



Magnetismo en el Aula

Material didáctico
para profesores de
Educación Infantil y Primaria



CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN
Comunidad de Madrid

www.madrid.org



Magnetismo en el Aula

Material didáctico
para profesores de
Educación Infantil y Primaria



Comunidad de Madrid

CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN
Dirección General de Ordenación Académica



Esta versión digital de la obra impresa forma parte de la Biblioteca Virtual de la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid y las condiciones de su distribución y difusión de encuentran amparadas por el marco legal de la misma.

www.madrid.org/edupubli

edupubli@madrid.org

Los autores agradecen la colaboración de Salomé Cejudo Rodríguez en la elaboración del manuscrito.

Autores:

Grupo de Extensión Científica del CSIC:

José María López Sancho.

María José Gómez Díaz.

María del Carmen Refolio Refolio.

José Manuel López Álvarez.

Profesores de la Comunidad de Madrid:

Rosa Martínez González.

Montserrat Cortada Cortés.

Isabel García García.

Dirección:

José María López Sancho.

Coordinación:

María José Gómez Díaz.

Ilustraciones:

Luis Martínez Sánchez.

Colección:

Material Didáctico.

© Comunidad de Madrid. Consejería de Educación. Dirección General de Ordenación Académica.

Depósito Legal: M-17.257-2006

I.S.B.N.: 84-451-2837-X

Tirada: 2.000 ejemplares



ÍNDICE

Presentación	07
Prólogo	11
Introducción	15
1. El magnetismo y los sentidos.	19
2. El magnetismo en la historia.	23
2.1. Tales de Mileto.	25
<i>Aplicación en el aula.</i>	
2.2. Las descripciones de Platón y Aristóteles.	31
<i>Aplicación en el aula.</i>	
2.3. Tito Lucrecio Caro: el poder de los imanes.	35
<i>Aplicación en el aula.</i>	
<i>Para saber más.</i>	
2.4. El estudio del magnetismo en los pueblos orientales.	41
<i>Aplicación en el aula.</i>	

3. Los albores de la revolución científica.	47
3.1. Cosmología de la época.	53
3.2. Alexander Neckam: la aguja de marear húmeda y la suspendida.	57
<i>Aplicación en el aula.</i>	
3.3. La determinación de la dirección norte-sur y la declinación magnética.	67
<i>Aplicación en el aula.</i>	
3.4. Pedro Peregrino y el nombre de los polos magnéticos.	73
<i>Aplicación en el aula.</i>	
3.5. Colón y la declinación magnética.	83
3.6. Robert Norman y el descubrimiento de la inclinación magnética.	87
<i>Aplicación en el aula.</i>	
<hr/>	
4. El inicio de la revolución científica.	93
4.1. Copérnico y la caída de dos grandes prejuicios aristotélicos.	97
<hr/>	

4.2. Gilbert y el triunfo de la experimentación en la ciencia.	103
<i>Aplicación en el aula.</i>	
<i>Para saber más.</i>	
4.3. Henry Gellibrand y la variación de la declinación magnética.	119
4.4. Halley y su modelo de tierra con capas concéntricas.	123
<hr/>	
5. La electricidad en la edad moderna.	127
5.1. Antecedentes.	129
5.2. Alejandro Volta.	135
5.3. Oersted y el electromagnetismo.	139
<i>Aplicación en el aula.</i>	
<hr/>	
6. El magnetismo en el siglo XX.	147
6.1. La estructura atómica de la materia.	149
6.2. Tipos de materiales magnéticos.	153
<i>Aplicación en el aula.</i>	
<i>Para saber más.</i>	
<hr/>	
Anexo 1. Materiales magnéticos.	159
Anexo 2. Tipos de imanes.	167



PRESENTACIÓN

El libro que ahora presentamos, *Iniciación al Magnetismo*, es fruto de la colaboración entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y la Dirección General de Ordenación Académica, y se inscribe en el acuerdo que se firmó entre ambas instituciones durante el curso 2004-2005, para favorecer la enseñanza de la ciencia en la Educación Infantil y Primaria.

