

Física. El campo magnético

3

Especialistas en contenidos:

- Rosa Adam
- Agustín Rela
- Jorge Sztrajman

Director científico:

- Alberto Maiztegui

serie/ciencias para la educación tecnológica

1. Análisis matemático. Sus aplicaciones
2. Física. Interacciones a distancia
3. Física. El campo magnético

Índice

La serie “Ciencias para la Educación Tecnológica”	9
Introducción	
• El interés de nuestros alumnos	13
• Nuestra propuesta de trabajo	14
• Un esfuerzo que merece nuestro apoyo	15
• Imanes a nuestro alrededor	16
• Para trabajar en clase	16
Primera sección. Investigando campos magnéticos	
• Una síntesis	21
• Acciones sobre corrientes	23
• Vector inducción magnética	27
• Embotellamiento de partículas cargadas	28
• Campo creado por una corriente	32
Segunda sección. Algo sobre los sistemas de unidades	
• Algunos problemas resueltos	38
Tercera sección. Actividades “Magnéticas”	51
Cuarta sección. Temas optativos	
• ¿Cómo se producen las auroras polares?	61
• Magnetismo en el interior de seres vivos	63
• El magnetismo terrestre	64
• Paleomagnetismo: La historia del campo terrestre	67
• Una idea para explicar el campo magnético terrestre	67
• Cuestiones paradójales	69
En pocas palabras	72
Clave de respuestas	75
Bibliografía	90

La serie “Ciencias para la educación tecnológica”

Con el título **Ciencias para la Educación Tecnológica**, estamos planteando desde el CeNET una serie de publicaciones que convergen en el objetivo de:

Acompañar a nuestros colegas docentes en la adquisición de contenidos científicos que les permitan una mejor definición, encuadre y resolución de los problemas tecnológicos que se enseñan en la escuela.

Porque, en Educación Tecnológica las ciencias básicas ocupan «una posición importante aunque subalterna e instrumental (...) La tecnología es un modo de ver el fenómeno de la artificialidad, y de analizar ‘sistémicamente’ los objetos tecnológicos desde su finalidad y no desde los fundamentos científicos en que se basa su funcionamiento.» (Ministerio de Cultura y Educación de la Nación. Consejo Federal de Cultura y Educación. Contenidos Básicos Comunes para la Formación Docente de Grado. Tercer Ciclo de la Educación General Básica y Educación Polimodal. “Contenidos Básicos Comunes del Campo de la Formación de Orientación de la Formación Docente de Educación Tecnológica”. Buenos Aires.)¹

Física. El campo magnético, el material que usted tiene en sus manos es una versión digital de la publicación del mismo nombre que, en 1994, elaboró el Programa de Perfeccionamiento Docente Prociencia-CONICET², del Ministerio de Cultura y Educación de la Nación Argentina y al que desde el CeNET nos proponemos continuar distribuyendo³.

Objetivo general:

- Describir las acciones magnéticas a distancia, a través del concepto de campo.

Objetivos específicos:

- Reconocer la existencia de un campo magnético.
- Medir la intensidad de inducción magnética en un punto.
- Inferir el tipo de movimiento que tendrá una partícula eléctricamente cargada dentro de un campo magnético uniforme.
- Interpretar gráficos del módulo de \vec{B} , en función de la distancia a una corriente eléctrica rectilínea.
- Resolver problemas relacionados con interacciones entre corriente eléctrica, cargas eléctricas en movimiento e imanes, con un campo magnético.
- Analizar el movimiento de una partícula cargada dentro de una “botella magnética”.



¹ Puede usted encontrar la versión completa en el sitio web del Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología; específicamente, en la página:

- <http://www.me.gov.ar/curriform/servicios/publica/publica/forodoc/index.html>

² El CONICET es el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva –Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología–.

³ La versión de este libro en soporte papel corresponde al ISBN 950-692-005-2.

- Diseñar una guía de trabajo práctico sobre la base de la fotografía de la trayectoria de una partícula en una cámara de niebla o de burbujas.



Ministerio de Cultura y Educación de la Nación

INTRODUCCIÓN

Si tratamos de observar el mundo con cierto espíritu investigador, probablemente nos encontremos con situaciones, a nuestro alrededor, que no por cotidianas dejan de ser sorprendentes.

- ¿Cómo puede ser que ciertos objetos se pongan en movimiento al acercarlos solamente un imán? ¿Qué hay entre ellos? Si intercalamos algunos tabiques o pantallas de cartón ocurre el mismo fenómeno. ¿No es esto sorprendente?
- ¿Qué son las auroras boreales? ¿Cómo se producen?
- ¿Hay bacterias magnéticas?
- ¿Es la Tierra un gran imán?

Si bien suponemos que usted está familiarizado con nuestro modelo de trabajo, le reiteramos la propuesta que planteamos en nuestros cursos anteriores:

- Revise los temas relativos a *magnetismo* en los textos recomendados en la bibliografía de este curso. (No olvide que la consulta bibliográfica realizada en forma crítica y sistemática, constituye un ítem fundamental en el proceso de mejoramiento de la enseñanza de las ciencias.)
- Por razones metodológicas que hacen a la transferencia y por la importancia que tienen, le proponemos el análisis de los siguientes temas:
 - Inducción magnética \bar{B} .
 - Interacciones entre campos magnéticos y corrientes eléctricas; cargas e imanes.

El interés de nuestros alumnos



Como ya hemos mencionado en otras oportunidades, es tarea del profesor elegir ejemplos y actividades que sirvan para despertar el interés de los alumnos. Nos apresuramos a aclarar que no estamos pensando que haya que generar interés a partir de la nada; por el contrario, creemos que, en la mayoría de los casos, usted logrará descubrir intereses preexistentes en

los alumnos. La referencia a fenómenos sencillos, en lo posible cotidianos, puede interesarlos. He aquí, algunos pocos comentarios y actividades que pueden ser útiles y que confiamos le servirán de base para generar otros:

- Con los imanes se pueden hallar objetos pequeños perdidos en el suelo. Es interesante pasar un imán por el suelo del salón y ver qué aparece: ganchitos, alfileres, polvillo, objetos de ignoto origen.
- Podemos hacer referencia a los dibujos animados, en donde es frecuente ver que los imanes atraen a los objetos, pero no recíprocamente. Esto es oportuno para volver sobre el principio de acción y reacción, y comentar su validez universal. Otra característica de los dibujos animados es que el magnetismo sólo se hace patente cuando el personaje saca el elemento del bolsillo y no antes. Claramente, son convenciones humorísticas que, a pesar de ese carácter, vale la pena tratar.

Con respecto a la teoría, le sugerimos consultar uno de los siguientes textos:

- PSSC. *Física*. Tomo II. Reverté, Barcelona, 1969.
- Bueche, F. *Fundamentos de Física*. Mc Graw Hill Book Co. México, 1970.
- Blackwood y otros. *Física General*. CECSA. México. 1978.

En relación con la resolución de problemas, recomendamos consultar:

- College Physics, Schaum Publishing Co, New York (hay edición en castellano).

En el último texto encontrará problemas resueltos y problemas a resolver, que emplean SIMELA (sistema métrico legal argentino).

Si usted quiere ampliar sus conocimientos en un texto de nivel terciario, creemos conveniente consultar:

- Resnick y Halliday. *Física Parte 2*. CECSA, México, 1967.

Un esfuerzo que merece nuestro apoyo

Muchas veces, durante el desarrollo del curso, le hemos participado el esfuerzo que implica redactar un material acorde con las expectativas y necesidades de los alumnos de la escuela media.

También dijimos que avalaríamos toda propuesta que apuntara a solucionar los problemas metodológicos que plantea nuestra tarea docente.

En el marco de esas inquietudes creemos importante recomendarle la consulta de los textos que integran la *Colección Ciencia Joven* publicada en castellano por Editorial Universitaria de Buenos Aires (EUDEBA).

Queremos transcribir un párrafo en el que se explicitan los objetivos de esa colección; pensamos que tenemos, con esos autores, muchas inquietudes comunes:

“Estos libros, escritos por autores destacados, ofrecen al estudiante y al público en general una visión de los temas más apasionantes y fundamentales de la física, visión que se extiende desde las partículas más pequeñas hasta el universo en su totalidad. El propósito primordial de esta colección es ofrecer un panorama serio de la física al alcance del joven estudiante y aún del profano. Es de esperar que muchas de las obras alienten al lector a investigar por sí mismo los fenómenos naturales. La colección *Ciencia Joven* se propone, además, suplir en parte la gran escasez que tanto se hace sentir en nuestro idioma, de buenos libros de extensión y complementación de los conocimientos proporcionados por la enseñanza secundaria. Ello resultará útil tanto para estimular el interés de los estudiantes por la física y las ciencias afines como para descubrir y orientar la propia vocación.”⁴

Hay un título de esa colección muy relacionado con este módulo: *Imanes*, de Francis Bitter.

⁴ Prólogo común a todos los textos que integran esta colección.

La colección Ciencia Joven sirvió de apoyo eficaz al gran esfuerzo que realizó en la década del 50 el *Physical Science Study Committee* de los Estados Unidos de Norteamérica para mejorar la enseñanza de la física.

Imanes a nuestro alrededor

Tal vez usted esté pensando en que puede adquirir imanes en algún comercio, para utilizarlos en clase. Aunque existe todo tipo de imanes comerciales a nuestra disposición, también disponemos de objetos cotidianos al alcance de nuestra mano, con propiedades magnéticas. Su utilización en clase cumple un doble propósito: primero, evita el desembolso de dinero en la adquisición de imanes comerciales y, segundo, muestra a los alumnos que los campos magnéticos estén presentes más de lo que se piensa en nuestras actividades diarias.

Dónde encontrar imanes:

- La Tierra.
- Tijeras (hay algunas muy magnetizadas y otras que no lo están).
- Cierres de puertas, frecuentemente utilizados para alacenas, botiquines de baño, mesas de luz, etcétera.
- Sujetapapeles para adherir a superficies metálicas.
- Relojes adhesivos para automóvil y carteles “Papá, no corras”.
- Hojitas de afeitar, que están magnetizadas –pues interviene algo magnético en el empaque–.
- Agujas.
- Parlantes.
- Brújulas de coche o de llavero, muy sensibles, con las que se pueden improvisar galvanómetros.
- Radios a transistores, pues poseen parlante y antena interna con núcleo magnético, aunque este último no es un imán permanente.
- Cintas de audio.
- Tarjetas de autopistas o de peaje.
- Aparatos limpiavidrios para edificios que poseen ventanas corredizas en pisos altos, sin acceso al exterior.
- Cabeza borradora de los grabadores.
- Burletes de goma magnética de puertas de heladeras.

Para trabajar en clase

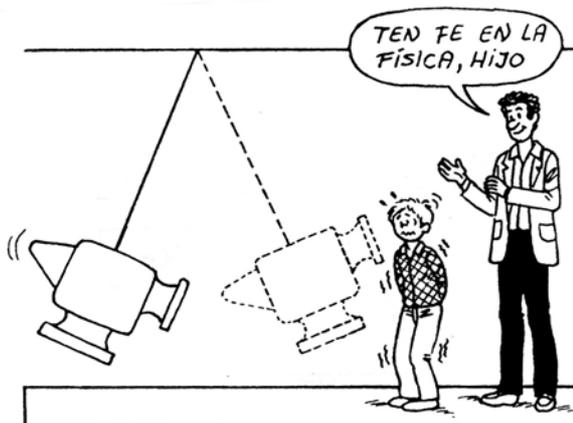
Seguramente, usted coincidirá con nosotros en que las actividades que dejan un mayor rédito pedagógico no son aquellas que utilizan material altamente sofisticado y que permiten, por lo tanto, la manipulación precisa de datos experimentales sino, por el contrario, aquellas que, echando mano de dispositivos elementales, dejan vivamente impresionado al alumno. No está de más recordar que Albert Einstein, al escribir la historia de su vida, a los 67 años, evocó aquel día en que siendo un niño de cuatro años recibió un juguete nuevo de manos de su padre. El juguete era una brújula; la admiración que este aparato despertó en Einstein perduró toda su vida.

Es este tipo de sensaciones a las que debe estar orientada nuestra tarea: Difícilmente olvidemos algo que nos ha marcado sensiblemente.

Como ejemplo, tenemos el caso de aquel colega que construyó un péndulo con una cuerda y una gran masa de hierro. Luego, pidió a un alumno que se colocara de pie en determinada posición, aproximó el pesado objeto a su barbilla y lo soltó. La descomunal lentitud cumplió su primera oscilación a escasos centímetros del rostro del aterrorizado voluntario.

Nos proponemos, entonces sugerirle actividades que, como ésta, son de fácil realización y, a la vez, despiertan la atención de su curso.

Lo primero es proveerse de una buena cantidad de limaduras de hierro. No hace falta comprarlas; puede obtenerlas de la siguiente manera: Consiga un imán, una bolsita y un papel y concurra al taller mecánico más próximo. Una vez allí, solicite permiso para recoger algunas limaduras debajo de alguna morsa o piedra de amolar. El procedimiento para recogerlas es extremadamente simple: se las atrae con el imán, interponiendo el papel para evitar que el primero quede lleno de limaduras; luego, separando el papel, se dejan caer las limaduras en la bolsita traída a tal efecto.



Una vez obtenidas las limaduras, podemos hacer diagramas de campo correspondientes a diferentes elementos magnéticos. Por ejemplo, podemos tomar una barra imantada y colocarla encima de una cartulina, sobre la cual se depositarán las limaduras. Golpeando un poco la cartulina, las limaduras se acomodarán y podremos visualizar las líneas de campo correspondientes a un dipolo magnético. Si uno desea conservar el diagrama, puede pegar encima de las limaduras *contact* transparente, de fácil obtención en librerías.



El mismo procedimiento puede usarse para visualizar los campos generados por diversos conductores eléctricos cuando transportan una corriente: un alambre rectilíneo que atraviesa la cartulina, una espira de alambre, un solenoide (el solenoide atraviesa la cartulina dos veces por cada espira), etcétera.

**PRIMERA SECCIÓN.
INVESTIGANDO CAMPOS MAGNÉTICOS**

Una síntesis

En la introducción de este curso le sugerimos que reviera sus conocimientos sobre magnetismo. Si usted ya ha concretado esa tarea, le planteamos una preocupación: ¿Cómo transferir a nuestros alumnos esos conceptos vinculados con el tema que nos ocupa?

Con el objeto de facilitar ese trabajo, le proponemos la lectura de un diálogo que intenta reconstruir una posible situación de aula y que sintetiza los aspectos más importantes del tema que estamos considerando:

Al.: –¿Qué es un campo magnético?

Prof.: –Bueno, no podemos decir exactamente qué es un campo magnético, pero sí podemos afirmar que, en las proximidades de un imán o de un conductor que transporta una corriente eléctrica, aparece “algo” que antes no estaba. A ese algo lo llamamos “campo magnético”.

Al.: –Pero, ¿cómo se puede ver ese campo?

Prof.: –No se puede ver; pero, eso no quiere decir que no exista. En física suelen detectarse objetos o campos, no a través de su visión directa (lo cual, a veces, es imposible) sino a través de los efectos que producen. Así, por ejemplo, decimos que en cierta región hay un campo eléctrico si, al colocar un cuerpo cargado allí, éste experimenta una fuerza que lo acelera. De manera análoga, decimos que una región es sede de un campo magnético cuando valen las siguientes afirmaciones:

- Si se coloca, dentro del campo magnético, un conductor eléctrico por el que circule corriente, sobre el conductor aparece una fuerza.
- Si un imán es colocado dentro del campo magnético, experimenta fuerzas; y lo mismo ocurre cuando están en dicha región ciertos materiales que no son imanes:
- Una partícula cargada eléctricamente y que se mueve dentro del campo magnético experimenta una fuerza; si no se mueve, no.

Al.: –Con respecto a lo que acaba de decir, no me queda clara una cosa. Usted dijo que, cuando una partícula cargada entraba en un campo magnético, experimentaba una fuerza; pero, si no entendí mal, eso era lo que pasaba en un campo eléctrico. ¿Cómo sé, entonces, si el campo es eléctrico o magnético?

Prof.: –La duda es razonable y la respuesta es que cuando una carga está en reposo dentro de un campo magnético, no experimenta ninguna fuerza. En cambio, sí experimenta fuerza al moverse. Contrariamente, en un campo eléctrico la fuerza no depende de la velocidad: aparece sobre la carga, se mueva ésta o no.

Al.: –¿Se puede imantar una barra de acero frotándola con un imán?

Prof.: –Sí, se puede; pero, no hace falta frotar. Eso es para la carga electrostática; para magnetizar es suficiente acercar un imán. Eventualmente, es conveniente dar un golpecito.

Al.: –Y, ¿cómo se calculan las fuerzas magnéticas?

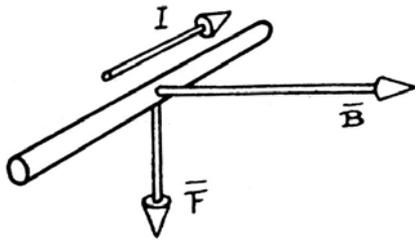
Prof.: –Ante todo, habría que decir cómo caracterizar al campo magnético. Ya hemos visto que el campo gravitatorio queda caracterizado si se conoce en cada punto del

espacio el vector \vec{g} que es la intensidad de campo gravitatorio. La fuerza sobre una masa m se calcula como $\vec{F} = m \cdot \vec{g}$. En el caso del campo eléctrico, se lo describía dando el vector intensidad de campo eléctrico \vec{E} en cada punto y la fuerza sobre una carga q estaba dada por $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$. Entonces, en el...

Al.: –Comprendo. El campo magnético está caracterizado por otro vector que, multiplicado por algún factor, me dé la fuerza.

Prof.: –La idea no es mala; pero, la situación aquí es más complicada que en los casos anteriores. Es cierto que el campo magnético queda caracterizado dando un vector en cada punto del espacio, es el vector **inducción magnética** \vec{B} . Si conocemos \vec{B} , en módulo, dirección y sentido en un determinado punto del campo, podemos:

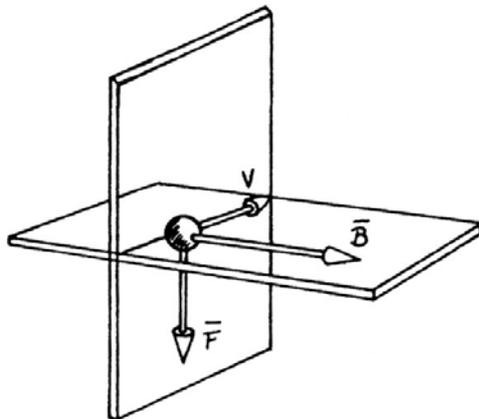
- a) Calcular la fuerza que actúa sobre un conductor eléctrico por el que circula una corriente. Si L es la longitud del conductor, I la corriente y \vec{B} es el vector inducción:



$$\vec{F} = I \cdot \vec{L} \wedge \vec{B} \text{ (SIMELA)}$$

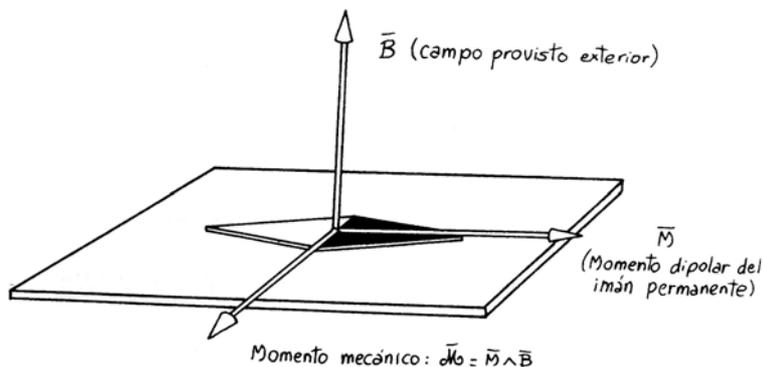
En donde hemos usado la operación de **producto vectorial** (\wedge).

- b) Podemos prever la fuerza que experimenta una carga q que pasa con velocidad \vec{v} por ese punto.



$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B} \text{ (SIMELA)}$$

- c) Si colocamos un imán, caracterizado por su momento magnético \vec{M} , actuará sobre él un momento mecánico \vec{M}_0 dado por $\vec{M}_0 = \vec{M} \wedge \vec{B}$



La aclaración SIMELA, junto a cada fórmula, significa que en otros sistemas de unidades aparecen constantes multiplicativas (π , μ_0 , etcétera).

Acciones sobre corrientes

Cuando en un campo magnético se coloca un conductor por el que circula corriente y no se aplican fuerzas adicionales, el conductor se acelera: sale del estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme que tuviera.

Teniendo en cuenta la segunda ley de la dinámica, sobre el conductor debe actuar una fuerza.

