente, fundamentalmente, retomaremos la idea de equivalencia en el comportamiento magnético de espiras e imanes).



En la siguiente figura se observa, dadas las fuerzas que actúan, que el movimiento, en este caso, será de traslación y no de rotación, como en los casos anteriores.



A.32 Tenemos los siguientes dos sistemas: a) por un lado, dos espiras que en el instante $t=0$ se encuentran como indica la figura 1. Si posteriormente hacemos pasar, por cada una de ellas, una intensidad de corriente I , en sentidos opuestos, se disponen como indica la figura 2. b) el otro sistema estaría formado por dos imanes, tal como indica la figura 3.

1º) ¿Ambos efectos repulsivos presentan alguna analogía entre sí?

2º) Explica detalladamente el comportamiento observado en el sistema a (pareja de espiras) y en el sistema b (pareja de imanes).

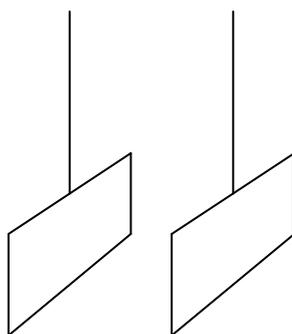


Fig.1

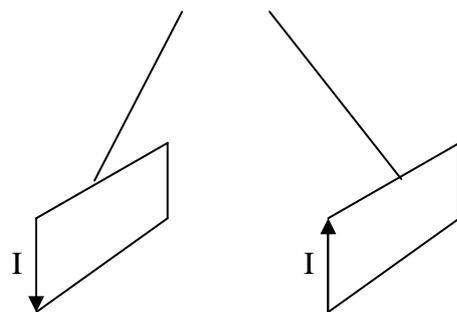


Fig.2



Fig.3

Comentario:

En esta cuestión se trata, para finalizar, de corroborar la equivalencia existente entre espiras e imanes y constatar, de alguna manera, la idea de Ampère, en el sentido de que los campos magnéticos son debidos siempre a corrientes eléctricas.