Desde entonces se ha trabajado en dos direcciones, la formación del profesorado y la elaboración de proyectos educativos que tuvieran fácil aplicación en el aula, y se ha consolidado el trabajo conjunto de investigadores del CSIC y maestros de diversos colegios de la Comunidad de Madrid.

Para los asesores de formación de los Centros de Apoyo al Profesorado, se impartió un primer curso general de explicación del proyecto, y a éste le siguieron otros seminarios y cursos para profesores de los niveles de Infantil, Primaria y primer ciclo de Secundaria, realizados en los Centros de Apoyo al Profesorado que se interesaron por esta tarea, con una orientación fundamentalmente práctica: los profesores asistentes experimentaban lo aprendido en sus colegios y en el CAP se organizaba el seguimiento y la evaluación de los resultados.

Todo este trabajo quedó expuesto en el III Congreso Nacional “La Ciencia en las primeras etapas de la Educación”, que se realizó en septiembre de 2005 y contó con la participación de profesores de la Comunidad y alumnos de seis a ocho años en cuyos centros se habían puesto en práctica diversos experimentos científicos. En el mes de junio del curso actual están previstas unas Jornadas en el CSIC con idéntico objetivo, el de incorporar a cada vez más profesores en el empeño de proporcionar a los niños una base metodológica sólida sobre la que pueda asentarse el estudio científico.

La *Iniciación al Magnetismo* es la primera de una serie de publicaciones pensadas para servir de apoyo y complemento a lo que acabamos de exponer. Es un libro para la formación teórica del profesor y para la aplicación práctica de lo aprendido mediante recursos accesibles y cercanos para los niños. El hecho de que lo firmen cuatro investigadores del CSIC y tres profesores de la Comunidad de Madrid ratifica el modelo de colaboración y nos hace confiar en los frutos del mismo en las próximas publicaciones.

Alicia Delibes Liniers
Directora General de Ordenación Académica



PRÓLOGO

Este libro es el resultado de una larga colaboración entre científicos del CSIC y profesores de la Comunidad de Madrid en la actualización científica del profesorado de las primeras etapas de la educación, en el marco de la colaboración institucional del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y la Dirección General de Ordenación Académica.

En este contexto, la obra tiene como objetivo principal mostrar al profesor los procedimientos metodológicos en que ha de basarse la enseñanza de la ciencia: cómo plantear problemas, diseñar y realizar experimentos, entender los resultados y compartir el conocimiento adquirido, empleándolo para comprender y mejorar el mundo en el que vive.

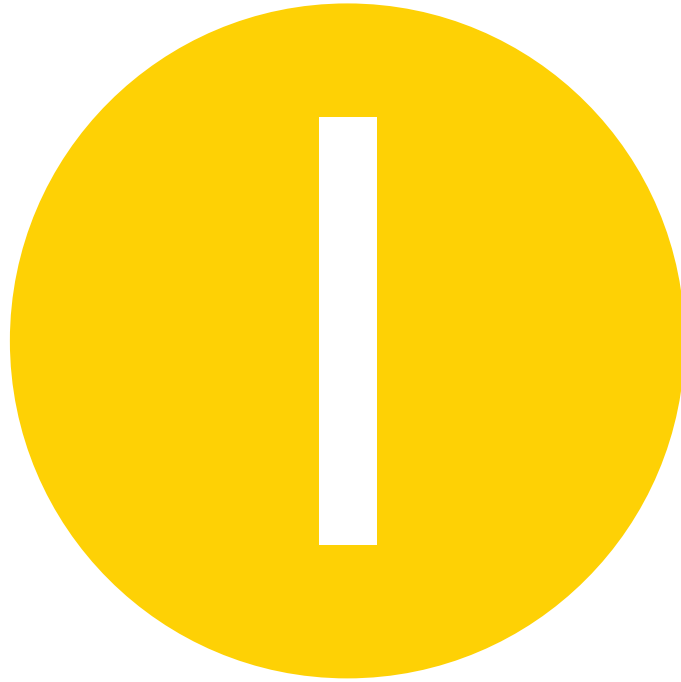
Además, desde el punto de vista social, la adquisición de conocimientos científicos de forma experimental y cooperativa fomenta la integración de alumnos de diferentes culturas, ya que desarrolla tanto el espíritu crítico como el respeto por las opiniones de los demás.