Destacamos:

Todo conductor por el que circula una corriente, al ser ubicado dentro de un campo magnético, experimenta la acción de una fuerza.

Enuncie a sus alumnos la conclusión experimental recuadrada más arriba y plantee el siguiente interrogante o problema:

¿De qué factores dependerá esa fuerza?

Supongamos que se propongan las siguientes hipótesis:

1. La fuerza depende de la intensidad de la corriente.
2. La fuerza depende de la longitud del conductor.
3. La fuerza depende de la posición relativa del conductor respecto del campo.
4. La fuerza depende de la orientación del conductor respecto del campo.

Propongamos, ahora, diseñar las experiencias que nos permitirán poner a prueba las hipótesis sugeridas.

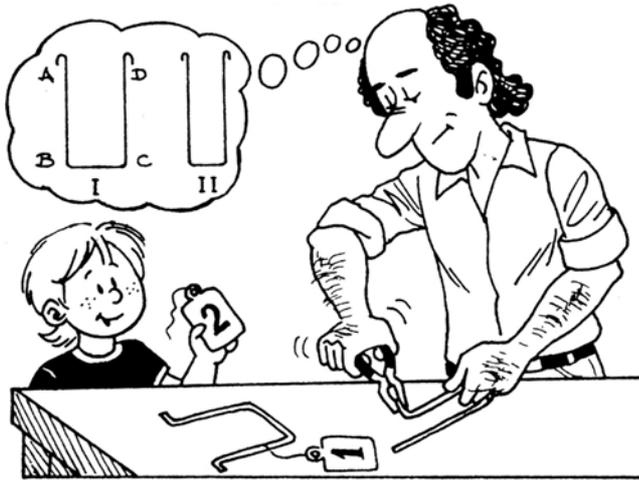
Dijimos que:

1. La fuerza depende de la intensidad de la corriente:

Para someter esta hipótesis a una prueba experimental, proponga a sus alumnos seguir el siguiente camino:

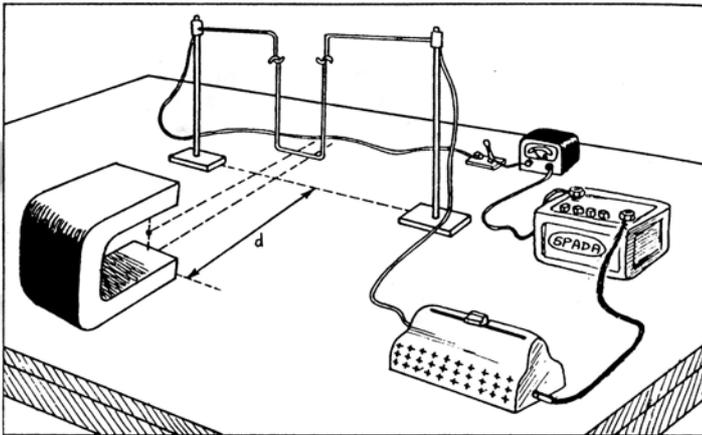
Provéase de los materiales necesarios para encarar la experiencia:

- una fuente de tensión,
- un reóstato (o bien una resistencia de calentador eléctrico y un clip tipo cocodrilo; el alambre convenientemente estirado y de la resistencia que conviene),
- un amperímetro,
- un imán poderoso (por ejemplo, el del equipo Phywe o uno de parlante),
- un interruptor,
- dos conductores de cobre de 1 mm de diámetro, doblado como se indica en las figuras (de ahora en adelante llamaremos “hamaquita” a cada uno de estos conductores).



Procedimiento:

- Instale todos los elementos para esta actividad sobre una mesa lo suficientemente elevada como para que los alumnos puedan seguir el desarrollo de la experiencia.
- Disponga esos elementos como lo indica la figura.
- Coloque la "hamaquita" I en las proximidades del imán ($d \cong 4 \text{ cm}$)
- Señale, sobre la mesa, la posición del imán y de los soportes de la "hamaquita", para conservar las condiciones iniciales de la experiencia.



- Arme el circuito de la "hamaquita", dándole al reóstato el máximo de resistencia.
- Reduzca la resistencia del circuito, hasta lograr que la intensidad de la corriente sea de 1 ó 2 amperios.
- Pida a sus alumnos que observen qué le ocurre a la "hamaquita" al cerrar el circuito, que varíen la intensidad de la corriente y formulen sus conclusiones.

En efecto, la "hamaquita" sale del estado de reposo (se inclina) y su inclinación varía con la intensidad de la corriente.

Podemos consignar el resultado de la primera experiencia:

Al cambiar i cambia la inclinación y, por lo tanto, cambia la fuerza.

La primera de las hipótesis sugeridas se verifica experimentalmente como verdadera. Por otra parte, podrá verificar que si se invierte el sentido de la corriente cambia el sentido de la fuerza.

Pongamos a prueba la segunda hipótesis.

2. La fuerza depende de la longitud del conductor:

Realice con sus alumnos la siguiente experiencia:

- Reemplace la “hamaquita” I por la “hamaquita” II (de igual tramo vertical pero de tramo horizontal más corto). Cuide que el único rasgo diferente sea el señalado.
- Ubique la nueva “hamaquita” en la misma posición y orientación que tenía la anterior.
- Repita la experiencia. Regule, con el reóstato, la intensidad de corriente a los mismos valores que en la experiencia anterior (mantenemos i constante, variamos longitud BC).
- Pida a sus alumnos que formulen sus conclusiones.

De las conclusiones de la experiencia, podemos aceptar que:

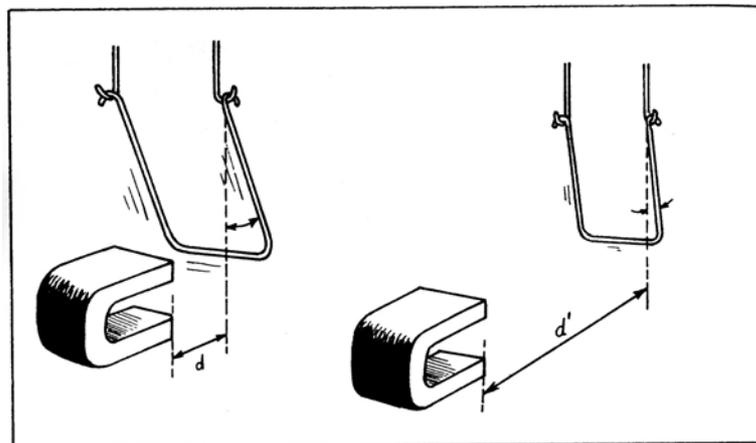
La fuerza creada por el campo magnético depende de la longitud del conductor.

Como tercera hipótesis habíamos sugerido que:

3. La fuerza depende de la posición relativa del conductor respecto del campo:

Pongámosla a prueba:

- Aleje la “hamaquita” I del imán, paralelamente (vuelva a marcar la posición de los soportes de la “hamaquita”).



- Cierre el circuito, regulando la intensidad, para que recupere los valores primitivos (mantenemos i constante, no variamos longitud).
- Pregunte a sus alumnos qué ocurrió con la “hamaquita”.

La experiencia demuestra que cambia la desviación de la “hamaquita”: Es menor. Esto implica que también la fuerza es menor; el conductor ha pasado de una zona en la que el campo es intenso a otra donde es menos intenso.

Por lo tanto, podemos aceptar que:

La fuerza depende de la posición relativa del conductor respecto del campo.

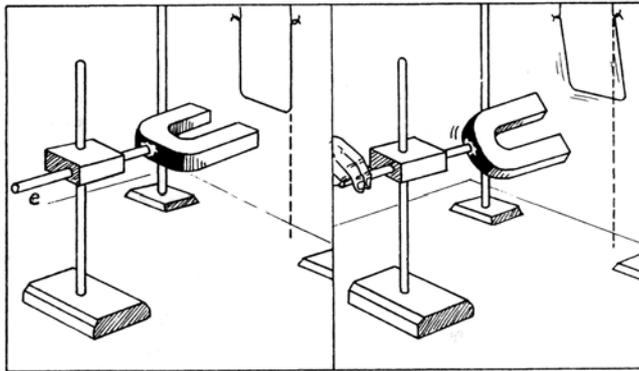
Pongamos a prueba la cuarta hipótesis.

4. La fuerza depende de la orientación del conductor respecto del campo:

Una aclaración...

Para poner a prueba esta hipótesis, deberíamos cambiar la inclinación del tramo BC de la “hamaquita”. Pero, como ello no es sencillo, por detalles constructivos del dispositivo, y como lo que importa es la posición relativa del conductor respecto del imán, vamos a dejar la “hamaquita” en su lugar e iremos rotando el imán alrededor del eje e.

- a) Haga circular corriente por la “hamaquita” (que sea $i = 1$ ó 2 amperios, constante).
- b) Rote el imán, tal como lo indica la figura:



- c) Haga que sus alumnos observen qué ocurre con la “hamaquita”.

Debe lograr que el alumno vea que la desviación de la “hamaquita” cambia al rotar el imán, es decir al cambiar la orientación relativa del conductor respecto del campo. Si se gira el imán media vuelta, se invertirá la fuerza sobre el conductor; con un cuarto de vuelta, no hay fuerza apreciable. Con ello se habrá verificado la cuarta hipótesis.



Esta última observación nos lleva a pensar que el campo interviene en el fenómeno que estamos estudiando, a través de una **magnitud direccional**.

Advierta que la serie de experiencias anteriores condujeron a verificaciones cualitativas. En el curso 1, *Física. Su Enseñanza*, al hablar de **método científico** señalamos que el experimentador no se conforma con la ley cualitativa relativa a un determinado fenómeno: busca llegar a la cuantitativa. Sin embargo, en el caso que estamos estudiando, no le aconsejamos realizar mediciones. Apuntamos algunas razones.

- En general, no se dispone de campo magnético uniforme como para asegurar que sus propiedades son exactamente iguales en toda la zona que ocupa el conductor BC.
- El instrumental (la hamaquita, en particular, debe mantener un buen contacto eléctrico cuando se desvía) debiera ser reemplazado –para mediciones– por material de mayor costo.

De todos modos, creemos que el objetivo de centrar el interés del alumno en la acción de un campo magnético sobre un conductor, puede ser logrado a través de los pasos que señalamos en las sucesivas experiencias.

Vector inducción magnética \vec{B}

Si realizáramos la medición cuantitativa, comprobaríamos que el módulo de la fuerza que actúa sobre un conductor ubicado dentro de un campo magnético, por el que circula una corriente es:

- Directamente proporcional a la intensidad de la corriente.
- Directamente proporcional a la longitud del conductor.
- Directamente proporcional al seno del ángulo que forma el conductor con las líneas de inducción.

La constante de proporcionalidad es una nueva magnitud que llamamos inducción magnética B. En verdad, se trata de una magnitud vectorial, tangente a las líneas de inducción (estas líneas son las que quedarían definidas esparciendo limaduras de hierro), así:

$$F = B \cdot I \cdot L \cdot \text{sen}\alpha$$

Y, vectorialmente:

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

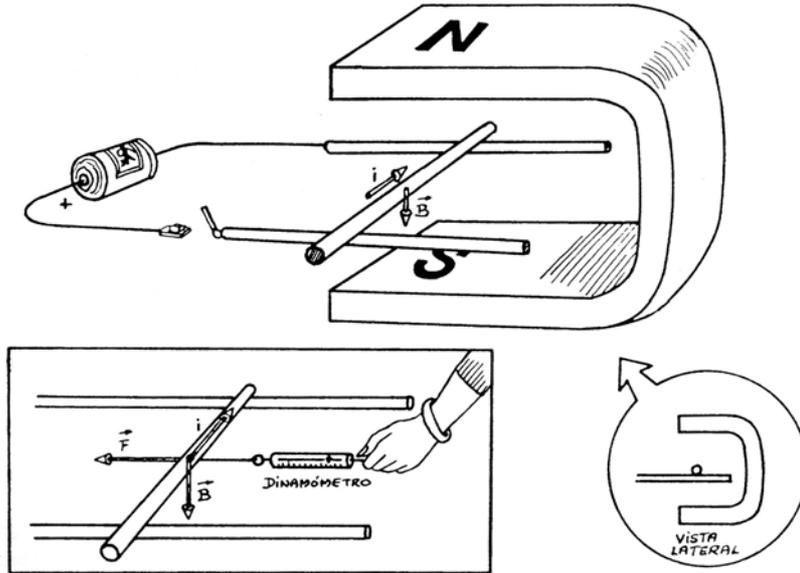
De modo que si $\alpha = 90^\circ$, $\text{sen } \alpha = 1$ y F es máxima:

$$F_{\text{máx}} = B \cdot I \cdot L$$

$$B = \frac{F_{\text{máx}}}{I \cdot L} \quad (1)$$

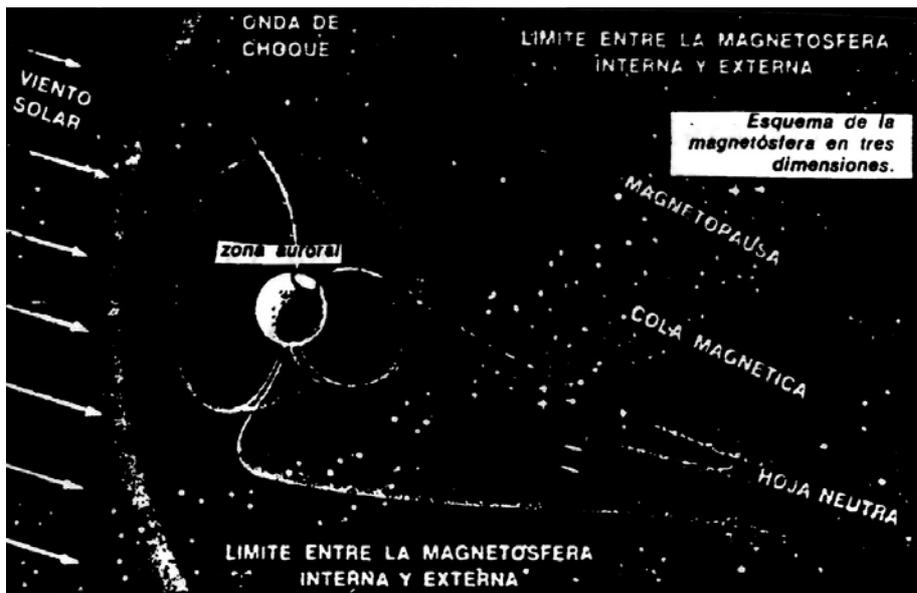
Es decir que el módulo del vector \vec{B} puede ser determinado en cada punto del campo de la siguiente manera:

- Coloque un trozo de conductor rectilíneo dentro del campo magnético, perpendicularmente a la línea de inducción que pasa por el punto donde queremos determinar \vec{B} . El conductor debe ser convenientemente pequeño como para que podamos aceptar que el valor de \vec{B} es el mismo en todos los puntos de la zona que ocupa.
- Haga circular por el conductor una corriente continua y mida la intensidad de esa corriente.
- Mida la fuerza que crea el campo sobre el conductor; mediante la expresión (I) se podrá calcular el módulo del vector.



Embotellamiento de partículas cargadas

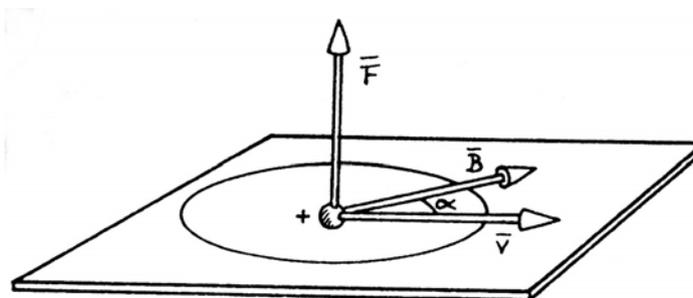
El espacio que rodea la Tierra encierra, retiene, a gran número de partículas cargadas en movimiento, que son responsables, entre otros fenómenos, de la llamada "luz polar".



Pero, ¿es posible lograr que partículas cargadas en movimiento permanezcan confinadas en una región?

Sí, ello es posible: se necesita un campo magnético. La Tierra está rodeada por un muy extenso campo magnético: el campo magnético terrestre.

El estudio del movimiento de una partícula cargada dentro de un campo magnético es, en general, un problema complejo, en particular cuando queremos tratarlo en la escuela media; comencemos por ocuparnos del movimiento de una partícula cargada dentro de un campo magnético cualquiera.



Si la partícula penetra en un campo magnético, es conocido el hecho de que aparezca una fuerza sobre ella (fuerza de Lorentz).

La experiencia muestra que esa fuerza \vec{F} es función de la carga eléctrica q de la partícula, de su velocidad \vec{v} , del campo magnético \vec{B} y de la dirección relativa de \vec{v} respecto de las líneas de inducción:

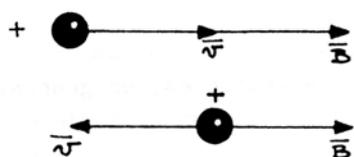
$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B} \quad (1)$$

de módulo

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \text{sen } \alpha$$

donde α es el ángulo que determinan \vec{v} y \vec{B}

¿Puede ocurrir que esa fuerza sea nula?



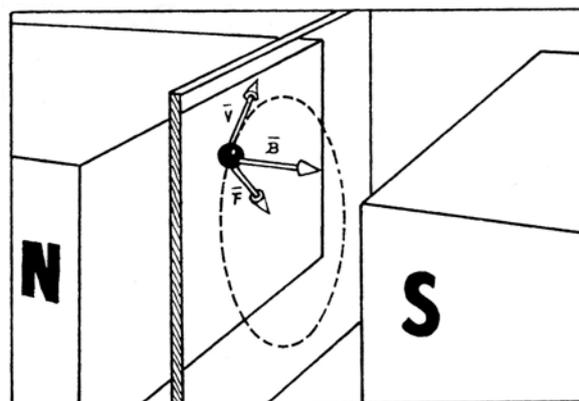
$$\vec{F} = 0$$

Sí, si la partícula penetra en el campo magnético en la dirección de las líneas de inducción ($\alpha = 0$ ó $\alpha = 180^\circ$)

¿Qué ocurre si el campo magnético es uniforme?

Si la partícula cargada penetra en un campo magnético uniforme se pueden presentar dos posibilidades:

- a) que la partícula penetre perpendicularmente a las líneas de inducción, es decir que \vec{v} sea perpendicular a \vec{B} ; en tal caso (ver figura) siendo $\alpha = 90^\circ$ es $F = B \cdot q \cdot v$ (1).



Como \vec{F} es perpendicular a \vec{v} , es nula la componente tangencial de la fuerza; v es constante y el movimiento de la partícula resulta uniforme.

Además, como

$$F = m \frac{v^2}{r} \quad (2)$$

De (1) y de (2):

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

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

es decir, resulta $r = \text{constante}$ (por serlo también v y B). Luego, el movimiento de la partícula dentro de un campo magnético uniforme, cuando \vec{v} es perpendicular a \vec{B} , es circular y uniforme.

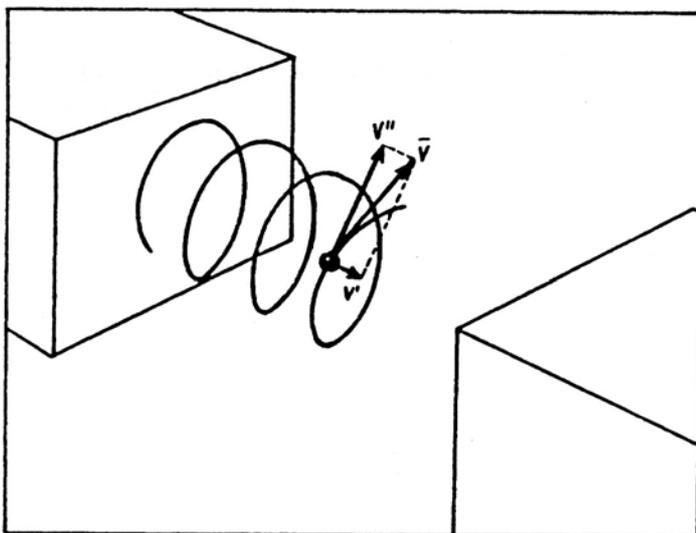
La partícula queda "atrapada" en una circunferencia de radio $r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}$.

Obsérvese que, siendo constantemente \vec{F} perpendicular a \vec{v} , es decir perpendicular a la trayectoria, es nulo el trabajo que realiza esa fuerza y, de acuerdo con el teorema de las fuerzas vivas, la energía cinética de la partícula se mantendrá constante.

- b) que la partícula penetre oblicuamente en el campo magnético uniforme; en este caso se puede descomponer a \vec{v} según dos direcciones: la de \vec{B} y la de la perpendicular a \vec{B} en el plano que determinan \vec{v} y \vec{B} . Se obtienen, así, las componentes \vec{v}' y \vec{v}'' . Ello equivale a descomponer el movimiento en otros dos: uno en la dirección de B de velocidad \vec{v}' y el otro de velocidad \vec{v}'' .