El libro ha sido escrito con la intención de proporcionar al profesor los elementos indispensables para enseñar el magnetismo en el aula y dotarle de una serie de actividades sencillas que le faciliten la realización de proyectos didácticos. Los contenidos científicos de esta obra se presentan en el contexto histórico y cultural en el que los descubrimientos se van produciendo, con la finalidad de que nuestros alumnos comprendan cómo la evolución de la ciencia va unida al desarrollo tecnológico pero, sobre todo, al avance de nuestra cultura y de nuestra sociedad.

El propósito de los autores es situar al alumno en el papel de investigador mediante la realización de experimentos sencillos, de manera que desarrolle su poder de observación, su curiosidad por el mundo y su capacidad de asombro. Para comprender lo que observa, como por ejemplo la desviación de la brújula en

presencia de un campo magnético, es necesario ir más allá de lo que aprecian sus sentidos y hacer uso del razonamiento lógico. Después de experimentar con los imanes hasta descubrir las leyes que explican su comportamiento, se plantea a los alumnos la posible existencia de un imán en el interior de la Tierra y se les da instrucciones para construir un modelo de pequeñas dimensiones, que les permita verificar esta hipótesis. Esta transposición de los resultados obtenidos con experimentos sencillos a pequeña escala, les ayuda a explicar el magnetismo terrestre y es uno de los puntos más importantes y formativos de la enseñanza de la ciencia en las primeras etapas.

Queremos transmitir a los profesores que una parte importante de este proyecto es el manejo de la web como una herramienta esencial, tanto para obtener información como para compartirla. Con la utilización de los recursos de Internet, el proyecto entra a formar parte de la nueva cultura que define la sociedad actual.



INTRODUCCIÓN

Einstein en muchas ocasiones explicó sus cualidades como investigador achacándolas a que siempre conservó un espíritu infantil, responsable de sus curiosidades. En una carta a su amigo James Franck (también premio Nobel) le decía que sólo un niño podía pararse a pensar sobre los problemas del espacio y del tiempo; como él fue persona que conservó el espíritu infantil durante gran parte de su vida (realmente sus maestros lo consideraron un niño retrasado), pudo meditar a edad adulta sobre cuestiones más propias de niños que de adultos.

Einstein, como todos los niños, se maravillaba cuando contemplaba el extraño comportamiento de una aguja imantada. Él mismo lo describe en sus memorias:

"A los cuatro años cuando mi padre me mostró una brújula, quedé maravillado. El hecho de que la aguja presentase un comportamiento tan regular... no encajaba en el mundo de los efectos por contacto directo. Todavía recuerdo, o al menos creo que recuerdo, que esta experiencia me produjo una impresión profunda y duradera. Algo muy misterioso debe existir para que las cosas se comporten como lo hacen".

Como todos los maestros saben, la reacción de Einstein fue la de cualquier niño de esa edad que tiene la suerte de que le muestren la brújula y le hagan notar lo extraño de su comportamiento. Por ello hemos pensado que el magnetismo es un fenómeno apropiado para señalar la belleza y la importancia de un mundo que no se ve. Además, el magnetismo es una de las fuerzas que proporciona la energía que mueve nuestro mundo. En cada motor eléctrico hay un imán o un electroimán. En cada altavoz y en cada auricular de teléfono hay un imán, pieza clave para su funcionamiento.