El primer movimiento componente, el de velocidad \vec{v}' , no es afectado por el campo magnético por ser \vec{v}' de la misma dirección que B : Es un movimiento rectilíneo y uniforme.

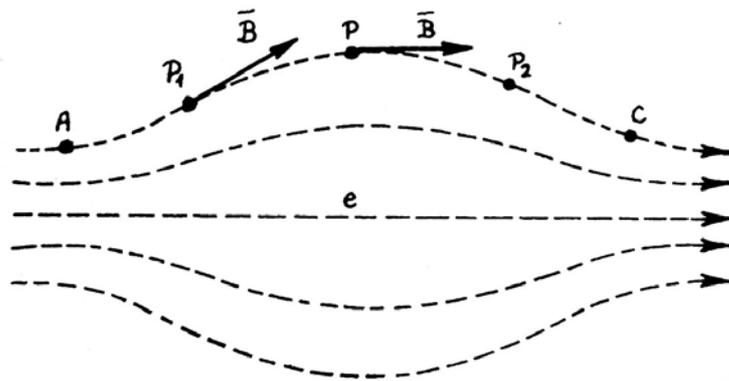
El segundo movimiento, el de velocidad \vec{v}'' tiene las condiciones del movimiento que tratamos en a): Resulta ser un movimiento circular y uniforme.



En resumen: cuando una partícula cargada penetra en un campo magnético uniforme de tal manera que \vec{v} no sea perpendicular a las líneas de inducción, su movimiento podrá ser descompuesto en un movimiento rectilíneo y uniforme en la dirección de \vec{B} y en otro circular y uniforme en un plano perpendicular a \vec{B} ; el movimiento resultante es un movimiento helicoidal; la trayectoria es una hélice.

¿Qué ocurre si el campo magnético no es uniforme?

Supongamos, para facilitar, que el campo magnético no uniforme tenga eje de simetría como el que presenta la siguiente figura (e es el eje de simetría del campo):

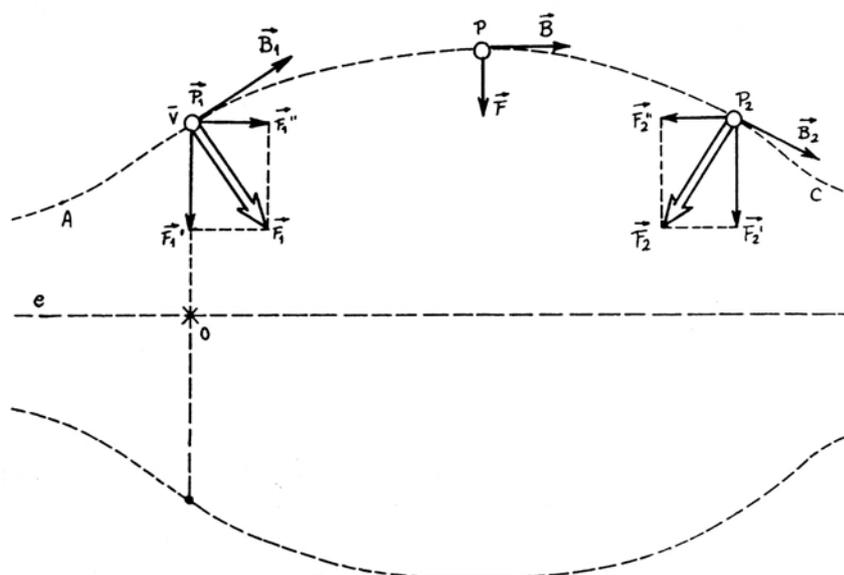


Ese campo es más intenso en los extremos (mayor B) y más débil en el centro (menor B), como lo señala la distinta separación que existe entre las líneas de inducción que se han representado.

Supongamos una partícula cargada positivamente, de velocidad \vec{v} que penetra en el campo magnético según una dirección perpendicular a \vec{B} . Sobre la partícula aparece una fuerza \vec{F}_1 (fuerza de Lorentz) perpendicular a \vec{B} y a \vec{v} .

Esa fuerza \vec{F}_1 puede descomponerse según dos direcciones: paralela al eje e y perpendicular al mismo.

La segunda (\vec{F}_1') actúa como fuerza centrípeta y hace que la partícula adquiera un movimiento circular.



Supondremos que el centro O de esa circunferencia pertenece al eje de simetría e del campo. La componente $\overline{F''}_1$ acelera la partícula hacia la derecha.

En síntesis: La partícula se acelera hacia la derecha (por acción de $\overline{F''}_1$) y rota alrededor de eje e (por acción de $\overline{F'}_1$). Dado que \overline{B} disminuye su módulo hacia la derecha, también disminuye el módulo de \overline{F}_1 y los de sus componentes $\overline{F'}_1$ y $\overline{F''}_1$. Cuando la partícula se desplaza de P_1 a P y da vueltas en torno de e , lo hace con aceleración decreciente y aumenta el radio de rotación.

En la posición P , la fuerza de Lorentz es exclusivamente centrípeta (se anula la aceleración hacia la derecha pues se anula también $\overline{F''}_1$). A partir de P la partícula sigue desplazándose hacia la derecha pero ahora la fuerza de Lorentz la frena (por acción de $\overline{F''}_2$); la partícula describe una hélice de radio decreciente hasta que se anula su avance hacia la derecha (en C) sin dejar de rotar alrededor del eje e .

A partir de C , la partícula comienza a desplazarse hacia la izquierda, rotando alrededor de e .

La partícula se mueve entre A y C , rotando alrededor del eje de simetría del campo magnético; este movimiento de avance y retroceso entre A y C mantiene a la partícula atrapada dentro del campo magnético.

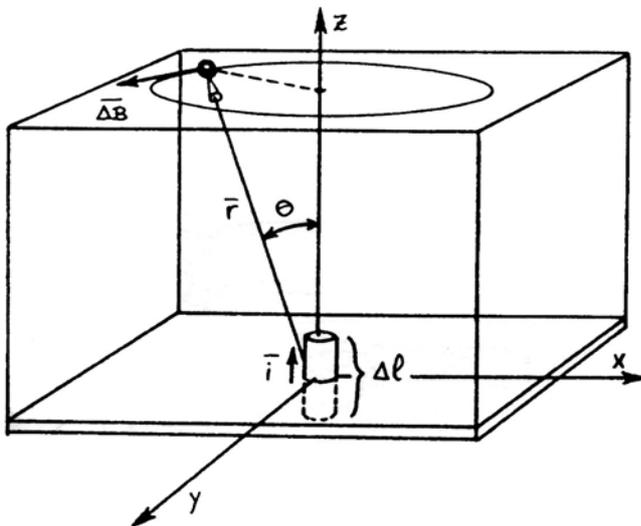
Un campo magnético de este tipo suele denominarse **botella magnética**, debido a que la partícula cargada queda atrapada. Las paredes de ese campo son las líneas de inducción.

Campo creado por una corriente

En un apartado anterior nos referimos a la fuerza que aparece sobre un conductor por el que circula una corriente, cuando se lo coloca en un campo magnético.

Pero no hicimos mención acerca de qué origina los campos magnéticos.

Imaginemos un conductor de pequeña longitud Δl , por el que circula una corriente \vec{i} . Esto genera un campo de intensidad ΔB en ese punto P , cuya dirección es perpendicular al vector \vec{r} y al vector \vec{i} .



El sentido de $\overline{\Delta B}$ está dado por la regla de la mano derecha: el pulgar hacia arriba, en la dirección de \vec{i} , determina que los otros dedos señalan en el sentido de $\overline{\Delta B}$.

El módulo de ΔB está dado por:

$$\Delta B = \frac{k \cdot \Delta l \cdot i \cdot \cos \theta}{r^2}$$

Donde:

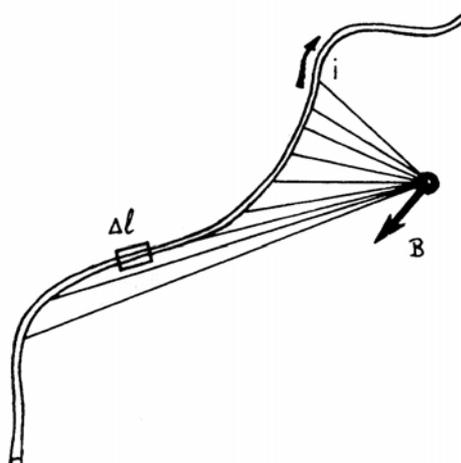
$$k = 10^{-7} \text{ T.m/A}$$

En lenguaje vectorial:

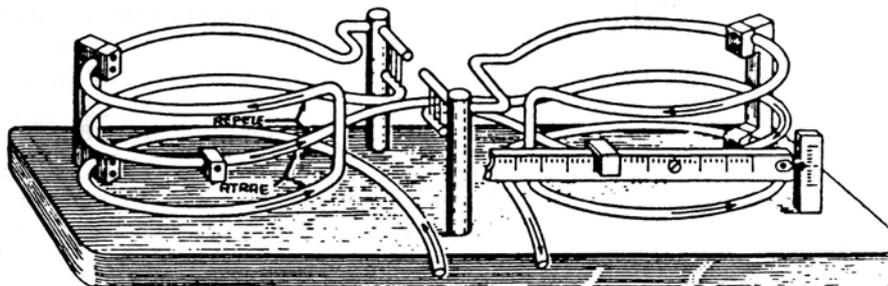
$$\overline{\Delta B} = \frac{k \cdot \Delta l \cdot \overline{i} \wedge \overline{r}}{r^3}$$

(Ley de Biot-Savart)

Para hallar, en un punto, la intensidad de campo que genera un conductor extenso y no un elemento de longitud Δl , es necesario integrar las contribuciones de cada elemento de longitud, a lo largo de toda la longitud del conductor o circuito.



Los libros de texto proporcionan los resultados para diversos casos de interés: una bobina cilíndrica, una bobina de Helmholtz –o sea, bobina en forma de aro–, una espira, un alambre recto e infinito, etcétera.



Balanza electrodinámica, según Lord Kelvin, quien experimentó con ella en 1883. La corriente pasa por espiras circulares muy próximas; la parte móvil recibe la alimentación a través de hilos metálicos muy delgados que permiten su movimiento. Los efectos dinámicos de las corrientes eléctricas se miden con la ayuda de contrapesos. (La ilustración se ha tomado de The Instrument Sketch Book, de la compañía Weston, editado por Henry Berring en 1966).

**SEGUNDA SECCIÓN. ALGO SOBRE
LOS SISTEMAS DE UNIDADES**

Se ve con frecuencia en los libros de texto, la recomendación de utilizar el sistema de unidades conocido como SIMELA (Sistema Métrico Legal Argentino), el cual es la versión local del SI (Sistema Internacional). Se recomienda, por tanto, la utilización de segundos para la medición del tiempo, metros para la longitud, kilogramos para la masa y amperios para la intensidad de corriente eléctrica.

A partir de estas unidades –llamadas *fundamentales*– surgen, por combinación, las unidades de las diversas magnitudes restantes (por ejemplo kg.m/seg² para la fuerza, etcétera).

Aunque la utilización de un único sistema de unidades se presenta razonable como propuesta teórica, aparecen inconvenientes en cuanto se lo quiere llevar a la práctica. No queremos decir con esto que no se puedan resolver problemas pasando todas las unidades al SIMELA sino que, a veces, no es lo más cómodo y, con frecuencia, la práctica nos fuerza a ser bastante heterodoxos.

Veamos algunos ejemplos:

- Los astrónomos, que deben tratar con longitudes muy 15 grandes, prefieren expresarlas en años luz ($9,46 \cdot 10^{15}$ m) o bien en parsecs ($3,048 \cdot 10^{16}$ m). También prefieren medir la masa de objetos astronómicos en masas solares, en lugar de Kg.
- Cuando se trabaja en física subatómica, es preferible medir las distancias en radios de Bohr ($5,3 \cdot 10^{-11}$ m) que es una distancia típica.
- Pese a que la unidad recomendada para la presión es el Pascal (Newton/m²), los medidores de presión de neumáticos de automóvil siguen trayendo escalas expresadas en libras/pulgada cuadrada (PSI: *Pounds by Square Inch*).
- Muchos físicos teóricos que investigan fenómenos cuánticos que involucran velocidades comparables a la de la luz, deciden, por simplicidad de expresión, usar un sistema de unidades (llamado natural) en el que adquieren valor uno las siguientes constantes: c (velocidad de la luz en el vacío), G (constante de gravitación universal), \hbar (constante de Planck), k (constante de Boltzmann). La elección de estas unidades simplifica notablemente las fórmulas matemáticas de esta rama de la física, aunque complica, desde luego, las de otras ramas.

El problema de las unidades se hace algo más complejo en el caso del electromagnetismo, en el que las propias fórmulas que relacionan a las magnitudes físicas cambian según el sistema de unidades utilizado. Por ejemplo, la fuerza de Lorentz en el SIMELA es:

$$\bar{F} = q \cdot \bar{v} \wedge \bar{B}$$

donde F se expresa en Newton, q en coulomb, v en m/seg y B en tesla. En el sistema gaussiano de unidades, la expresión correspondiente es:

$$\bar{F} = \frac{1}{c} \cdot q \cdot \bar{v} \wedge \bar{B}$$

donde F se da en dinas (= 10^{-5} Newton), c es la velocidad de la luz en el vacío (= $3 \cdot 10^{10}$ cm/seg), v se da en cm/seg, q en statcoulomb (1 coulomb = $3 \cdot 10^9$ statcoul) y B se da en gauss (= 10^{-4} tesla).

Como se ve, en las expresiones aparecen multiplicadores que es necesario tener en cuenta.

Algunos problemas resueltos

Ya conoce usted los inconvenientes que ocasiona el hábito de la resolución ciega de problemas, por semejanza con problemas típicos.

Reiteramos. Nos interesa, fundamentalmente, lograr que nuestros alumnos incorporen una metodología que les permita resolver problemas; particularmente, nos interesa que, a través de los problemas, reveen y fijen la teoría. No dejamos de lado la importancia de los resultados numéricos; pero, insistimos en los rasgos que hacen a la comprensión de un problema y a los pasos que el alumno sigue para resolverlo.

Usted puede guiarlos en esa tarea, planteando los interrogantes pertinentes.

Para esto, sugerimos que sus alumnos redacten una carpeta o cuaderno con los problemas planteados en clase y sus respectivas soluciones; cuide que las soluciones no se limiten a ser una simple recopilación de fórmulas y cálculos.

Esta tarea le posibilitará detectar qué aspectos de la teoría han presentado mayores dificultades de aprendizaje y cuáles pueden ser evaluados favorablemente. No deje pasar la oportunidad de fijar aquellos conceptos que han sido comprendidos por sus alumnos y de aclarar los que han quedado confusos.

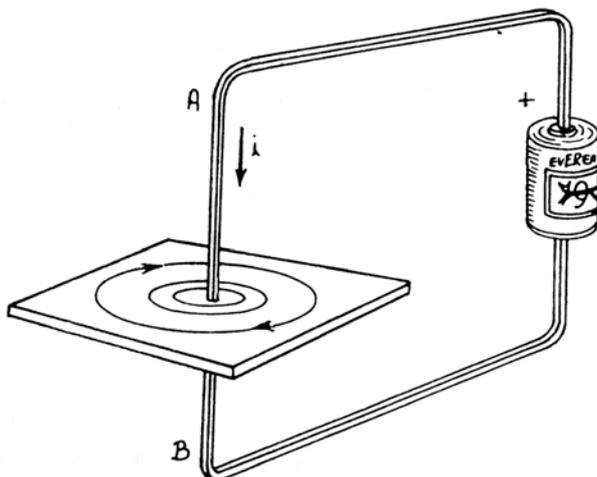
A modo de ejemplo, le presentamos algunos problemas sueltos que pretenden lograr los objetivos que señalamos:

Problema 1

Un conductor rectilíneo de gran longitud está ubicado el aire; en el conductor se establece una corriente de $i = 5 \text{ A}$.

- ¿Qué efecto magnético produce esa corriente? Explique detalladamente.
- Represente B en función de la distancia al conductor.
- ¿Para qué sirve conocer el valor de B en un punto del campo magnético?

- Toda corriente eléctrica produce un campo magnético; si el conductor es rectilíneo, en la región que lo rodea, muy próxima al conductor (en relación con la distancia a los extremos), las líneas de inducción son circulares y tienen el centro común en el conductor.



El valor de B es, en tal caso: $B = k \cdot 2 \frac{i}{d}$

donde d es la distancia entre el conductor y el punto considerado.

Si, por ejemplo, es $d = 0,01$ m, es:

$$B = 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A} \cdot 2 \cdot \frac{5 A}{0,1 m}$$

$$B = 10^{-4} T$$

Observe que sólo estamos considerando el campo magnético creado por la corriente; dejamos de lado el campo magnético terrestre y el que crea el resto del circuito.

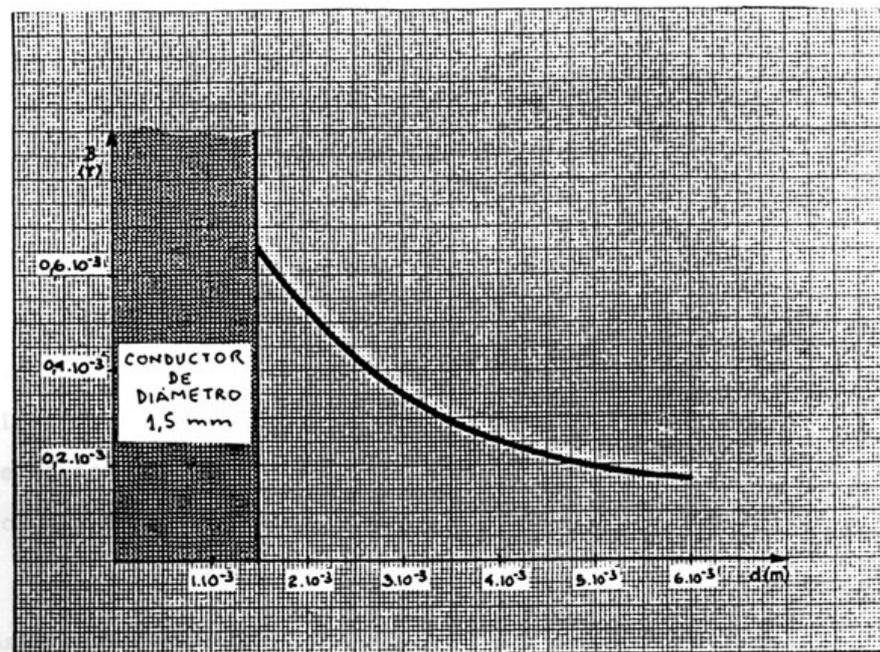
b) Siendo $B = k \cdot 2 \frac{i}{d}$

Resulta B inversamente proporcional a la distancia d:

$$B = 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A} \cdot 2 \cdot \frac{5 A}{d}$$

Para ver mejor cómo varía B con la distancia d, le proponemos representar gráficamente B en función de la distancia d.

d (m)	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$
B (T)	$0,67 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,33 \cdot 10^{-3}$	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,25 \cdot 10^{-3}$	$0,22 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,18 \cdot 10^{-3}$	$0,17 \cdot 10^{-3}$



¿Dónde es mayor la variación de B con la distancia d?

Consideramos la variación que experimenta B como consecuencia de una misma variación de la distancia. Una de esas variaciones (Δd) próxima al conductor y la otra alejada de él.

¿Qué ocurre con B si d pasa de $1,5 \cdot 10^{-3}$ a $2 \cdot 10^{-3}$ m? Varía en $0,17 \cdot 10^{-3}$ T.

En cambio, si variamos d entre $5,5 \cdot 10^{-3}$ m y $6 \cdot 10^{-3}$ m, el módulo de \vec{B} cambia en $0,02 \cdot 10^{-3}$ T.

La variación de B con d es mayor en la zona próxima al conductor.

c) ¿Para qué sirve conocer el valor de \vec{B} en un punto del campo magnético?

Conocer el valor de \vec{B} en un punto del campo magnético nos ofrece las siguientes ventajas:

- Si en ese lugar se coloca un conductor de longitud ℓ de tamaño conveniente como para aceptar que \vec{B} tenga el mismo valor en todos los puntos de la región donde está ubicado el conductor, éste se encontrará sometido a una fuerza:

$$\vec{F} = \vec{i} \ell \wedge \vec{B}$$

Es decir, de módulo $F = B i \ell \sin \alpha$

Por ejemplo:

$$B = 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ T} \quad , \quad i = 1 \text{ A}$$

$$\text{Si } \ell = 0,01 \text{ m}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

Entonces:

$$F = 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot 1 \text{ A} \cdot 0,01 \text{ m} \cdot \sin 90^\circ$$

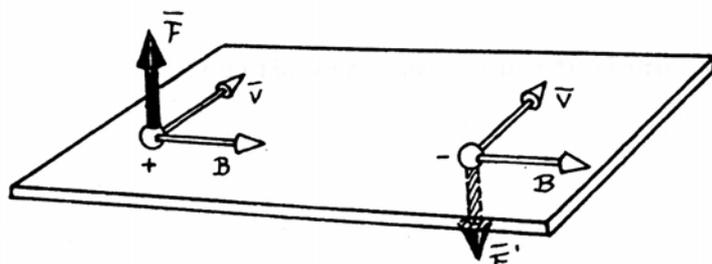
$$F = 0,67 \cdot 10^{-5} \text{ N}$$

- Si por el mismo lugar pasa una partícula cargada eléctricamente con carga q, sobre ella se ejercerá una fuerza de módulo:

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

$$F = B \cdot q \cdot v \cdot \sin \alpha$$

Por ejemplo, la partícula es un electrón:



$$B = 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$v = 2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

$$\text{Si } q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

Es:

$$F = B \cdot q \cdot v$$

$$F = 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

$$F = 0,67 \cdot 1,6 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-19} \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$F = 2,1 \cdot 10^{-16} \text{ N}$$

- Si en el mismo lugar donde conocemos el valor de \vec{B} se coloca un imán en reposo con libertad de orientarse, éste rotará hacia la dirección de \vec{B} (\vec{B} tiene la dirección de la tangente a la línea de inducción). Si ese imán tiene un momento magnético \vec{M} y se lo coloca formando un ángulo α con el vector \vec{B} , sobre el imán actuará un momento $\vec{\mathcal{M}} = \vec{M} \wedge \vec{B}$

Es decir, de módulo $M = M \cdot B \cdot \text{sen } \alpha$

Así, por ejemplo, si el imán tiene momento magnético $M = 5 \cdot 10^5 \frac{\text{Nm}}{\text{T}}$ y se lo coloca en un lugar del campo magnético donde $B = 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ T}$, formando \vec{M} un ángulo $\alpha = 30^\circ$ con el vector \vec{B} es:

$$\mathcal{M} = 5 \cdot 10^5 \frac{\text{Nm}}{\text{T}} \cdot 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot \text{sen } 30^\circ$$

$$\mathcal{M} = 3,35 \cdot 0,5 \cdot 10^2 \text{ Nm}$$

$$\mathcal{M} = 1,68 \cdot 10^2 \text{ Nm}$$

Problema 2

Una corriente eléctrica de intensidad $I = 5 \text{ A}$ se establece en un conductor circular de radio $r = 5 \text{ cm}$.

- a) Esa corriente, ¿crea un campo magnético?
- b) En caso afirmativo, determinar \vec{B} en el centro O de la espira (el medio es el vacío).
- c) ¿Qué dirección tiene la línea de inducción que pasa por O ?
- d) ¿Cómo lo verificaría experimentalmente?
- e) ¿Qué sentido le atribuimos a la línea de inducción?

- a) Toda corriente eléctrica crea un campo magnético. Ese campo tendrá una intensidad que dependerá de la intensidad de la corriente.
- b) El vector \vec{B} tiene elementos característicos –dirección, sentido y módulo– que dependen del punto considerado.

De acuerdo con la ley de Laplace, el vector \vec{B} se podrá calcular en cualquier punto, sumando (vectorialmente) los elementos $\Delta\vec{B}$ creados en ese punto, por cada elemento de corriente. (Esto es un modelo teórico, ya que resulta imposible aislar cada tramo del conductor y, a la vez, hacer circular corriente).

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \overline{\Delta B}_i$$

En el centro 0 de la espira, todos los $\overline{\Delta B}_i$ son colineales y del mismo sentido. Es importante que lo destaque en sus clases. Le sugerimos pedir a sus alumnos que analicen el tema con textos de escuela media y observen que, en muchos de ellos, se escribe $\Delta B = \Delta B_1 + \Delta B_2 \dots + \Delta B_n$ (suma de módulo) sin aclarar que ello se verifica sólo en algunos puntos del campo, por ejemplo en el centro de la espira (vectores paralelos).

Siendo, por ley de Biot-Savart, $\Delta B_i = k \cdot \frac{\Delta l_i \cdot i}{d^2} \cdot \text{sen } \alpha_i$

Y, en nuestro caso, todos los $\alpha_i = 90^\circ$ y $d_i = r \therefore \Delta B_i = k \cdot \frac{\Delta l_i \cdot i}{r^2}$

Luego:

$$B = \sum_{i=1}^n \Delta B_i$$

$$B = k \cdot \frac{i}{r^2} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta l_i$$

$$B = k \cdot \frac{i}{r^2} \cdot 2\pi r$$

$$B = k \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{r}$$

En nuestro caso, $i = 5A$, $r = 0,05 \text{ m}$; por consiguiente:

$$B = 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 5A}{0,05 \text{ m}}$$

$$B = 2\pi \cdot 10^{-5} T$$

$$B = 6,28 \cdot 10^{-5} T$$

¿Cuál es la intensidad de este \vec{B} con respecto a la componente horizontal del \vec{B} terrestre?

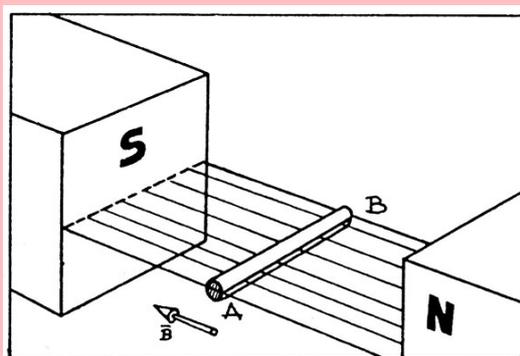
El \vec{B} terrestre tiene una componente horizontal variable con el lugar. En Buenos Aires, su valor aproximado es $2,5 \cdot 10^{-5} T$. La intensidad del \vec{B} en el centro de la espira considerada es casi 2,5 veces la intensidad del \vec{B}_t terrestre.

- c) La línea de inducción que “pasa” por 0 es la perpendicular al plano de la espira en 0.
- d) Si, mirando desde arriba, la corriente circula en sentido antihorario, de acuerdo con la regla del tirabuzón (o también de la mano derecha), el sentido de \vec{B} en 0 es hacia arriba.

- e) Determinaremos la dirección y el sentido de la línea de inducción empleando una aguja magnética. En este caso, dado que la espira está ubicada en un plano horizontal, podremos emplear una aguja de “inclinación” magnética –es decir, una aguja magnética que pueda rotar alrededor de un eje horizontal–. La aguja se dispondrá verticalmente con un polo norte en la parte superior; la línea de inducción está dirigida en el sentido S-N de la aguja.

Problema 3

Un conductor rectilíneo AB, de longitud $L = 10 \text{ cm}$ y peso $P = 10 \text{ gf}$ es colocado dentro de un campo magnético uniforme, como se indica en la figura. Las líneas de inducción son horizontales; el conductor también está dispuesto horizontalmente y forma un ángulo de 90° con aquellas líneas.



- a) ¿En qué sentido debe circular una corriente eléctrica por el conductor y qué valor debe tener el módulo del vector \vec{B} , si la corriente eléctrica es de intensidad $i = 10 \text{ mA}$ y el conductor queda en reposo dentro del campo?
- b) ¿Qué le ocurrirá al conductor si $i' = 20 \text{ mA}$?
- c) En este último caso (b), ¿cómo lograr que el conductor con esa corriente de $i' = 20 \text{ mA}$, recupere el estado de reposo en ese mismo campo?

- a) Para que el conductor se encuentre en reposo, o no deben actuar fuerzas sobre él o bien esas fuerzas deben formar un sistema en equilibrio. Dado que el cuerpo, el conductor, tiene peso, debe actuar otra fuerza \vec{F} que debe ser colineal, de igual módulo y de sentido opuesto a ese peso

$$\vec{F} = -\vec{P}$$

Esa fuerza puede ser la que le produce el campo al conductor, por tener éste una corriente eléctrica. El módulo de esta última fuerza se expresa:

$$F = B \cdot i \cdot L \cdot \text{sen } \alpha$$

donde α es el ángulo que forma el conductor con las líneas de inducción.

$$\text{Si } \alpha = 90^\circ \text{ es } F = B \cdot i \cdot L$$

$$\text{y } B \cdot i \cdot L = P \text{ (para que exista equilibrio)}$$

$$\text{De modo que } B = \frac{P}{i \cdot L}$$

Podemos concluir:

- la corriente eléctrica debe circular de A hacia B.

- debe ser $B = \frac{P}{iL}$ (si $\alpha = 90^\circ$).

Calculemos B.

Para ello, debemos cuidar que todas las medidas estén expresadas en el mismo sistema de unidades. En este caso, empleamos el SIMELA.

$$i = 10 \text{ mA} \quad , \quad i = 0,010 \text{ A}$$

$$P = 10 \text{ gf} \quad , \quad p = 10 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

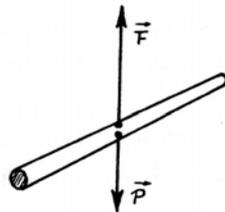
$$L = 10 \text{ cm} \quad , \quad L = 0,10 \text{ m}$$

$$B = \frac{p}{i \cdot L}$$

$$B = \frac{10 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ N}}{0,01 \text{ A} \cdot 0,1 \text{ m}}$$

$$B = 98 \text{ T}$$

- b) Si la intensidad de corriente se duplica ($i' = 2i$), la fuerza \vec{F}' creada por el campo supera al peso del conductor; el sistema tiene resultante vertical, hacia arriba, y de módulo $R = F - P$



Por lo tanto, el conductor se acelera hacia arriba, con aceleración $a = \frac{R}{m}$ (De acuerdo con el segundo principio de la Dinámica.)

Calculemos R.

$$R = B \cdot i' \cdot \ell - P$$

$$R = 98 \text{ T} \cdot 0,02 \text{ A} \cdot 0,10 \text{ m} - 10 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$R = 98 \cdot \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} \cdot 0,02 \text{ A} \cdot 0,10 \text{ m} - 9,8 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

$$R = 2 \cdot 98 \cdot 10^{-2} \text{ N} - 9,8 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

$$R = 9,8 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

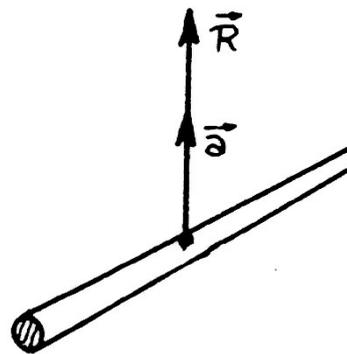
y la aceleración del conductor es:

$$a = \frac{R}{m}$$

$$a = \frac{9,8 \cdot 10^{-2} \text{ N}}{\frac{P}{g}}$$

$$a = \frac{9,8 \cdot 10^{-2} \cdot \text{N}}{10 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ N}} \cdot \frac{9,8 \text{ m/s}^2}{9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$a = 9,8 \text{ m/s}^2$$



Es decir que el conductor manifestará una aceleración hacia arriba, precisamente de módulo igual al de la aceleración de la gravedad \bar{g} .

c) ¿Cómo lograr restablecer el equilibrio?

¿Cómo hacer que la fuerza \bar{F} producida por el campo magnético recupere el valor que equilibra a \bar{P} ? (Recuerde que $i' = 2i$).

Se podrá girar el conductor de tal manera que forme un ángulo α con las líneas de inducción, de tal manera que:

$$F'' = P$$

$$B \cdot i' \cdot \ell \cdot \text{sen } \alpha = P$$

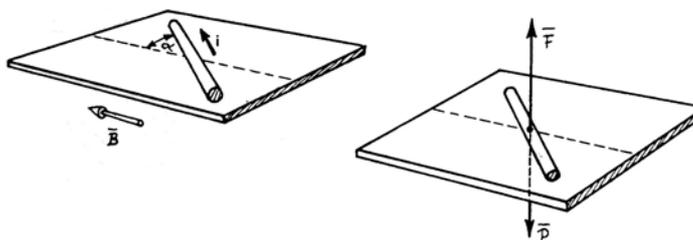
$$\text{sen } \alpha = \frac{P}{B \cdot i' \cdot \ell}$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{9,8 \cdot 10^{-2} \text{ N}}{98 \text{ T} \cdot 0,02 \text{ A} \cdot 0,10 \text{ m}}$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{1}{2}$$

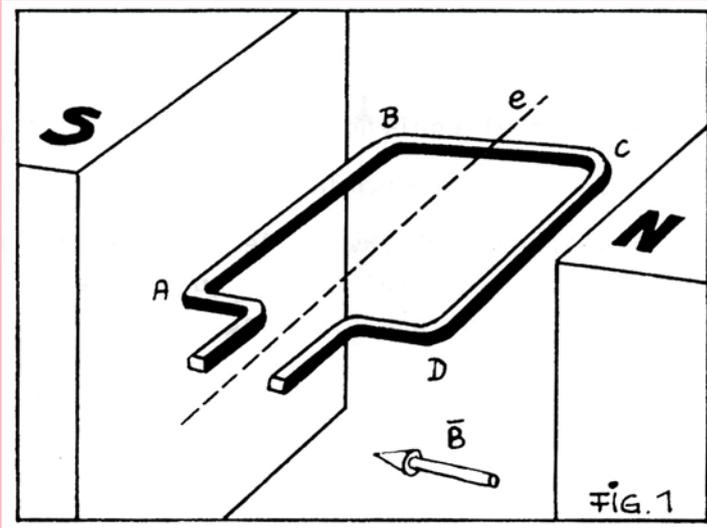
$$\alpha = 30^\circ$$

es decir, si con $i' = 20 \text{ mA}$ el conductor es colocado formando un ángulo $\alpha = 30^\circ$ con las líneas de inducción, podemos lograr que el conductor se quede en reposo dentro del campo.



Problema 4

Una espira conductora rectangular se encuentra dentro de un campo magnético uniforme como lo indica la figura.



El vector inducción tiene módulo $B = 0,5 \text{ T}$; $AB = 10 \text{ cm}$ y $BC = 5 \text{ cm}$.

La espira puede rotar alrededor del eje e .

Supongamos que en la espira se establece una corriente eléctrica de intensidad $i = 4 \text{ A}$

Determinar:

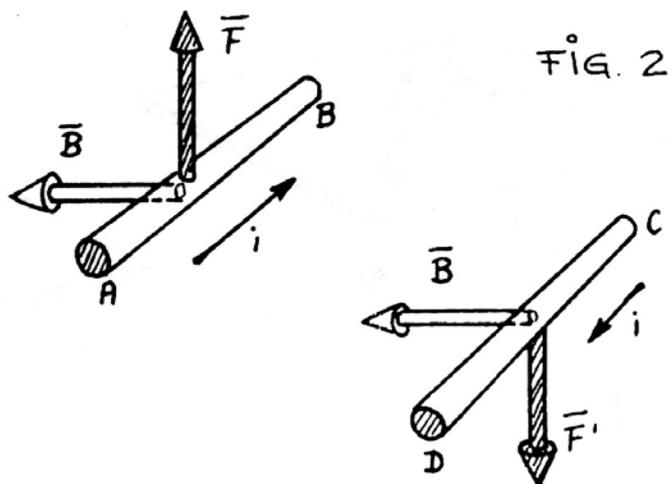
- ¿Qué le ocurre a la espira cuando se encuentra en la posición de la figura, es decir con su plano paralelo al vector \vec{B} ?
- ¿Qué le ocurre a la espira si se la ubica perpendicularmente a las líneas de inducción?

- Todo conductor por el que circula una corriente eléctrica, al ser ubicado en un campo magnético experimenta la acción de una fuerza. En nuestro caso, el tramo rectilíneo \overline{AB} estará sometido a la fuerza \vec{F} de módulo.

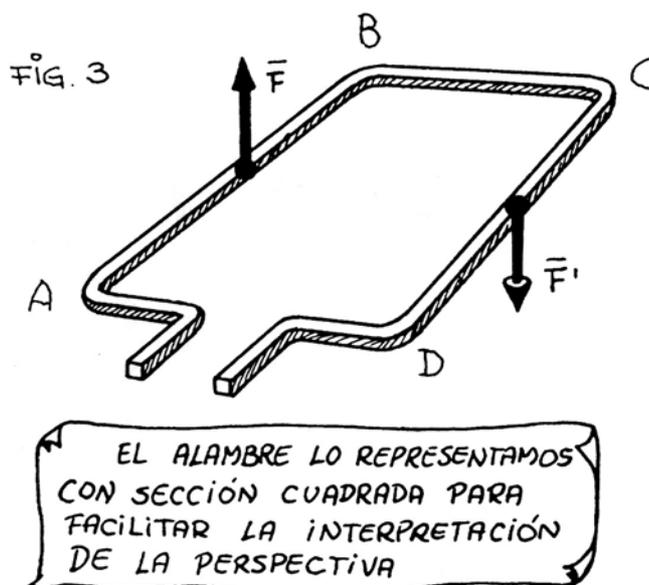
$$F = Bi \ell \sin \alpha$$

$$F = Bi \ell, \text{ pues } \alpha = 90^\circ$$

En el tramo CD , de igual longitud que el tramo AB , la corriente tiene un sentido que es opuesto al que tiene en el tramo AB . Sobre la espira actúan dos fuerzas \vec{F} y \vec{F}' .



Estas fuerzas son paralelas, de igual módulo, pero de sentidos opuestos. Luego, \vec{F} y \vec{F}' constituyen una cupla, es decir, que la espira está sometida a la acción de un momento M .



Por efecto de M ., la espira se acelera angularmente:

$$\vec{\gamma} = \frac{\vec{M}}{I_e}$$

donde I_e es el momento de inercia (o inercia rotacional de la espira respecto del eje de rotación e) y $\vec{\gamma}$ el vector aceleración angular del movimiento de rotación.

Observe que sobre los tramos \overline{BC} y \overline{AD} (por ser paralelos a las líneas de inducción) es $\vec{F} = 0$.

Cuando la espira gira sobre los tramos \overline{BC} y \overline{AD} , aparecen fuerzas; pero, éstas son paralelas al eje de rotación. En consecuencia, el momento de estas fuerzas respecto del eje es nulo; sólo resta la cupla que integran las fuerzas sobre \overline{AB} y \overline{CD}

Calculemos el momento (el módulo del momento) producido como consecuencia de las fuerzas sobre \overline{AB} y \overline{CD} .

$$M = F \cdot d$$

En la posición de la figura 1 (espira paralela a las líneas de inducción):

$$d = \overline{BC}$$

$$\text{Si } \overline{AB} = \overline{CD} = 10 \text{ cm}$$

$$\text{y } \overline{BC} = 5 \text{ cm}$$

$$i = 4 \text{ A}$$

$$B = 0,5 \text{ T}$$

$$\text{Es } F = Bil$$

$$F = 0,5 \text{ T} \cdot 4 \text{ A} \cdot 0,10 \text{ m}$$

$$F = 0,2 \text{ N}$$

$$M = 0,2 \text{ N} \cdot 0,05 \text{ m}$$

$$M = 0,1 \text{ Nm}$$

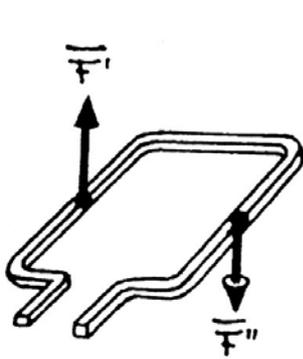


fig.4

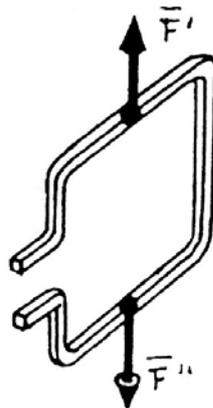


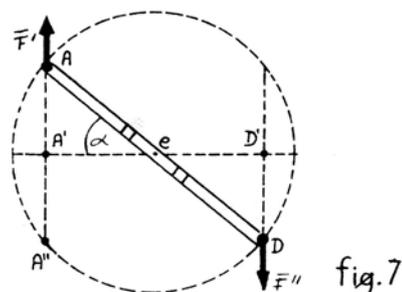
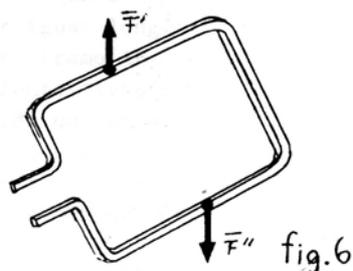
fig.5

- b) ¿Qué le ocurre a la espira si se la ubica perpendicularmente a las líneas de inducción?