La Tierra, el Sol, los planetas y las estrellas tienen campos magnéticos que ellos mismos producen. Muchos animales poseen sentidos que les permiten "ver" un campo magnético de nuestro planeta y orientarse de esa manera. Las rocas magnéticas adquieren magnetismo cuando se forman. Los ordenadores almacenan sus datos en discos magnéticos, los famosos discos



Einstein

duros. Los médicos "ven" nuestro interior gracias a la resonancia magnética y los imanes nos sirven, además, para cerrar las puertas de armarios y frigoríficos e incluso para sujetar notas en ellas.

Nuestra intención es la de exponer las líneas generales del magnetismo de manera que se puedan entender todos estos fenómenos, extendiéndonos lo necesario para conseguirlo. Finalmente, queremos decir que el magnetismo fue un fenómeno misterioso hasta principios del siglo XX. Y fue justamente gracias a Einstein y a su teoría espacial de la relatividad, por lo que se entendió... finalmente. Pero todo esto quedará claro durante nuestra exposición.

A lo largo de este libro llevaremos a cabo un breve recorrido por la historia del magnetismo, que nos permitirá descubrir los hitos más importantes de estos descubrimientos.

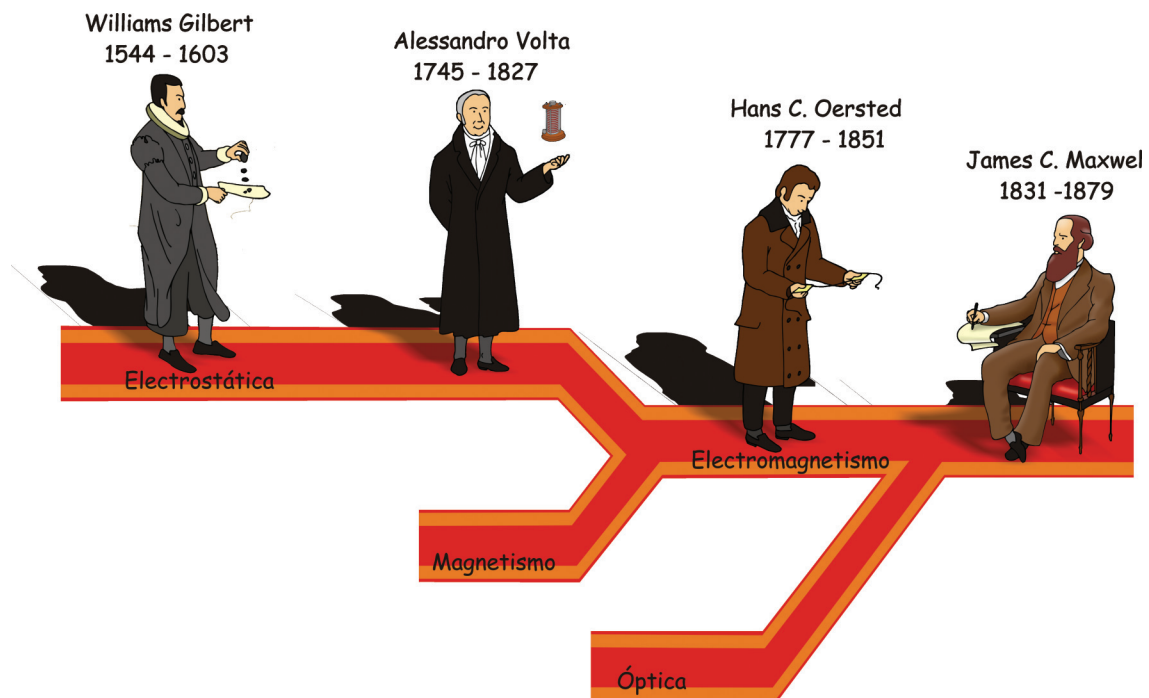
La historia de la ciencia se desarrolla, como se ha dicho muchas veces, de manera semejante a como se desarrollan las novelas de misterio; comienza con la presentación de un problema científico (equivalente literario a la visita a la escena del crimen), cuyos misterios hay que desvelar contando con el conocimiento de lo ocurrido anteriormente y aplicando la lógica más estricta.