En casos intermedios, por el momento \overline{M} , si la espira estaba inicialmente en reposo, es solicitada a rotar alrededor del eje e (ver figura 7). Si permitimos que ello ocurra, se producirá la modificación del brazo de momento (de la distancia entre las rectas de acción de ambas fuerzas $\overline{F'}$ y $\overline{F''}$). Si la espira rota un ángulo α , el brazo de momentos (ver figura) es ahora: $\overline{A'D'} = \overline{AD} \cos \alpha$ y, por lo tanto, el módulo de

$$M = F \cdot \overline{AD} \cdot \cos \alpha$$

se reduce al aumentar α ; cuando $\alpha = 90^\circ$, la espira se ubicará perpendicularmente a las líneas de inducción y las fuerzas F' y F'' se harán colineales: El momento μ se anula (ver figura 5) y se logra una posición en la que es posible el equilibrio estable.



Problema 5

Un protón penetra en un campo magnético uniforme de vector inducción \vec{B} , con velocidad \vec{v}_0 perpendicular a las líneas inducción.

Suponiendo que $B = 2 \text{ T}$ y que el módulo de la velocidad es $v_0 = 4 \cdot 10^7 \text{ m/s}$, respondamos el siguiente cuestionario:

- ¿Qué le ocurre a esa partícula?
- ¿Qué forma tiene su trayectoria dentro del campo?
- ¿Qué sucedería si \vec{B} duplica su módulo?
- ¿Qué sucedería si con $B = 2 \text{ T}$, la partícula duplica su velocidad?

Recordemos que

- $m = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
- $q = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

- Toda partícula cargada, al penetrar en un campo magnético se encuentra, en general, bajo la acción de una fuerza. ¿Puede ocurrir que no actúe ninguna fuerza sobre la partícula? Sí: cuando la partícula penetra en la dirección de \vec{B} .

En efecto, la fuerza que el campo magnético le produce a una partícula electrizada en movimiento es perpendicular al plano que determinan \vec{v}_0 y \vec{B} (\vec{v}_0 es la velocidad de la partícula y \vec{B} el vector inducción del campo). Es de módulo

$$F = B \cdot q \cdot v_0 \cdot \sin \alpha$$

donde α es el ángulo que determinan los vectores \vec{B} y \vec{v}_0 .

$$\text{Si } \alpha = 90^\circ, \text{ es } F = B \cdot q \cdot v_0$$

La fuerza \vec{F} está permanentemente dirigida hacia un punto O.

$$F = 2 \text{ T} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot 4 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$F = 3,2 \cdot 4 \cdot 10^{-19} \cdot 10^7 \text{ N}$$

$$F = 12,8 \cdot 10^{-12} \text{ N}$$

- La trayectoria que describe la partícula es un arco de circunferencia; haga observar que como siempre \vec{F} es perpendicular a v , no existe componente de \vec{F} según la tangente a trayectoria y por ello es nula la aceleración tangencial;

luego v_0 es constante y el movimiento es uniforme. Pero si v_0 es constante, lo mismo que B y q , el módulo de \vec{F} también lo es: $F = B \cdot q \cdot v_0$.

Siendo:

$$F = \frac{m \cdot v^2}{r} \text{ (fuerza centrípeta)}$$

Es $r = \frac{m \cdot v^2}{F}$, debe ser r constante y la trayectoria es circular.

La partícula se mueve sobre una circunferencia con movimiento uniforme

$$r = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg } (4 \cdot 10^7 \text{ m/s})^2}{12,8 \cdot 10^{-12} \text{ N}}$$

$$r = \frac{1,67 \cdot 16}{12,8} \cdot \frac{10^{-27} \cdot 10^{14}}{10^{-12}} \text{ m}$$

$$r = 2,09 \cdot 10^{-1} \text{ m}$$

$$r = 0,21 \text{ m}$$

c) ¿Qué sucedería si \vec{B} duplica su módulo?

En el caso de que \vec{B} duplicara su módulo, el protón se encontraría sometido a una fuerza de módulo doble pues $F = B \cdot q \cdot v_0$; es decir, F es directamente proporcional al módulo de B ; luego, el protón describiría una trayectoria circular de radio mitad:

$$r = \frac{m \cdot v^2}{F}$$

d) Retomando el campo inicial, es decir $B = 2 \text{ T}$, la fuerza que actúa sobre el protón ($F = B \cdot q \cdot v_0$) se duplicará al duplicarse v

En consecuencia, el radio de la trayectoria:

$$r = \frac{m \cdot v_0^2}{F}$$

se convierte en:

$$r' = \frac{m \cdot (2 \cdot v_0)^2}{2 \cdot F}$$

Es decir:

$$r' = 2 r$$

Se duplica el radio; es menor la curvatura de la trayectoria.

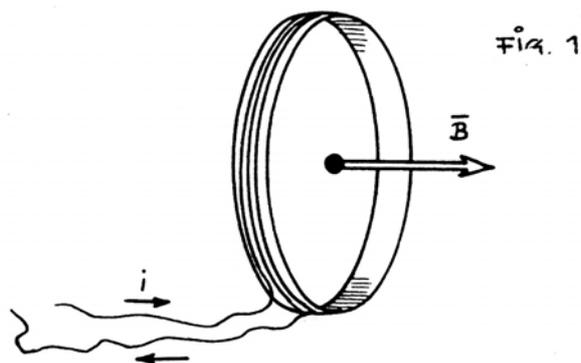
**TERCERA SECCIÓN.
ACTIVIDADES “MAGNÉTICAS”**

Le presentamos un conjunto de actividades que plantean problemas que podrá resolver revisando la segunda sección de este módulo (“Algunos problemas resueltos”). Pensamos que si usted concreta las tareas propuestas, estará en condiciones de evaluar su propio método para la resolución de problemas. Es fundamental incorporar una metodología que nos permita cambiar la actitud de muchos alumnos, más preocupados por la solución numérica de un problema que por su interpretación física.

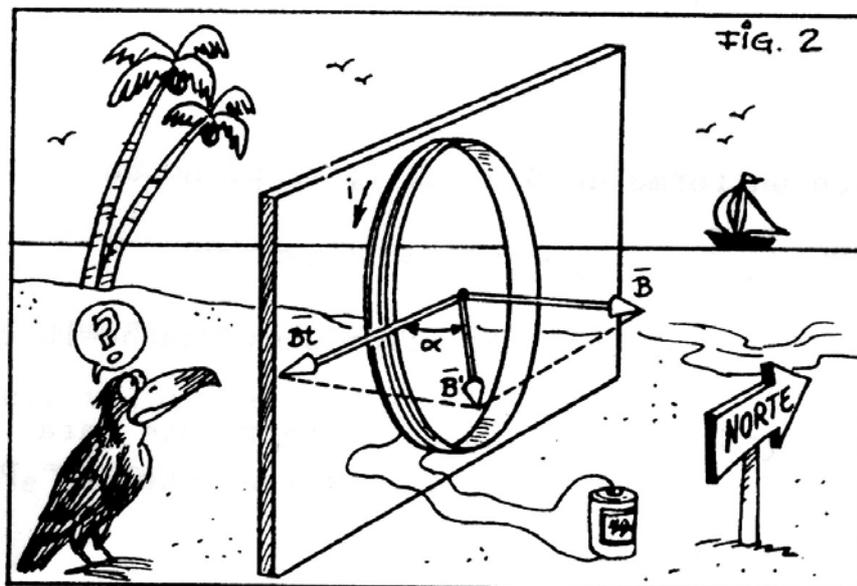
Actividad 1

Una bobina circular de 100 espiras apretadas tiene un radio de 10 cm (prácticamente todos tienen el mismo centro y el espesor de la bobina es despreciable respecto de su radio). Es lo que se conoce como bobina de Helmholtz.

1.1. ¿Qué corriente eléctrica debe existir en el conductor de la bobina para que en el centro de ella sea $B = 5 \cdot 10^{-4} \text{ T}$ El medio en el cual está sumergida la bobina es aire; es decir que, prácticamente, todo ocurre como si estuviéramos en el vacío (por lo tanto, $k = 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$).

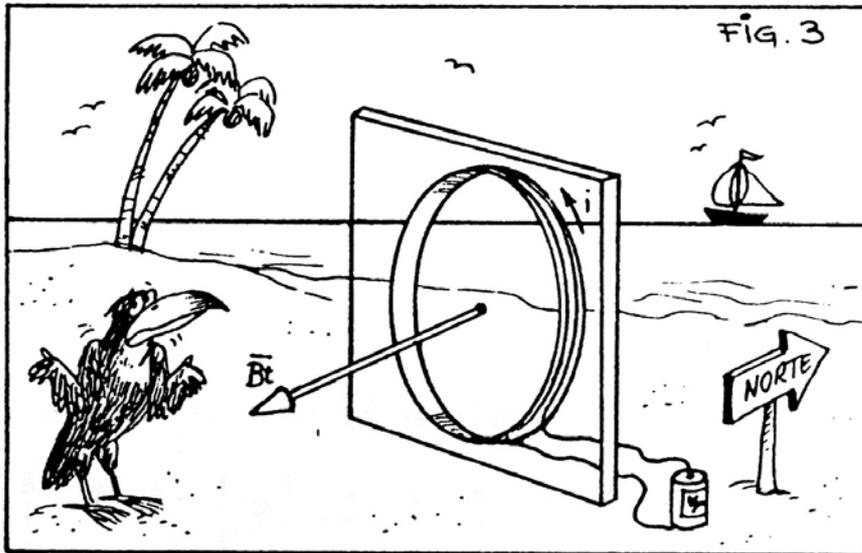


1.2. Se coloca esa bobina en el meridiano magnético del lugar; la componente horizontal del campo magnético terrestre es $B_t = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$. Calcular el ángulo de desviación α de una pequeña brújula colocada en el centro de la bobina.



1.3. ¿Qué ocurrirá con el valor de α si la intensidad de la corriente de la bobina se reduce a la mitad?

1.4. ¿Qué ocurrirá con la aguja magnética si la bobina se coloca con su plano perpendicular a \vec{B}_i ?



1.5. En este último caso, ¿qué características debe tener la corriente eléctrica para que se anule el campo magnético resultante?

Actividad 2

Un solenoide está integrado por 1000 espiras de 2 cm de diámetro; la longitud del solenoide es $L = 40$ cm y el medio es el aire.

2.1. Calcular \vec{B} en la zona central del solenoide cuando $i = 1$ A.

2.2. Calcular el flujo de inducción concatenado⁵ por el solenoide.

Actividad 3

Una bobina rectangular de 20 espiras está suspendida dentro de un campo magnético uniforme de $B = 0,2$ T; el plano de la bobina es paralelo al vector \vec{B} .

Las dimensiones de la bobina son: alto = 10 cm; ancho = 10 cm.

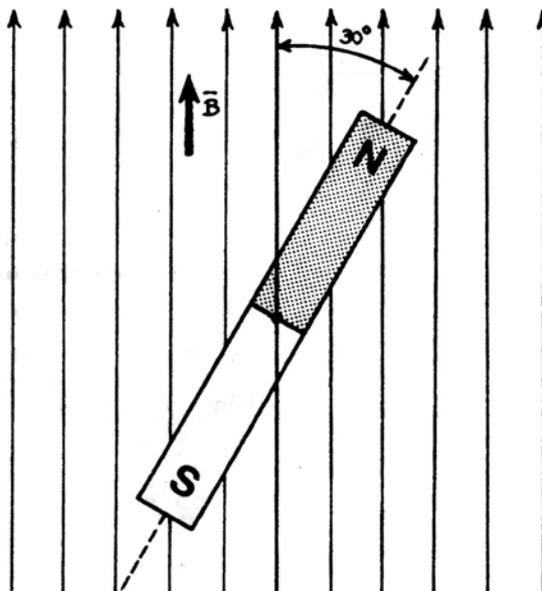
3.1. ¿Cuál debe ser la intensidad de la corriente para que el momento mecánico que actúe sobre la bobina sea igual a $5 \cdot 10^{-3}$ Nm?

3.2. ¿En qué posición de la bobina el momento mecánico es nulo?

⁵ La palabra concatenado es de uso frecuente en magnetismo. Se refiere a cuánto flujo queda encerrado.

Actividad 4

Un imán prismático tiene un momento magnético \vec{M} de módulo igual $10 \frac{\text{Nm}}{\text{T}}$.



- 4.1. ¿Cuál es el momento mecánico que actúa sobre ese imán si se lo ubica dentro de un campo magnético uniforme, inclinado 30° con respecto a las líneas de inducción? ($B = 0,2 \text{ T}$).
- 4.2. Si el imán está orientado en la dirección de \vec{B} , ¿cuál es el momento mecánico creado por el campo sobre el imán?
- 4.3. Si el imán es colocado perpendicularmente a las líneas de inducción, ¿cuál es el momento mecánico que se le debe aplicar para que el imán permanezca en esa posición?

Actividad 5

Un haz de electrones penetra perpendicularmente en un campo magnético uniforme de inducción magnética $B = 4 \cdot 10^{-3} \text{ T}$, con velocidad $v = 10^7 \text{ m/s}$; la carga eléctrica de un electrón es $q_e = -1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ y su masa vale $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

- 5.1. Prever qué le ocurrirá al haz de electrones.
- 5.2. Ídem, en el caso de ser $B = 2 \cdot 10^{-3} \text{ T}$.
- 5.3. ¿En qué casos el electrón no experimenta la acción del campo?

Actividad 6

Un haz de partículas α es acelerado a través de una diferencia de potencial de 2.000 volt y, luego, penetra en un campo magnético uniforme según una dirección perpendicular a las líneas de inducción. Si $B = 0,4 \text{ T}$, calcular:

- 6.1. El radio de la trayectoria del campo magnético.

6.2. La variación que experimenta la energía cinética de las partículas dentro del campo magnético.

(Suponer que el medio en que se mueven las partículas α es el vacío).

Actividad 7

Partículas positivamente cargadas que no poseen todas la misma velocidad, penetran en un campo magnético uniforme de $B = 0,5$ T. Mediante aplicación de un campo eléctrico uniforme de intensidad $\vec{\varepsilon}$ superpuesto al campo magnético, es posible lograr que únicamente las partículas de velocidad $v = 2 \cdot 10^4$ m/s pasen sin desviarse por esos campos.

Determinar dirección, sentido y módulo de $\vec{\varepsilon}$ para lograr ese propósito.

Actividad 8

Partículas α de masa $m = 6,68 \cdot 10^{-27}$ kg y carga eléctrica $q = + 2,1,60 \cdot 10^{-19}$ C son aceleradas en un ciclotrón en el que existe un campo magnético de $B = 1$ T.

- 8.1. ¿Cuál es el valor del período del movimiento en cada partícula α ?
- 8.2. ¿Cuál debe ser la frecuencia de la diferencia de potencial alternada que se debe aplicar entre las "D" del ciclotrón?
- 8.3. ¿Cuál es la velocidad y la energía cinética de una partícula α cuando su trayectoria es un arco de circunferencia de radio $r = 20$ cm?

La actividad siguiente le permitirá apreciar cómo es posible emplear fotografías para realizar estudios interesantes, vinculados con los movimientos de partículas cargadas. Usted podrá sacar copias de esas fotografías y planificar actividades.

Sus alumnos utilizarán esas fotos en trabajos grupales o individuales.

Actividad 9

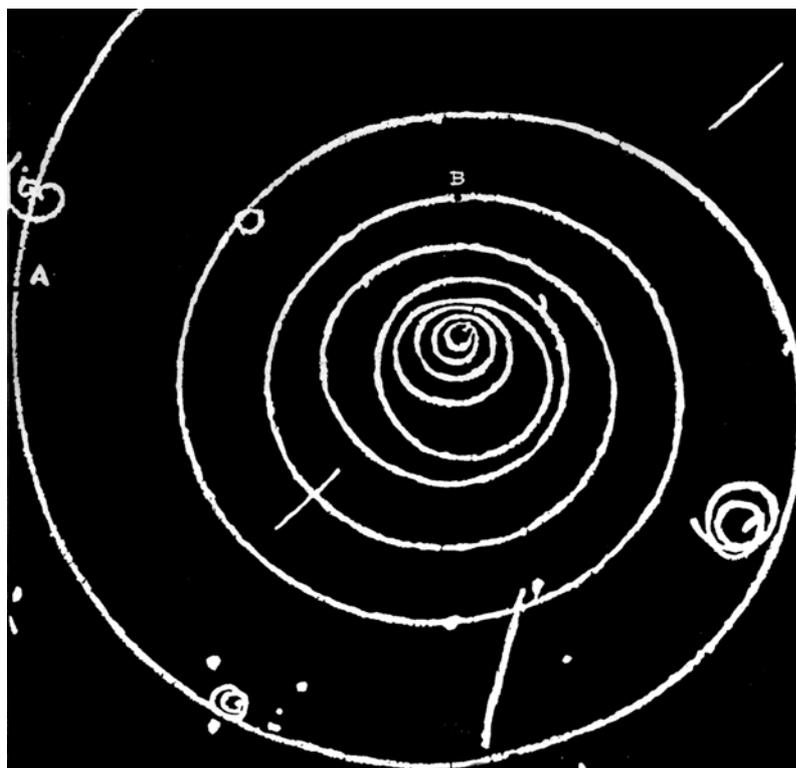
La fotografía presenta el trazo de un electrón en una cámara de burbujas de hidrógeno líquido; la trayectoria es curva debido al campo magnético (uniforme) que apunta hacia adelante de la página, perpendicularmente a ésta: el electrón penetra por la parte superior izquierda.

Sabiendo que:

$$B = 2 \text{ T}$$

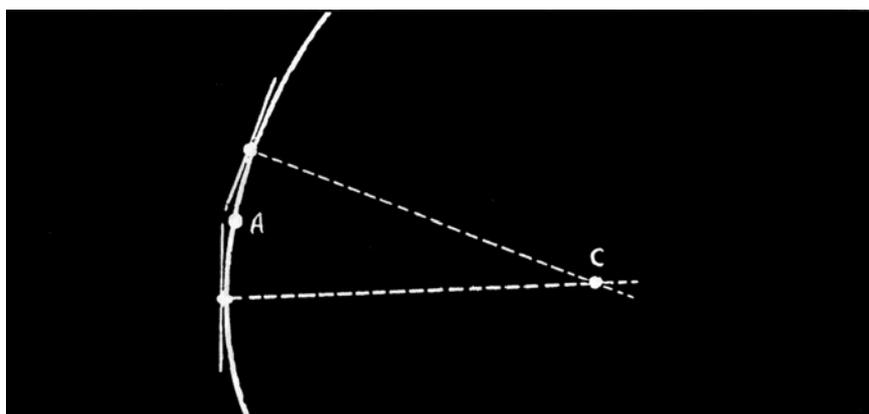
$$m_e = 0,91 \cdot 10^{-27} \text{ g}$$

$$q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$



responder al siguiente cuestionario:

9.1. ¿Qué valor tiene el radio de la trayectoria del electrón en la posición A (sobre la trayectoria considere dos puntos y ubíquelos a ambos lados de A y muy próximos a este punto. Trace en esos dos puntos las tangentes a la trayectoria y las normales correspondientes: donde se cortan esas normales está ubicado el centro de curvatura C de la trayectoria en A y el segmento \overline{AC} es el radio pedido).



- 9.2. ¿Qué valor tiene la velocidad del electrón en la misma posición A?
- 9.3. ¿Qué valor tiene el radio de la misma trayectoria en la posición B?
- 9.4. ¿Qué valor tiene velocidad del electrón en la posición B?
- 9.5. ¿Qué ocurre con la velocidad del electrón al desplazarse sobre su trayectoria?
- 9.6. ¿Cómo justifica el decrecimiento del radio de curvatura de la trayectoria?
- 9.7. ¿Qué ocurriría con la forma de la trayectoria del electrón, dentro del campo magnético uniforme, en el caso de no existir ningún elemento que se le oponga?

**CUARTA SECCIÓN.
TEMAS OPTATIVOS**

En esta sección le presentamos algunos temas de carácter optativo que usted podrá utilizar, eventualmente, para discutir con sus alumnos.

¿Cómo se producen las auroras polares?

El fenómeno es similar al producido en los tubos de neón de los carteles de propaganda. En ellos, un gas enrarecido es excitado por una corriente eléctrica, produciéndose así la emisión de luz.

En el caso de las auroras, el gas enrarecido es la alta atmósfera (entre 60 y 1.000 km) y las partículas que excitan a los átomos y moléculas de la atmósfera son iones de alta velocidad que se mueven dentro de ella.

El descubrimiento de las bandas de Van Allen permitió comprender mejor el fenómeno.

¿Qué son las bandas de Van Allen?

El 31 de enero de 1958, el satélite americano "Explorer I" fue puesto en órbita alrededor de la Tierra. Para investigar la llamada radiación cósmica, el satélite estaba equipado con instrumentos muy sensibles. Esos instrumentos eran eficientes contadores Geiger-Muller.

La trayectoria del satélite estaba comprendida entre 300 km y 2.500 km por sobre la superficie terrestre.

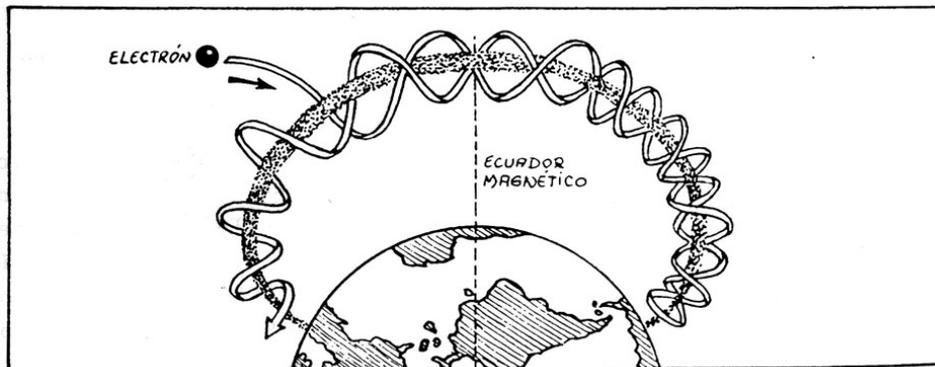
Los registros logrados por los instrumentos del "Explorer I" mostraron un fenómeno inesperado: Cuando el satélite penetraba en ciertas regiones que rodean a la Tierra, los contadores detectaban un incremento de sus indicaciones que superaba el límite de medición; es decir, se saturaban. Los resultados obtenidos por el Explorer I fueron confirmados por los viajes efectuados por los satélites Explorer III y IV, por los cohetes Pioneer I, III y IV y por los satélites soviéticos Sputnik II y III.

La interpretación de estas mediciones anormales se debe al físico americano James A. Van Allen, nacido en 1914. Sus investigaciones nos permiten aceptar que la Tierra está rodeada por **cinturones de radiaciones** que hoy conocemos, precisamente, como cinturones o bandas de Van Allen.

¿Cómo se producen esas bandas?



Desde el espacio, llegan a las proximidades de la Tierra partículas cargadas –en particular, electrones y protones–, que al encontrar el campo magnético terrestre son atrapadas por él. Las partículas cargadas describen órbitas espiraladas, tal como lo recordado al tratar las llamadas “botellas magnéticas”, y realizan un movimiento pendular entre ambas zonas polares. Al aproximarse a esas zonas, se acercan a la superficie terrestre y, al penetrar en la atmósfera, excitan a los átomos y moléculas de ésta, como ocurre en un tubo de descarga gaseosa. Solamente dentro de la atmósfera, de la atmósfera polar, se aprecia el fenómeno luminoso. Las investigaciones indican que la luz polar tiene lugar entre 60 y 1.000 km de la superficie de la Tierra.



Con lo dicho, quedaría respondida también la pregunta: *¿Por qué se produce la luz polar sólo en la atmósfera y en la zona polar?*

Veamos si se ha encontrado respuesta para otras preguntas que formulan o pueden formular nuestros alumnos.

¿Existe alguna relación entre las presentaciones aurales y la aparición de las manchas solares?

Aunque es muy difícil predecir el momento en que aparecen las auroras polares, existe una estrecha relación entre su aparición y la presentación de las manchas solares.

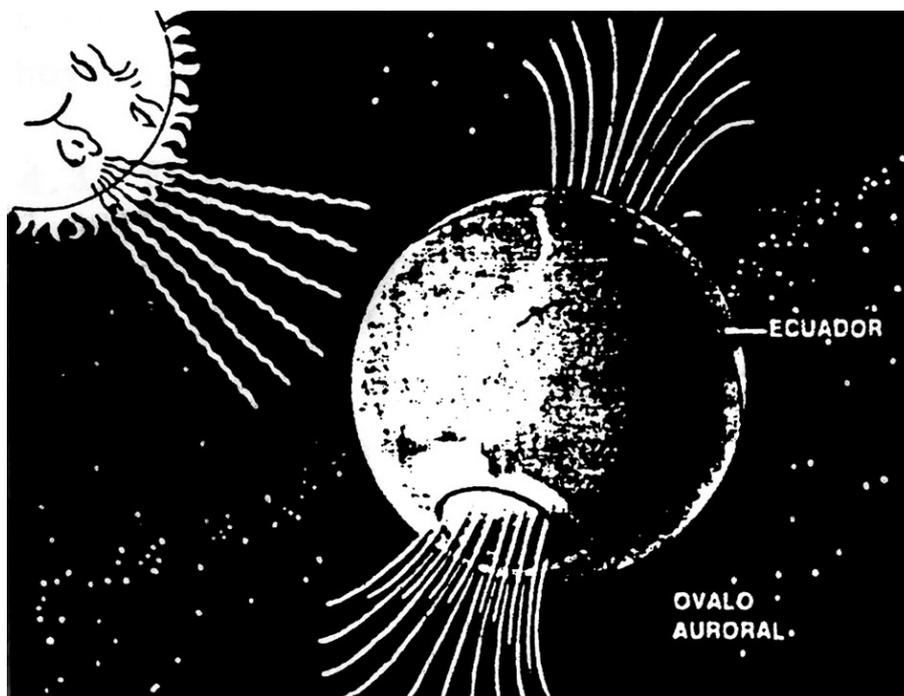
Se ha podido constatar que, siempre que se observa una gran mancha negra en la superficie solar, en un breve plazo, se observa también una aurora polar. Cuando las manchas solares son muy abundantes las exhibiciones aurales son más frecuentes. ¿Cómo explicar esta relación?

Se ha constatado que, con las manchas solares, se arrojan del Sol enormes cantidades de partículas cargadas, en particular, radiación alfa y electrones. Esas partículas son las que, atrapadas por el campo magnético terrestre, dan lugar a las bandas de Van Allen.

Se han detectado dos anillos o bandas de Van Allen. De ellos, el más exterior está constituido preferentemente por electrones; el más interno tiene, en cambio, protones.

Según se cree son los protones los que, en particular, dan lugar a los fenómenos luminosos polares.

Se ha observado también que, junto a la aparición de las manchas solares, manchas que se incrementan cada once años, se producen alteraciones en las transmisiones radioeléctricas, especialmente en onda corta. En algunas oportunidades, hasta se han interrumpido esas comunicaciones.



Líneas de fuerza que definen los óvalos aurorales en los hemisferios Norte y Sur

Se suele recordar que Guillermo Marconi constató, el 20 de septiembre y el 14 de octubre de 1927, dos casos de perturbaciones en las comunicaciones de señales radioeléctricas; esas irregularidades ocurrieron coincidentemente con la aparición de grandes manchas solares, perturbaciones del campo magnético terrestre y con la presentación de intensas auroras boreales.

¿Se ha encontrado alguna explicación a estas perturbaciones en las comunicaciones?

Entre los 60 y 200 km de la superficie terrestre se encuentra una región altamente ionizada llamada ionósfera; es parte de la atmósfera y rodea totalmente a la Tierra.

Los fotones ultravioletas procedentes del Sol afectan el grado de ionización de esa capa.

Las ondas radioeléctricas son reflejadas por la ionósfera y, de esa manera, aquéllas llegan a cualquier parte de la Tierra. Cualquier alteración que experimente la capa ionizante afecta las radiocomunicaciones. Las tormentas solares actúan sobre la ionósfera, en particular, a través de los rayos ultravioletas que envían hacia la Tierra.

Magnetismo en el interior de seres vivos

Recientemente, se ha descubierto que existen ciertos tipos de bacterias acuáticas que se orientan mediante el campo magnético terrestre, es decir que funcionan como pequeñas brújulas. Estos organismos, llamados "bacterias magnetotácticas", sintetizan pequeños cristales de magnetita (Fe_3O_4), el óxido de hierro conocido por los primeros navegantes como piedra imán, para luego acarrearlos en su interior.

Tal vez usted se está preguntando para qué le podría servir a una bacteria orientarse con el geomagnetismo. Hay una razón. El campo geomagnético apunta hacia el norte **y hacia abajo** en el hemisferio septentrional, y al norte **y hacia arriba** en el

hemisferio meridional, con un valor absoluto del ángulo de inclinación que aumenta a medida que uno se desplaza desde el ecuador geomagnético hacia uno cualquiera de los polos. Debido a la inclinación del campo magnético terrestre, las bacterias que buscan el norte en el hemisferio septentrional migran hacia abajo y las que buscan el sur migran hacia arriba. Por otra parte, las bacterias magnetotácticas son organismos del fondo, anaerobios (no toleran la presencia del oxígeno), o microaerófilos (sobreviven mejor en un ambiente pobre en oxígeno). Una tendencia a migrar hacia abajo les resultaría ventajosa en el sentido de que les ayudaría a evitar los efectos tóxicos de la mayor concentración de oxígeno de la superficie del agua. Si atendemos a este razonamiento, cabe esperar que, a lo largo de la evolución, la selección natural haya permitido sobrevivir a los organismos más aptos en cada hemisferio. Y, efectivamente, es así. Cuando se forman muestras en localidades pertenecientes a cada hemisferio, se encuentra que en el hemisferio meridional predominan las buscadoras del sur, mientras que en el hemisferio septentrional predominan las buscadoras del norte. En cambio, en un punto neutro (Fortaleza, Brasil), lugar próximo al ecuador geomagnético, se encuentra aproximadamente la misma proporción de bacterias buscadoras del sur y del norte.

La presencia de magnetita en los seres vivos no se limita únicamente a estas bacterias; se ha detectado su presencia en quitones (un molusco marino), abejas melíferas, mariposas, palomas mensajeras y, recientemente, en delfines. El valor biológico adaptativo de la presencia de esta sustancia en tales organismos es hoy objeto de investigación.

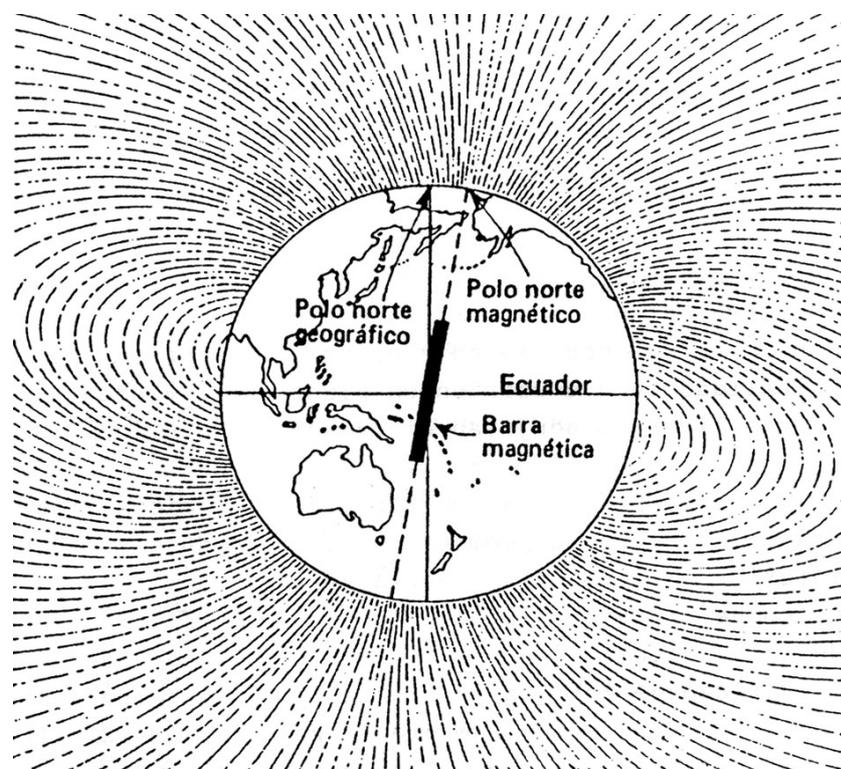
El magnetismo terrestre

Como todo el mundo sabe, una brújula apunta invariablemente al norte o a sus proximidades. Ya a principios del siglo XIV, los marinos aprovechaban este fenómeno para la navegación. William Gilbert (1600), médico de la reina Isabel I, explicó el fenómeno proponiendo que la propia Tierra era un inmenso imán esférico cuyos polos estaban situados casi en los polos geográficos. Si ello era así, y como los polos magnéticos opuestos se atraen y los iguales se repelen, los extremos de las agujas de la brújula tenderían, naturalmente, a apuntar uno al norte y el otro al sur. Esta fue la intuición de Gilbert. Los polos N y S de un imán deberían llamarse, más adecuadamente, el polo que busca el norte y el polo que busca el sur. (Es interesante resaltar que el polo magnético terrestre situado en el polo norte geográfico es, de hecho, un polo, magnético sur; debe serlo para poder atraer el polo norte de una brújula).

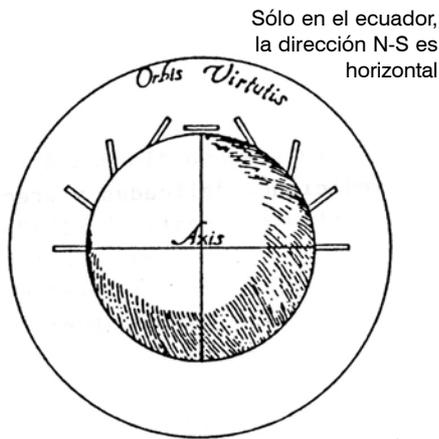
La explicación de Gilbert era correcta; pero, como ocurre siempre con la investigación científica, planteaba otra pregunta: ¿Por qué la Tierra es un imán? Es una buena pregunta. La más simple de entre las teorías sobre el origen del geomagnetismo fue la suposición de que el centro de la Tierra era un inmenso imán permanente. Hacia mediados de nuestro siglo se sabía perfectamente que, entre los metales corrientes, sólo el hierro y el níquel podían ser imanes permanentes. (Estos materiales se llaman ferromagnéticos). Como el núcleo terrestre está formado principalmente de hierro y níquel, la explicación del magnetismo terrestre parecía obvia. Pero, este supuesto fracasó por una razón simple. Todas las sustancias ferromagnéticas pierden su ferromagnetismo cuando son calentadas por encima de determinada temperatura. Es decir, un imán deja de serlo al alcanzar cierta temperatura, llamada "Punto de Curie" (770°C para el hierro y 358°C para el níquel). Entonces, resultaba evidente que el hierro y el níquel del núcleo no podían formar un imán permanente debido a que la temperatura del núcleo era, sin duda, más elevada que los puntos de Curie de cualquier metal.

Como la parte externa del núcleo terrestre es líquida, según lo han revelado las ondas sísmicas, su temperatura evidentemente es más elevada que el punto de fusión del hierro y del níquel, y experimentos de laboratorio demuestran que los puntos de Curie del hierro y del níquel son mucho menores que sus temperaturas de fusión. De hecho, sólo los 50 Km más externos de la Tierra están suficientemente fríos como para permitir que sea ferromagnético cualquiera de los materiales que contienen. La Tierra no es, pues, un imán permanente.

Otra hipótesis fue la de que cualquier cuerpo que girase era inevitablemente magnetizado a consecuencia de su rotación. El físico P. M. S. Blackett (premio Nobel), que propuso la hipótesis, señaló que el magnetismo de cuerpos celestes tales como el Sol, determinadas estrellas y la Tierra podía explicarse en todos los casos como debido a sus rotaciones respectivas. Resaltó que esta explicación no se basaba en leyes físicas establecidas, sino que requería postular un concepto enteramente nuevo. A fines de los años '40, Blackett se propuso demostrar su teoría mediante el desarrollo de un magnetómetro sorprendentemente preciso. Pero, sus esfuerzos fracasaron y refutaron su propia hipótesis. Afortunadamente, al describir su fracaso dio una descripción notablemente completa de sus mediciones delicadas y precisas en un artículo famoso titulado "Experimento negativo" (1952). En realidad, en un sentido más profundo, el experimento no fue ningún fracaso, ya que de él quedó el magnetómetro sorprendentemente preciso que desarrolló para hacer el experimento. Posteriormente, cuando Blackett comenzó a estudiar el magnetismo de las rocas, se vio que este magnetómetro era un instrumento de la mayor utilidad, con lo cual resultó que estos experimentos hicieron una contribución muy grande al desarrollo de la geofísica.



El campo magnético terrestre se parece mucho al campo que se produciría si se colocara en el centro de la Tierra una barra magnética gigantesca ligeramente inclinada (11°) respecto al eje de rotación. (Según F. Press y R. Siever. Earth. W, H. Freeman and Company, San Francisco. 1974.)



Tierra magnética esférica de W. Gilbert (Según W. Gilbert, De Magnete Corporibus et the Magno Magnete Tellure Physiologica Nova. Short, 1600; Dover, Nueva York.)

De las numerosas teorías propuestas, sólo una explicación del origen del campo magnético terrestre ha sobrevivido: la que considera la Tierra como un electroimán, no como un imán permanente. Un campo magnético puede generarse o bien por un imán permanente formado de minerales ferromagnéticos, o bien por una corriente eléctrica. En los años '50 se llegó a la conclusión de que, como la Tierra estaba demasiado caliente para ser un imán permanente, debía ser una especie de electroimán, y se empezó a investigar la posibilidad de que corrientes eléctricas existentes en el interior de la Tierra produjeran el campo geomagnético.

Para proporcionar un flujo de electricidad suficiente como para crear el campo geomagnético, la conductividad eléctrica del interior de la Tierra debería ser tan alta como la del metal. El núcleo de hierro es la única parte de la Tierra con posibilidades de tener esta alta conductividad eléctrica. Además, para mantener el flujo de corrientes eléctricas y el campo geomagnético durante un tiempo geológicamente largo, debería existir constantemente una fuerza electromotriz. En otras palabras, el núcleo terrestre debe ser algo más que un buen conductor eléctrico por el cual circula la corriente. Debe, además, actuar como **una dinamo o como un generador**. Esta concepción del origen del geomagnetismo se llama "teoría de la dinamo".

Pero, resulta casi inconcebible que, en el interior del núcleo terrestre exista un mecanismo como el de los generadores con los que estamos familiarizados, piezas complicadas con alambres aislados. Sin embargo, ya en los años '60 se demostró que era posible, al menos teóricamente, que un cuerpo como el núcleo terrestre funcionara como una dinamo. En 1963 se logró construir un generador algo similar al descrito en la teoría. De todos modos, la teoría aún no ha quedado establecida completamente.

La teoría de la dinamo, tal como está planteada hoy en día, presupone una cadena sumamente compleja de procesos que tienen lugar en el núcleo terrestre. No vamos a dar una descripción detallada de tales fenómenos, pero es importante reconocer que, si la Tierra debe funcionar como un generador, se requieren las siguientes condiciones:

- El núcleo terrestre debe estar constituido por una sustancia capaz de conducir la corriente eléctrica con la misma facilidad con la que lo hace un metal.
- La sustancia debe estar en una forma líquida.
- Este líquido conductor debe estar sufriendo algún tipo de agitación, con lo cual el proceso de ser agitado suministraría la energía necesaria para mantener el campo magnético.

Estas condiciones hacen que sea casi forzoso que el núcleo de la Tierra esté constituido por un metal líquido que, probablemente, es hierro, el metal más común del universo.

Quizá lo más exacto sea reconocer que el origen del campo magnético terrestre sigue siendo un gran misterio.

El famoso geofísico F. Birch escribió lo siguiente en un clásico artículo (1952): “Los lectores incautos deberían tener en cuenta que el lenguaje corriente sufre modificaciones hacia formas vehementes cuando se aplica al interior de la Tierra; he aquí algunos ejemplos de equivalencias:

Forma vehemente	Significado corriente
cierto sin duda alguna prueba clara argumento irrefutable hierro puro	dudoso quizás vaga sugerencia objección trivial mezcla indeterminada de los elementos”

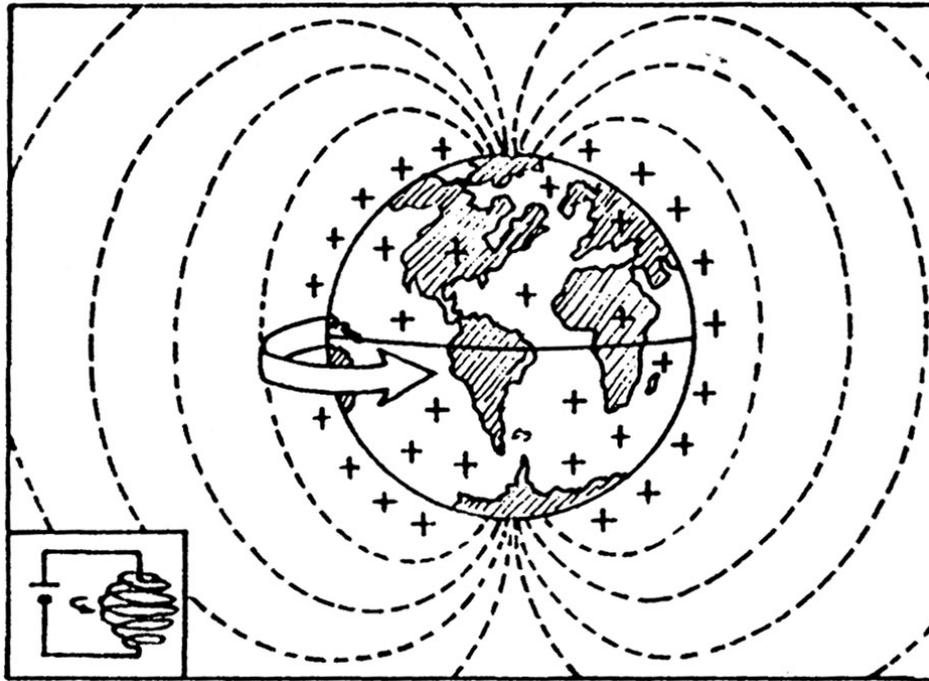
Paleomagnetismo: La historia del campo terrestre

Hay varios hechos que, durante mucho tiempo, parecieron desconectados, pero que tienen estrecha vinculación: la deriva de los continentes, o sea el movimiento lento de la corteza, como un cuerpo deformable, por el cual varía la cantidad y forma de los continentes; la rotación de la Tierra; el campo magnético terrestre y la deriva de la declinación magnética, o sea el cambio a través de los años de la diferencia que existe entre la dirección del norte geográfico y la que indica en verdad la brújula, que puede llegar a variar casi 10 grados en sólo un par de siglos.