El recorrido histórico que nos lleva desde la electrostática al electromagnetismo ocupa dos siglos y medio y sigue tres caminos diferentes que confluyen a mediados del siglo XIX. Los tres caminos corresponden a disciplinas (conjuntos coherentes de conocimientos, independientes en origen) que no pueden plantearse simultáneamente desde el punto de vista didáctico.

Por ello se hace necesario elegir un tipo de programación en el que se presenten las tres disciplinas de forma sucesiva, de manera que podamos entender la fusión de las tres en una sola ciencia.

La elección es difícil; para entender el experimento de Oersted es necesario conocer el funcionamiento de los generadores electroquímicos, pero para presentar

estos generadores es muy útil emplear aparatos de medida que utilizan la inducción electromagnética. Esta situación se describe en un proverbio de conocido uso entre los profesores; dice que para entender una lección en física hay que saber la siguiente. Como hay que elegir un camino, en este trabajo nos centraremos en el estudio de los fenómenos magnéticos producidos por imanes permanentes, especialmente apropiados para un curso de iniciación a la ciencia para alumnos de Educación Infantil y Primaria, aunque intercalaremos los conocimientos de electricidad mínimos, indispensables para entender nuestra exposición. Terminaremos con el experimento de Oersted, dejando abiertas las infinitas posibilidades de la interacción entre el magnetismo y la corriente eléctrica, tanto de aplicación como de estudio. En un próximo trabajo se tratarán las interacciones entre conductores e imanes, los motores eléctricos y los generadores de corriente, que son la puerta que nos llevará a entender la relación entre electricidad y magnetismo, de naturaleza relativista, puesta de manifiesto por los trabajos de Einstein en 1905.





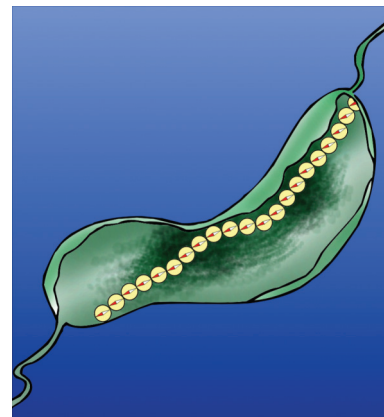
EL MAGNETISMO Y LOS
SENTIDOS

El magnetismo constituye uno de los muchos fenómenos físicos que los seres humanos no percibimos con nuestros sentidos. Otros semejantes, como la luz, el sonido, la temperatura, algunas moléculas que producen olores o sabores, etc., sí pueden ser detectados por órganos apropiados de nuestro cuerpo, pero no ocurre lo mismo con los fenómenos magnéticos. Para estudiarlos dependemos exclusivamente de los instrumentos que construyamos, lo que nos indica la importancia que tienen la inteligencia y la capacidad de transmitir conocimiento en el desarrollo de nuestra especie. Estas características hacen del magnetismo una herramienta magnífica para que los alumnos ejerciten su imaginación y formen conceptos sobre fenómenos de los que no tienen un conocimiento intuitivo y, por lo tanto, tampoco tienen preconcepciones ya que, por decirlo de alguna manera, somos ciegos al campo magnético. Pero, a la vez, también sirve el estudio del magnetismo para que los alumnos aprecien la diversidad de los seres vivos, porque, aunque los seres humanos no poseemos sentidos "magnéticos", muchos otros animales sí los poseen. Por ello comenzaremos nuestra exposición presentando algunas formas de sensibilidad al campo magnético que nos servirá para motivar aún más el estudio de este importante campo de la ciencia.

Algunos casos de sensibilidad al campo magnético

Fue en 1975 cuando Richard Blakemore observó la existencia de un tipo de bacteria que navegaba empleando una brújula, como cualquier capitán de barco. Y la bautizó de una manera muy apropiada: *Aquaspirillum magnetotacticum*. No había duda. Si se las situaba en un campo magnético, las *aquaspirillum* nadaban impulsadas por sus flagelos o siguiendo las líneas del campo, hacia el polo sur magnético. Las bacterias de Blakemore provenían de las "marshes" de Cabo Cod, en Massachusetts, situadas a una latitud Norte. En esa región, debido a la inclinación magnética, sus pequeñas brújulas señalan al interior de la Tierra.