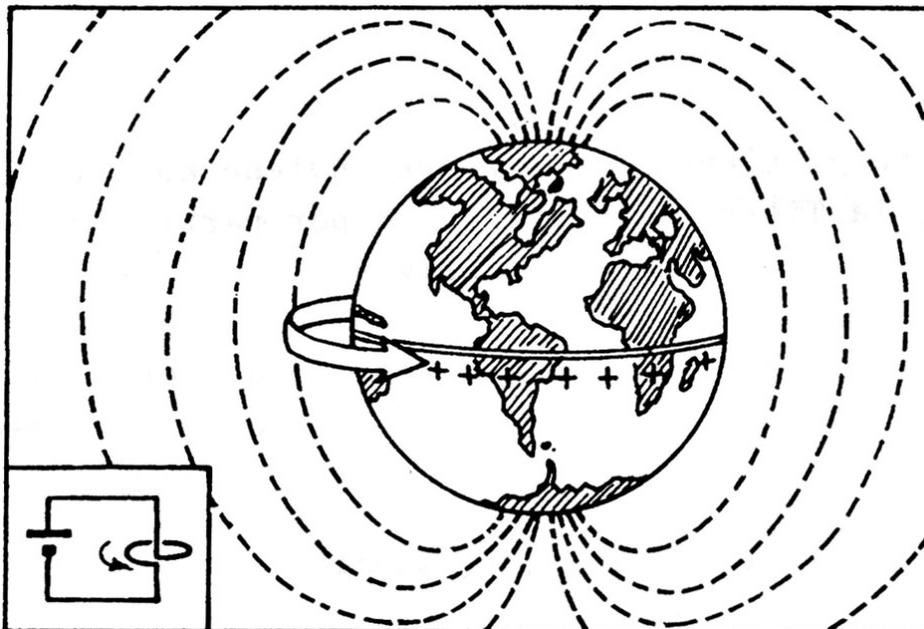
La historia sólo registra determinaciones del campo terrestre desde hace no más de 300 años. Sin embargo, puede conocerse cuál era la dirección del campo magnético de nuestro planeta, prácticamente en cualquier época histórica, mediante el recurso de estudiar la magnetización en rocas formadas en esa época (al enfriarse quedan con la dirección de magnetización en que estaban, y antes de enfriarse, o sea por encima de la temperatura de Curie, no retenían magnetización). Esta rama de la geología que estudia el magnetismo fósil se llama paleomagnetismo, tiene importancia en el estudio de la deriva continental y ha dado lugar a descubrimientos muy curiosos, como el hecho de que el campo magnético terrestre registra no sólo desviaciones sino, incluso, inversiones totales, de 180 grados, en intervalos de algunas decenas de miles de años.

Una idea para explicar el campo magnético terrestre

Se ha especulado que el campo terrestre podría estar determinado por una carga eléctrica neta que tuviese nuestro planeta. Efectivamente, la Tierra es bombardeada por partículas positivas y negativas provenientes del Sol, originadas en diversas reacciones nucleares y bien podría ocurrir que el balance neto de carga arrojase, en algún momento, un valor diferente de cero. Si la Tierra cargada gira junto con sus cargas, cada una de ellas describirá un círculo, que en los hechos equivale a una corriente eléctrica que circula por una espira.



Un modelo muy simple podría estar dado por la suposición de que la Tierra es esférica y está uniformemente cargada y gira a una velocidad angular de una vuelta cada día sideral. Un cálculo exacto de los efectos magnéticos en tal modelo requeriría del cálculo integral y habría que imaginar a la esfera compuesta por infinidad de tirillas de escaso espesor, orientadas según los paralelos. Pero, si sólo nos interesa el orden de magnitud, a los efectos de poner a prueba la viabilidad del modelo, podemos hacer algunas simplificaciones: Una de ellas es suponer que toda la carga eléctrica se encuentra en el ecuador, en vez de estar uniformemente distribuida; además, podemos tomar como intensidad representativa del campo magnético aquella que corresponde al centro de esa única espira o sea el centro de la Tierra; esto simplifica mucho el cálculo.



La carga concentrada en el ecuador equivale a una espira

El resultado, al que se arriba adoptando un valor de 10^{-7} tesla para el campo terrestre, es del orden de 10^{11} coulombs. Es decir, una carga de ese orden distribuida uniformemente en el ecuador, produce efectos magnéticos de intensidad comparable a la del campo magnético terrestre, debido al giro diario. Si la distribución es uniforme en superficie, el valor será otro, pero no muy diferente.

Ahora, nos preguntamos: ¿Se deberá a este efecto de carga eléctrica el campo magnético terrestre? Veamos: Una carga de 10^{11} coulombs distribuida en una esfera del tamaño de la Tierra, tendría en su superficie una intensidad de campo eléctrico de:

$$E = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{Coul}^2 \cdot 10^{11} \text{ Coul} / (6,4 \times 10^6 \text{ m})^2$$

$$E \cong 10^8 \text{ V/m}$$

¡Cien millones de volts por metro!

Lo exagerado de ese resultado nos muestra que no es cierto que el campo magnético terrestre se deba al giro de la carga eléctrica que pudiera poseer nuestro planeta.

Se ha mostrado con este ejemplo cómo puede proponerse un modelo explicativo de un fenómeno y, luego, rechazarse por no ser consistente con lo observado, sin necesidad de hacer los cálculos en detalle, sino sólo en el orden de magnitud.

A pesar de que la Tierra no posee una carga tan grande como para justificar por ella sola y su giro su conocido campo magnético, podría suceder que, de todos modos, sí tuviese carga, aunque de menor valor. ¿Qué experimento haría usted para decidir si la Tierra está cargada positiva o negativamente? ¿Cómo mediría la carga de la Tierra o el campo eléctrico en superficie?⁶

Cuestiones paradójales

- 1) Un método sencillo para construir un monopolo magnético.** Como sabemos, todo imán debe tener, indefectiblemente, dos polos: Norte y Sur. Si intentamos separar ambos polos, por ejemplo cortando un imán por la mitad, cada mitad adquiere nuevamente las dos polaridades. Sin embargo, el siguiente razonamiento parece refutar la creencia de que es imposible aislar un monopolo magnético.

Tomemos una bola de acero y dividámosla, a partir de la superficie, en partes piramidales. Después, imantemos cada una de estas partes, de modo que todas las puntas resulten con la misma polaridad (por ejemplo, Norte). Luego, armemos nuevamente la bola como muestra la figura.



⁶ Respuesta: Con la medición del gradiente de tensión vertical mediante un voltímetro de altísima impedancia.

Así, en la superficie quedará solamente un polo, y hemos fabricado un monopolito magnético. ¿O no?

- 2) **Obteniendo energía “gratis” de un imán.** Acerquemos, desde arriba, un imán a un objeto de hierro. Si el peso del pedazo de hierro y la distancia al imán no son muy grandes, el hierro será atraído por éste último. Si llamamos P al peso del objeto y h a la distancia hasta el imán medida verticalmente, entonces el trabajo del imán, opuesto a las fuerzas de gravedad, es igual a $P \cdot h$.

Si bien, en cada caso particular, el trabajo puede ser no muy grande, debe tenerse en cuenta que el experimento puede repetirse tantas veces como se desee y que, además, no se manifestará ningún cambio en el imán y su fuerza magnética no se debilitará en absoluto.

De este modo, tenemos una manera de extraer trabajo indefinidamente a partir del imán, sin usar ninguna otra fuente de energía.

¿No contradice esto a la ley de conservación de la energía?

- 3) Se tienen dos varillas de acero cuya única diferencia es que una es un imán permanente mientras que la otra no está magnetizada. Sin utilizar ningún instrumento, ¿podría decidir cuál es cuál?
- 4) Una corriente eléctrica que circula por un conductor induce un campo magnético a su alrededor. La velocidad de desplazamiento de los electrones que forman la corriente es únicamente de unos pocos milímetros por segundo. Si un observador camina a lo largo del conductor en la misma dirección y a igual velocidad que la del desplazamiento de los electrones, éstos, en relación con él, podrán considerarse cargas eléctricas en reposo. ¿Desaparecerá también para este observador el campo magnético que rodea al conductor?
- 5) Si se coloca una aguja magnética sobre la superficie del agua, ella sola se acomoda a lo largo del meridiano magnético (es decir, alrededor de un círculo máximo que une los polos magnéticos de la Tierra); pero no se moverá, en su conjunto, hacia el norte ni hacia el sur. Sin embargo, si la misma aguja se coloca cerca de un imán potente, no sólo girará sino que comenzará a moverse hacia él.

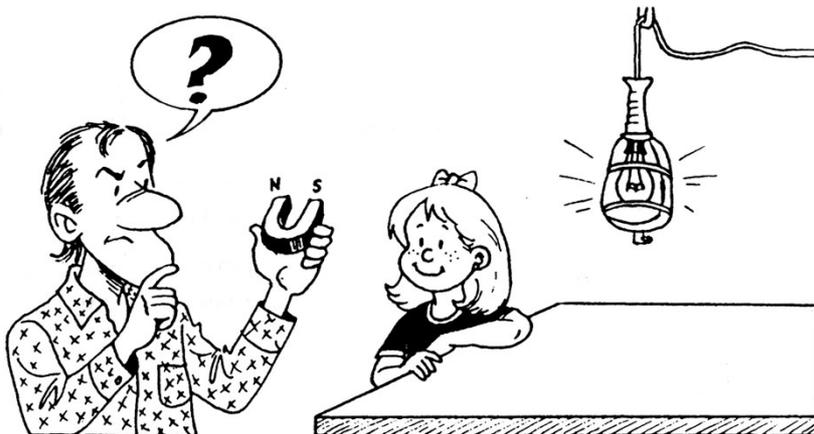
¿Por qué se comporta la aguja de manera diferente en ambos casos? ¿Es que se trata de campos magnéticos de distinta naturaleza?

- 6) Consideremos una carga eléctrica moviéndose a velocidad constante. Puesto que una corriente eléctrica no es otra cosa que un flujo de cargas y produce a su alrededor un campo magnético, es razonable suponer que la carga en movimiento también sea productora de un campo magnético. Efectivamente, tal campo existe. Ahora bien, un observador que se mueve a la misma velocidad de la carga, la ve, naturalmente, en reposo y por lo tanto no percibe ningún campo magnético.

¿Es que es falso el razonamiento anterior? ¿O lo que ocurre es que, verdaderamente, la aparición o no de campo magnético depende del observador?

- 7) Si usted ya resolvió las cuestiones 4 y 6, le proponemos la siguiente pregunta: ¿No son contradictorios ambos resultados?

- 8) ¿Cómo podría determinar los signos de los polos de una batería de auto, utilizando la lámpara portátil del equipo del chofer, un trozo de alambre y una brújula?
- 9) ¿Cómo podría averiguar si un cuerpo está imantado sin hacer uso de un segundo cuerpo (ni de una brújula, ni aparato de medición, por supuesto)?
- 10) ¿Cómo podría hacer para determinar con qué corriente continua o alterna se alimenta una lámpara eléctrica? Para ello dispone solamente de un imán fuerte.



En pocas palabras

En toda la región que rodea un imán o una corriente eléctrica existe un campo magnético.

¿Cómo se lo puede detectar?

Para acusar la presencia de un campo magnético se puede proceder de una de las siguientes maneras:

- a) Por medio de una pequeña aguja magnética suspendida por su centro de gravedad (magnetómetro): Al encontrarse dentro del campo magnético, la aguja tiende a orientarse.

El campo le produce al magnetómetro un momento mecánico $\vec{\mathcal{M}} = \vec{M} \wedge \vec{B}$

de módulo: $\mathcal{M} = M \cdot B \cdot \sin \alpha$

- b) Por medio de un conductor por el que circula una corriente eléctrica.

El campo le produce una fuerza $\vec{F} = i \cdot \vec{\ell} \wedge \vec{B}$

de módulo: $F = Bi \cdot \ell \cdot \sin \alpha$

- c) Por medio de una partícula cargada en movimiento.

El campo magnético le produce una fuerza $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$ (Fuerza de Lorentz)

de módulo: $F = B \cdot q \cdot v \cdot \sin \alpha$

Vector inducción: Cada punto del campo magnético está caracterizado por una propiedad vectorial \vec{B} ; se trata de un vector que tiene:

- la dirección de la tangente a la línea de inducción que pasa por el punto considerado;
- su sentido es el de esa línea de inducción;
- su módulo puede calcularse midiendo, por ejemplo, la fuerza máxima que actúa sobre un pequeño conductor rectilíneo colocado en el punto que se considere:

$$B = \frac{F_{\text{máx}}}{i \cdot \ell}$$

Cuando un conductor con corriente eléctrica se encuentra dentro de un campo magnético, éste interacciona sobre el conductor por medio de una fuerza que tiene la dirección perpendicular al plano que determinan el vector \vec{B} y el conductor; su módulo es $F = B \cdot i \cdot \ell \cdot \sin \alpha$

Si el conductor es colocado perpendicularmente al vector \vec{B} ($\alpha = 90^\circ$), la fuerza magnética tiene módulo máximo.

Si una partícula cargada penetra en un campo magnético uniforme, perpendicularmente al vector \vec{B} , describirá un arco de circunferencia, de radio:

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

Es lo que ocurre en el ciclotrón, máquina destinada a acelerar iones. Si la partícula penetra oblicuamente en el campo magnético uniforme, describirá una trayectoria helicoidal.

Si la partícula penetra en un campo magnético no uniforme, puede quedar atrapada en ese campo: Se trata de una **botella magnética** dentro de la cual la partícula se mueve según una hélice de radio no constante, avanzando y retrocediendo entre los extremos de la botella; es lo que ocurre en las bandas de Van Allen.

CLAVE DE RESPUESTAS

Actividad 1

1.1. El vector \vec{B} creado por la bobina en su centro es igual a la suma de los que producen cada una de las espiras individualmente.

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \dots + \vec{B}_{100}$$

La bobina es de espesor despreciable (las espiras están muy juntas); por lo tanto, los vectores creados por cada una de las espiras son iguales entre sí.

$$\begin{aligned} \therefore B &= N \cdot B_i \\ B &= N \cdot k \cdot \frac{2\pi \cdot i}{r} \end{aligned}$$

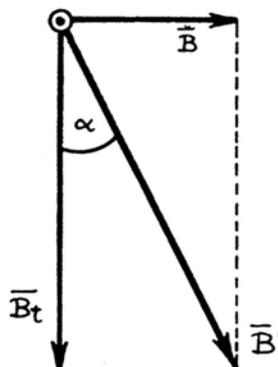
Por lo tanto:

$$\begin{aligned} i &= \frac{1}{k} \cdot \frac{B \cdot r}{2\pi \cdot N} \\ i &= \frac{1}{10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}} \cdot \frac{5 \cdot 10^{-4} \text{T} \cdot 0,1\text{m}}{2\pi \cdot 100} \\ i &= \frac{10^7 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot \pi \cdot 10^2} \text{A} \\ i &= \frac{5}{6,28} \text{A} \\ i &= 0,8\text{A} \end{aligned}$$

1.2. Cuando no pasa corriente por la espira, la aguja magnética se orienta según el meridiano magnético del lugar.

Si circula corriente por la bobina la aguja se desvía, se orienta según $\vec{B}' = \vec{B} + \vec{B}_t$, donde \vec{B}_t es la componente horizontal del campo terrestre y \vec{B} es el vector inducción creado por la corriente.

Se produce un nuevo campo magnético que es superposición o resultante de otros dos campos magnéticos: el creado por la Tierra y el producido por la corriente de la bobina.



La aguja puede equilibrarse en un ángulo α , tal que:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{B}{B_t} \\ \operatorname{tg} \alpha &= \frac{5 \cdot 10^{-4} \text{ T}}{2 \cdot 10^{-5} \text{ T}} \\ \operatorname{tg} \alpha &= 25 \\ \alpha &= 87,70^\circ \end{aligned}$$

1.3. Si la intensidad de la corriente se reduce a la mitad, $i' = \frac{i}{2}$, el vector inducción \bar{B} creado por la bobina también se reducirá a la mitad: Dado que $\operatorname{tg} \alpha$ es directamente proporcional a \bar{B} debe ser ahora:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha' &= 12,5 \\ \alpha' &= 85,42^\circ \end{aligned}$$

1.4. La aguja se orienta siempre según la dirección del vector B' resultante de \bar{B}_t y \bar{B} ; si éstos son colineales, también la aguja se orientará según la dirección común a ambos vectores. La aguja sigue en el meridiano magnético del lugar.

1.5. Para que se anule, el \bar{B} resultante debe ser:

$$\bar{B}' = -\bar{B}_t$$

y

$$B' = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

Luego debe ser:

$$i' = \frac{B' \cdot r}{k \cdot 2\pi N}$$

$$i' = \frac{2 \cdot 10^{-5} \text{ T} \cdot 0,1 \text{ m}}{10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}} \cdot 2\pi \cdot 100}$$

$$i' = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-1} \text{ A}}{10^{-7} \cdot 2\pi \cdot 10^2}$$

$$i' = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{10^{-6}}{10^{-5}} \text{ A}$$

$$i' = 0,0318 \text{ A}$$

Actividad 2

2.1. Dado que el solenoide que consideramos es muy largo con respecto a su diámetro, podemos aceptar que la inducción magnética en la zona interior, en el centro es:

$$B = k \cdot \frac{4\pi \cdot N \cdot i}{\ell}$$

Luego:

$$B = 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}} \cdot \frac{4\pi \cdot 1000 \cdot 1\text{A}}{0,4\text{m}}$$

$$B = 10^{-7} \cdot \pi \cdot \frac{1000}{0,1} \text{T}$$

$$B = 0,00314 \text{ T}$$

2.2. El solenoide concatena, aproximadamente, un flujo de inducción:

$$\Phi = N \cdot B \cdot S \quad \text{donde } S = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\Phi = 1000 \cdot 0,00314 \text{ T} \cdot \frac{\pi (0,02\text{m})^2}{4}$$

$$\Phi = 3,14 \text{ T} \cdot 3,14 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-4}}{4} \text{ m}^2$$

$$\Phi = 9,86 \cdot 10^{-4} \text{ T m}^2$$

$$\Phi = 9,86 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

Actividad 3

3.1.

$$\vec{\mathcal{M}} = Bi S N$$

$$i = \frac{\mathcal{M}}{B \cdot S \cdot N}$$

$$i = \frac{0,005\text{Nm}}{0,2 \text{ T} \cdot 0,01 \text{ m}^2 \cdot 20}$$

$$i = 0,125 \text{ A}$$

3.2. Cuando la bobina está ubicada perpendicularmente al vector inducción.

Actividad 4

4.1. Si el imán se encuentra dentro del campo magnético uniforme de inducción $B = 0,2 \text{ T}$. Sobre él actuará un momento mecánico

$$\mathcal{M} = B \cdot M \sin 30^\circ$$

$$\mathcal{M} = 0,2 \text{ T} \cdot 10 \frac{\text{Nm}}{\text{T}} \cdot \frac{1}{2}$$

$$\mathcal{M} = 0,2 \cdot 5 \text{ Nm}$$

$$\mathcal{M} = 1 \text{ Nm}$$

4.2. Si el imán está orientado en la dirección de \vec{B} , el momento mecánico que le ejerce el campo es nulo; recuerde que:

$$\mathcal{M} = B \cdot M \sin 0^\circ = 0$$

4.3. Si $\alpha = 90^\circ$

$$\mathcal{M}' = B \cdot M$$

$$\mathcal{M}' = 0,2 \text{ T} \cdot 10 \frac{\text{Nm}}{\text{T}}$$

$$\mathcal{M}' = 2 \text{ Nm}$$

Actividad 5

5.1. El haz de electrones describirá un arco de circunferencia de radio r.

Siendo:

$$F_C = B \cdot q \cdot v$$

y

$$F_C = m \frac{v^2}{r}$$

Es:

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

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

Es decir: Los electrones describirán in arco de circunferencia de radio:

$$r = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 10^7 \text{ m/s}}{4 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}}$$

$$r = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^7}{4 \cdot 1,60 \cdot 10^{-22}} \text{ m}$$

$$r = 1,42 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

5.2. Si el campo reduce su vector inducción a la mitad, los electrones describirán un arco de circunferencia de radio $r' = 2r$

5.3. Si las partículas penetran en el campo magnético en la dirección de \vec{B} , la fuerza creada por el campo sobre ellas es nula; las partículas no se desvían.

Actividad 6

6.1. Cuando una partícula α es acelerada a través de una diferencia potencial de 2000 volt, adquiere una velocidad v_0 cuyo valor podemos obtener aplicando el teorema de las fuerzas vivas o teorema del trabajo y de la energía.

$$\begin{aligned}
 V \cdot q &= \frac{1}{2} m \cdot v^2 \\
 v^2 &= \frac{2 \cdot V \cdot q}{m} \\
 v &= \sqrt{\frac{2 \cdot V \cdot q}{m}} \\
 v &= \sqrt{\frac{2 \cdot 2000V \cdot 2 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} C}{6,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}} \\
 v &= \sqrt{\frac{8 \cdot 1,60 \cdot 10^3 \cdot 10^{-19} m}{6,68 \cdot 10^{-27} s}} \\
 v &= \sqrt{\frac{8 \cdot 1,60}{6,68} \cdot 10^{10} \frac{m}{s}} \\
 v &= \sqrt{19,16} \cdot 10^5 \frac{m}{s} \\
 v &= 4,38 \cdot 10^5 \frac{m}{s}
 \end{aligned}$$

Cuando esas partículas penetran en el campo magnético uniforme, perpendicularmente al vector \vec{B} , se encuentran sometidas a la acción de una fuerza de módulo $F = B \cdot q \cdot v$

que también es fuerza centrípeta: $F_C = m \frac{v^2}{r}$

Luego, describen un arco de circunferencia de radio $r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}$

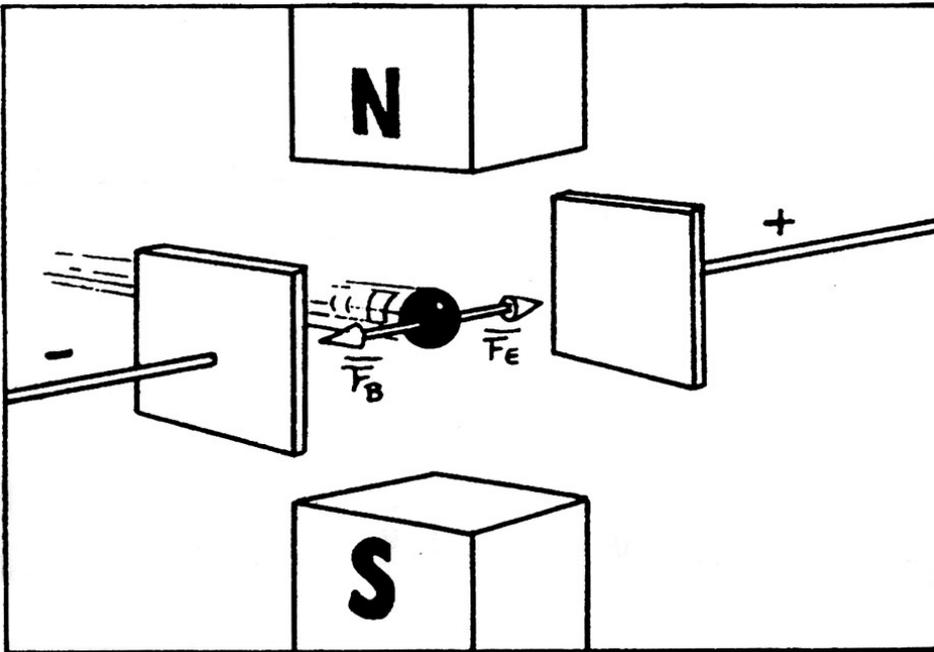
$$r = \frac{6,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 4,38 \cdot 10^5 \text{ m/s}}{0,4 \text{ T} \cdot 2 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}}$$

$$r = \frac{6,68 \cdot 4,38}{0,4 \cdot 3,20} \cdot \frac{10^{-22}}{10^{-19}} \text{ m}$$

$$r = 22,86 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

6.2. La energía cinética se mantiene constante.

Actividad 7



Para lograr que las partículas pasen sin desviarse por los campos, es necesario equilibrar la fuerza creada por el campo magnético \vec{F}_B con la que produce el campo eléctrico \vec{F}_e .

Si las partículas penetran perpendicularmente a las líneas de inducción del campo magnético, $F_B = B \cdot q \cdot v$, donde q es la carga de la partícula.

Es necesario que \vec{E} sea colineal con \vec{F}_B y de sentido contrario para que \vec{F}_e sea colineal y de sentido contrario a \vec{F}_B ,

$$\text{Si: } \vec{F}_e = -\vec{F}_B$$

$$\text{Es decir: } F_e = F_B$$

$$\varepsilon \cdot q = B \cdot q \cdot v$$

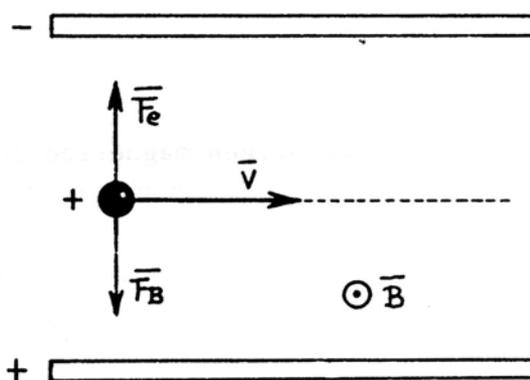
$$\varepsilon = B \cdot v$$

las partículas de velocidad v no se desviarán.

$$\varepsilon = 0,5 \text{ T} \cdot 2 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\varepsilon = 0,5 \cdot \frac{\text{N}}{\text{Am}} \cdot 2 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\varepsilon = 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

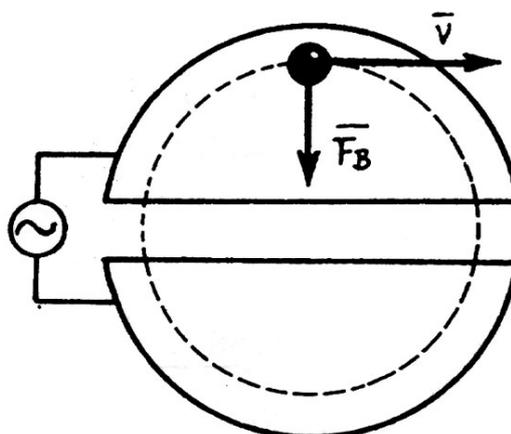


El campo eléctrico pedido debe ser perpendicular al campo magnético existente y dirigido de tal manera que las fuerzas \vec{F}_B (de origen magnético) y \vec{F}_e (de origen eléctrico) se equilibren. De esa manera, únicamente las partículas de velocidad

$$v = 2 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

no se desviarán al atravesar la región de los campos.

Obsérvese que en este problema no intervienen ni la masa ni la carga eléctrica de las partículas.



Actividad 8

8.1. El campo magnético del ciclotrón obliga a las partículas electrizadas a moverse según arcos de circunferencias; ello ocurre dentro de cada “D” del aparato.

La fuerza de origen magnético no incrementa la energía cinética de la partícula; ello ocurre por ser \vec{F}_B perpendicular a \vec{v} ; luego, es nulo el trabajo que realiza \vec{F}_B ; y, por el teorema de las fuerzas vivas, la energía cinética no es alterada por la fuerza magnética.

La partícula electrizada se mueve dentro de cada “D” con movimiento uniforme.

La fuerza magnética actúa de fuerza centrípeta, de modo que:

$$F_B = B \cdot q \cdot v$$

$$F_B = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

Por lo tanto:

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

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

$$v = \frac{B \cdot q \cdot r}{m} \quad (1)$$

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

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

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot 6,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{1 \text{ T} \cdot 2 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}}$$

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot 6,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{1 \frac{\text{N}}{\text{Am}} \cdot 3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C}}$$

$$T = 13,10 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

Obsérvese que este período no depende del radio de la trayectoria.

8.2. La frecuencia del alternador conectado entre las “D” del ciclotrón debe coincidir

con la frecuencia de la partícula alpha; luego $f = \frac{1}{T}$

$$f = \frac{1}{13,10} \cdot 10^8 \text{ Hz}$$

$$f = 0,076 \cdot 10^8 \text{ Hz}$$

$$f = 76 \cdot 10^5 \text{ Hz}$$

8.3. Cuando una de las partículas alpha se mueve sobre:

- una circunferencia de radio $r = 20 \text{ cm}$,
- con período $T = 13,10 \cdot 10^{-8} \text{ s}$

debe cumplirse:

$$F_C = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

y

$$F_C = B \cdot q \cdot v$$

Luego:

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

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

es decir que v crece linealmente con r .

$$v = \frac{1 \text{ T} \cdot 2 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,20 \text{ m}}{6,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}$$

$$v = \frac{1 \frac{\text{N}}{\text{Am}} \cdot 3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,20 \text{ m}}{6,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}$$

$$v = \frac{3,20 \cdot 0,20 \cdot 10^{-19} \text{ m}}{6,68} \cdot \frac{10^{-19}}{10^{-27}} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v = 0,096 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v = 96 \cdot 10^5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

En cuanto a la energía cinética:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot 6,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 96^2 \cdot 10^{10} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$E_c = 3,34 \cdot 9216 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{10} \text{ joule}$$

$$E_c = 30781 \cdot 10^{-17} \text{ joule}$$

Actividad 9

9.1. \overline{AC} = su valor

9.2.

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

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

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

v = su valor

9.3. \overline{BC} = su valor

9.4.

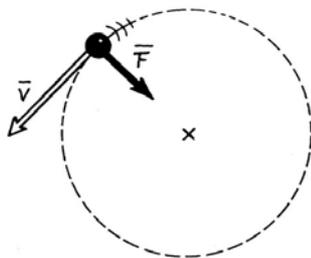
$$v' = \frac{B \cdot q \cdot r'}{m}$$

v' = su valor

9.5. Disminuye.

9.6. El hecho de que la trayectoria sea una espiral y no una circunferencia obedece a que el electrón se ve frenado a medida que choca con las partículas del medio en que se desplaza.

9.7. Si no existiera resistencia del medio, el electrón describirá una circunferencia con movimiento uniforme. Ahora, en tal hipotético e ideal caso, no habría manera de saber su trayectoria, pues no dejaría rastros visibles, al no haber choques.



CAMPO
MAGNÉTICO
UNIFORME
PERPENDICULAR
AL PLANO
DEL DIBUJO:



F = Fuerza electromagnética sobre el electrón

$F = q_e \cdot v \cdot B$ es la fuerza centrípeta, constante en módulo, que permite el M.C.U.

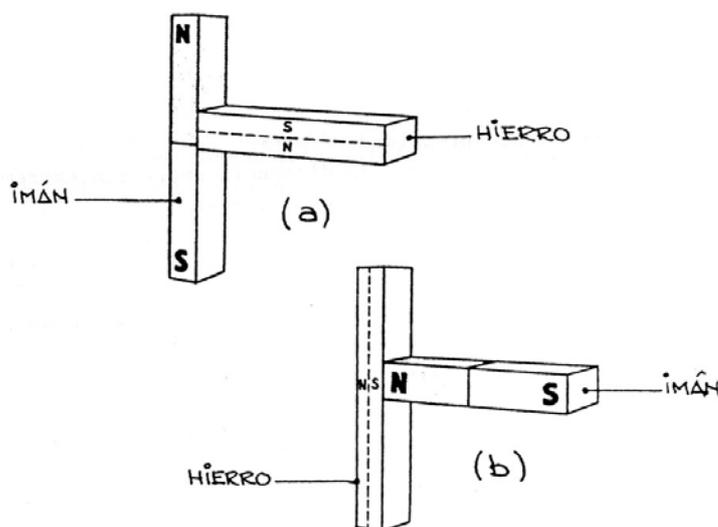
Cuestiones paradójales

1. El razonamiento es falso, puesto que al pretender armar la bola, se producen reajustes en las distribuciones de polaridades de los trozos que la componen. En otras palabras, el "imán" se desmanta por sí mismo instantáneamente.

No debe pensarse que esto significa la imposibilidad de la existencia de imanes esféricos; la condición es que, en su superficie, haya polos contrarios, aunque sea en cantidad diferente. Por ejemplo, se puede imantar una bola de modo que en su superficie haya dos polos norte y uno sur o al revés. Si todavía usted permanece escéptico respecto de la posibilidad de imantar una bola, recuerde la redondez de la Tierra, que es un imán gigantesco.

Como complemento de esta discusión, señalaremos que el físico teórico inglés P. A. M. Dirac notó que las ecuaciones de Maxwell (la base de la electrodinámica) admiten, en principio, la existencia de polos magnéticos aislados (es decir, imanes con un solo polo, sur o norte). Sin embargo, los intentos experimentales realizados durante muchos años, orientados a descubrir los "monopolos de Dirac", no han tenido éxito, y la mayoría de los físicos contemporáneos se inclina hacia la idea de que éstos no existen en la naturaleza.

2. A medida que se acercan el imán y el hierro, la energía potencial de interacción del sistema "imán permanente-objeto de hierro" disminuye exactamente en la magnitud del trabajo realizado contra la fuerza de gravedad. Para restablecer su valor inicial es necesario alejar el hierro del imán. Es evidente que para ello se requiere realizar un trabajo igual al realizado por el imán al levantar el hierro.
3. Hay que colocar las varillas formando una "T" como se muestra en las figuras. Existen dos posibilidades; en cada una, la barra imantada se muestra con una N y una S en sus extremos. En la varilla originalmente no magnetizada están representados con N y S los polos magnéticos inducidos.



Con la disposición experimental (a) habrá menos atracción magnética que con la (b), debido a que en esta última hay muy escasa distancia entre dos polos opuestos: el polo norte del imán permanente y el polo sur del hierro, inducido por la proximidad del imán.

4. No. Los electrones del conductor están, efectivamente, en reposo, en relación con el observador paseante; pero, los iones positivos de la red cristalina se mueven en dirección igual pero en sentido contrario a la misma velocidad. Puesto que un conductor es neutro, considerado como un todo, el número de iones positivos es igual al de electrones. Además, una carga positiva que se mueva en un sentido, origina el mismo campo magnético que igual carga negativa moviéndose en sentido contrario con igual velocidad y, en consecuencia, los iones positivos que retroceden originan el mismo campo magnético que los electrones que avanzan. Si nos movemos a la mitad de velocidad que los electrones, por ejemplo, el campo magnético debido a los electrones que avanzan será la mitad de intenso; pero, la contribución del campo creado por los iones positivos que retroceden a esa velocidad, dará origen al mismo campo magnético que el experimentado por un observador en reposo. Con cualquier otra velocidad, la conclusión es la misma: No puede uno moverse de forma tal que desaparezca el campo magnético.
5. La diferencia es un buen ejemplo de una de las características más interesantes de los campos magnéticos (y eléctricos). El campo magnético terrestre es casi uniforme a lo largo de toda la aguja; es decir, su intensidad permanece casi constante en dirección y magnitud debido a que la distancia entre los extremos de la aguja es relativamente pequeña en comparación con la distancia entre los polos magnéticos de la Tierra. Por ello, la fuerza magnética sobre un extremo de la aguja es anulada prácticamente por la fuerza que actúa sobre el otro. El par sólo puede hacer girar la aguja si estaba inicialmente quieta, pero no acelerar a su centro de masa, pues la suma de fuerzas es cero, aunque exista cupla.

Por el contrario, el campo de un imán es muy poco uniforme en su vecindad. Por lo tanto, las fuerzas que actúan sobre los extremos de la aguja son diferentes y dan una suma no nula.

6. El razonamiento es correcto. Si caminamos junto a una carga móvil a la misma velocidad sólo apreciaremos su campo electrostático. Si la carga está en movimiento con relación a nosotros, se apreciará, además, un campo magnético en la misma región. En este caso, como vemos, el campo magnético puede eliminarse por un cambio de sistema de referencia inercial; vale decir que el campo magnético es relativo al observador.
7. No hay contradicción. Son casos diferentes. En el caso representado por (4) no existe ningún sistema de referencia en el que el observador pueda ver todas las cargas en reposo (tanto positivas como negativas) y de ahí la imposibilidad de eliminar el campo magnético. En cambio, en el caso (6) tal cosa sí se puede hacer, pues se trata de una sola carga.
8. Al hacer –con ayuda de conductores de conexión que tenemos– un circuito compuesto por la batería y la lámpara, aproximamos la brújula a uno de los conductores por debajo de éste, eligiendo una parte rectilínea del mismo. El campo magnético hará que la aguja de la brújula se oriente. Utilizando la “regla de la mano derecha” o del “sacacorchos”, se puede determinar el sentido

de la corriente en el circuito y, luego, entonces, los signos de los polos de la batería.

No es obligatoria la presencia de la lámpara para resolver el problema, ya que su papel se reduce sólo a la limitación de la corriente en el circuito, de lo que no hace falta inquietarse en una conexión de corta duración.

Como comentario adicional de índole práctica, digamos que aun cuando no se disponga de una brújula, puede determinarse la polaridad de la batería si se dispone de dos alambres de cobre y de una papa (sí, una papa). Se procede así. Se empalman los dos conductores de cobre a los bornes de salida de la batería, y los extremos libres se clavan en el tubérculo. La corriente eléctrica al pasar por la papa provoca la electrólisis del agua contenida en ésta. Como resultado de este proceso, el conductor que lleva el polo negativo de la batería desprenderá hidrógeno, y cerca del conductor conectado con el polo positivo, se desprenderá oxígeno. Al interactuar con el cobre, el oxígeno forma óxidos e hidróxidos cuyos iones tiñen la zona cerca del conductor correspondiente de color verde-azul. Cerca del otro conductor, la coloración no se observará. De este modo, el conductor cerca del cual la papa se pone verde está conectado con el polo positivo de la batería.

9. Se debe romper el cuerpo en dos partes. Si estaba imantado, ambas partes van a interactuar magnéticamente; en caso contrario, no.
10. Para resolver este problema se deberá recordar la regla de la mano izquierda, con cuya ayuda se determina la dirección y sentido de la fuerza que actúa sobre un conductor con corriente dentro de un campo magnético.

Si la lámpara se alimenta con corriente alterna, el imán hará oscilar su filamento y los contornos del filamento llegan a ser borrosos. Si la corriente es continua, el filamento se verá claro, ya que sólo se desvía de la posición inicial.

Si el filamento brilla mucho y nos encandila, podemos mirarlo a través de un negativo de película o vidrio ahumado, o bien proyectar su imagen con ayuda de una lente, y observar cómodamente la figura en la pared.

Bibliografía

Nivel secundario:

- PSSC. *Física*. Reverté. 1969. Tomo II.
- Stolberg y Hill. *Física. Fundamentos y fronteras*. Publicaciones Cultural SA. México, 1967.
- Bueche. *Fundamentos de Física*. Mc Graw Hill. México, 1970.
- Blackwood y otros. *Física General*. CECSA.

Nivel terciario:

- Tipler. *Física*. Reverté. 1977. Tomo II.
- Alonso y Finn. *Física*. Fondo Educativo Interamericano SA. 1971. Tomo II.
- Resnik y Halliday. *Física*. CECSA. 1977. Tomo II.

Problemas:

- College Physics. Schaum Publishing Co. New York (Hay edición en castellano).

Textos complementarios:

- Bitter, Francis. *Imanes*. Editorial Universitaria de Buenos Aires. Buenos Aires.
- Wilson y Littaner. *Aceleradores de partículas*. Editorial Universitaria de Buenos Aires. Buenos Aires.
- Bondi, Hermann. *El cosmos*. Editorial Universitaria de Buenos Aires. Buenos Aires.
- Fuchs, Walter. *El libro de la Física Moderna*. Omega. Barcelona.
- "Origen del campo magnético terrestre". *Investigación y Ciencia*. Abril 1979.
- "How to make a sensitive magnetometer". *Scientific American*. Febrero 1968.
- Cazenave, Horacio. "El Sol y la noche polar. Antártida". *Revista de la Dirección Nacional del Antártico*. N° 2. Diciembre 1971. Buenos Aires.