Como estas bacterias son anaerobias, el oxígeno es tóxico para ellas. Por esa razón al seguir el campo magnético y sumergirse, se alejan de la superficie y, por lo tanto, del oxígeno. La razón de la sensibilidad de estos organismos al campo magnético se descubrió gracias al microscopio electrónico. Como se indica en la figura, las bacterias tienen una cadena de microcristales de magnetita que actúan como pequeñas brújulas y que las orientan en sus desplazamientos.



Inmediatamente se pensó en el caso de las *aquaspirillum* que habitasen en el hemisferio sur y se buscaron en lugares apropiados. Como era lógico, las bacterias del sur tenían su brújula invertida. Y como los científicos y los niños tienen mucho en común, en seguida se les ocurrió una travesura: cambiar a las bacterias la polaridad de su brújula. Es fácil de hacer. Basta someter a las bacterias a un campo magnético intenso de polaridad contraria a la suya. Como resultado su imán se invierte, y convertimos a las bacterias del hemisferio norte en bacterias del hemisferio sur.

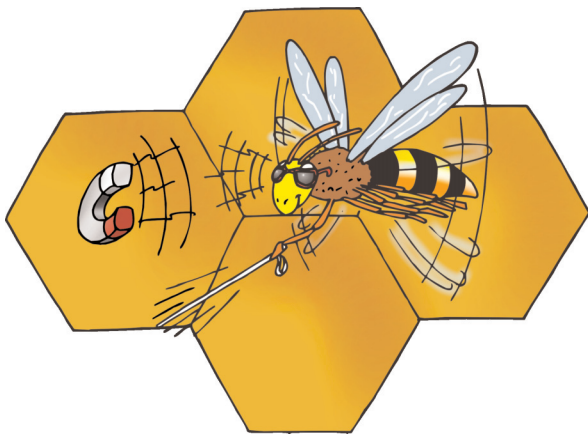
Pero el caso de la *aquaspirillum* no es único. Todos los años, a principios de otoño, unos cien millones de mariposas *Monarca* (*danaus plexippus*) viajan desde los bosques de Canadá y Estados Unidos cuando disminuye la intensidad de la luz solar y se aproxima el invierno. Las mariposas recorren casi 5.000 kilómetros a un ritmo de más de 100 kilómetros al día, para refugiarse durante el invierno en las tierras más templadas de Méjico.



En 1999 Orley Taylor, de la universidad de Kansas, descubrió que estas mariposas navegan utilizando un sentido que les permite “ver” las líneas del campo magnético de la Tierra. Si se introducen en un laboratorio en el que se invierte el campo, vuelan en sentido contrario y si se anula éste, vuelan de forma errática.

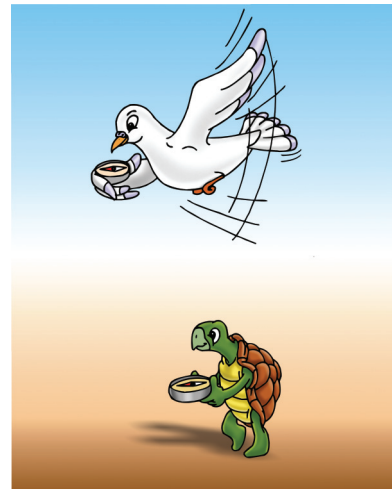
El órgano sensible al campo magnético parece estar constituido por algún material magnético alojado en la cabeza o en el tórax, que funciona como una brújula.

En el año 2001 Jacob Ishay, de la universidad de Tel Aviv, encontró similares capacidades para orientarse en un campo magnético en *vespa orientalis*, una avispa que vive en colmenas y que construye sus panales insertando un pequeño imán en cada una de las capas de celdas exagonales.



De esta manera puede orientarse en el interior de su colmena, que se encuentra en total oscuridad.

También se ha encontrado un sentido sensible al magnetismo en otros animales, como las palomas y algunas tortugas. Sin embargo, este tema se escapa de nuestro propósito.



Pero, como hemos dicho, aunque la especie humana no dispone de ningún órgano que le permita orientarse en el campo magnético de la Tierra, ha desarrollado instrumentos que le permiten medir la intensidad y dirección de campos mucho más débiles, y ha aprendido a producirlos y a utilizarlos para sus fines.



EL MAGNETISMO EN
LA HISTORIA



TALES DE MILETO

Nosotros vamos a iniciar nuestra historia de manera que se pongan de manifiesto las raíces griegas de nuestra civilización, una civilización fundamentalmente científica desde sus orígenes.



Tales nació en la ciudad de Mileto, aproximadamente en el 624 a.C., en el seno de una familia noble y murió en el 546 a.C. Tradicionalmente se ha considerado a Tales uno de los siete Sabios de Grecia, y es, junto con Solón, de los más citados en las diversas listas en las que se les agrupaba. Las referencias acerca de su vida son confusas y contradictorias. Su importancia, de acuerdo con la tradición, radica en que introdujo la geometría egipcia en Grecia. Fue maestro de Pitágoras y Anaxímedes, y contemporáneo de Anaximandro. Cultivó la astronomía y mucha de su fama se debe a que, de acuerdo con los testimonios de Herodoto y de Plinio el Viejo, predijo el eclipse total de Sol en el año 585. Sus escritos los conocemos por referencias de otros escritores de la época.

En lo que afecta a nuestra historia, la presencia de Tales se debe a que se le atribuyen las primeras noticias sobre observaciones sistemáticas de fenómenos eléctricos y magnéticos de los que se tiene noticia escrita. Describió cómo, cuando se frota el ámbar con lana o con piel, adquiere la extraña propiedad de atraer pequeñas briznas de hierba seca, trocitos de paja y otros objetos de poco peso, perdiendo al cabo de poco tiempo esta propiedad.

APLICACIÓN EN EL AULA

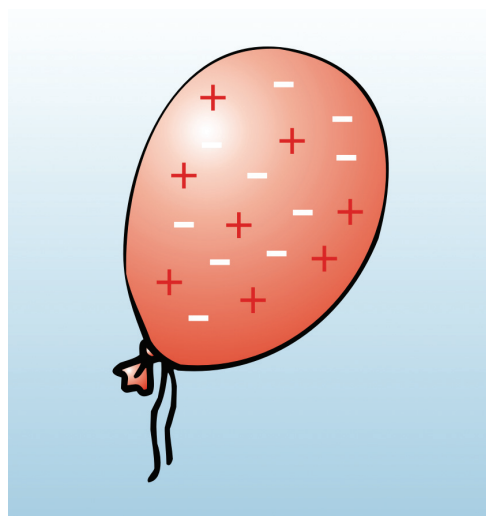
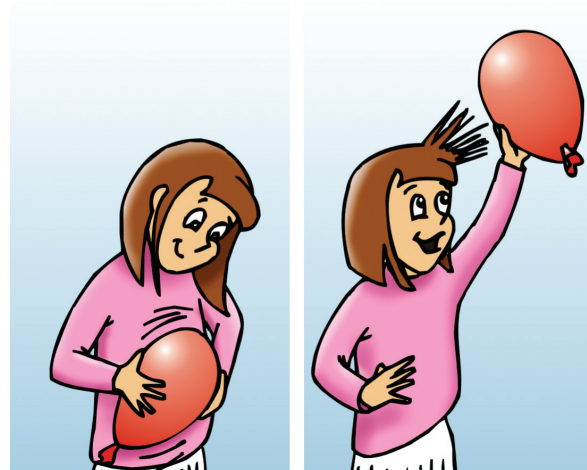
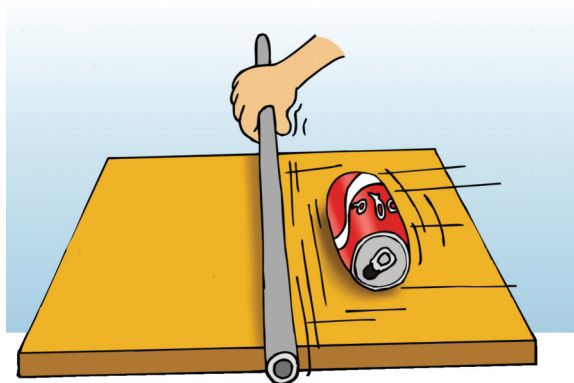
Se ha dicho muchas veces que el proceso de aprendizaje consiste en realizar un recorrido rápido e inteligente por la historia. Con esa idea, nosotros vamos a repetir los experimentos de Tales empleando materiales fáciles de encontrar y sencillos de manipular, apropiados para su empleo en nuestras aulas. Aunque no es difícil encontrar trozos de ámbar para estos experimentos, ya que se viene empleando en joyería desde los tiempos de Tales, nosotros proponemos el empleo de pajitas de plástico, de las de refresco, y una servilleta o pañuelo de papel; los mejores resultados se obtienen con las toallas que se utilizan para secarse las manos en los lavabos, que son muy absorbentes y poseen gran resistencia mecánica. Si se quiere disponer de más cantidad de carga eléctrica, aconsejamos utilizar un trozo de unos 50 centímetros de longitud de tubería de PVC no muy gruesa, bien desengrasada con alcohol y electrizada con los mismos elementos.



El primer experimento consiste en frotar la pajita o el trozo de tubería con el pañuelo seco durante unos treinta o cuarenta segundos. Inmediatamente adquiere la propiedad de atraer pequeños objetos como cabellos, confeti y pedacitos de papel. Esta propiedad la pierde cuando pasa algún tiempo, que depende de la humedad del aire, o cuando la descargamos tocándola con la mano.



La fuerza eléctrica es muy fácil de observar. Se pueden realizar experimentos más espectaculares empleando un bote de refresco vacío, una pila de linterna o un lápiz grueso, situados en una mesa de superficie lisa o, mejor, cubierta por una superficie de vidrio. Como indica la figura, cuando se aproxima una pajita cargada por frotamiento con una servilleta, en la forma descrita, veremos que estos elementos se desplazan por la mesa.



También pueden electrizarse otros objetos cotidianos, como los globos, que adquieren las mismas propiedades al frotarse con un jersey o con el pelo seco y limpio.

Para explicar estos resultados es imprescindible tener conocimiento del modelo atómico, pero en el tiempo de Tales no se conocía; y nosotros, que en este punto de nuestra visita guiada por la historia vamos de la mano de Tales, debemos dejar para más adelante la exposición de este modelo.

También se atribuye a Tales de Mileto la primera descripción occidental de la propiedad que presentan ciertos minerales de atraer los cuerpos de hierro u otros minerales de las mismas características. Son los imanes naturales y se encuentran en gran número en Magnesia, de donde se dice que proviene su nombre, aunque, según un relato popular al que nos referiremos más adelante, se debe al nombre del pastor que lo descubrió. Los imanes naturales se pueden ver en los museos, donde suelen estar en exposición, sujetando piezas de hierro de algunos kilos de peso.

Comenzaremos por una serie de ejercicios fáciles de realizar por los alumnos, de manera que sus efectos les resulten familiares. Para ello lo más indicado es que cada alumno disponga de uno a varios imanes de cualquier tipo; los más apropiados son, en nuestra opinión, los de cerámica que se emplean para sujetar notas en las neveras.



Nota: la palabra española imán tiene su origen en la francesa *aimant*, que tiene el significado de cariñoso, amante. Piedra imán significa piedra amante. En inglés, en cambio, la palabra *magnet* tiene su origen en un vocablo griego, como veremos más adelante.

El primer ejercicio consistirá en clasificar los materiales que nos rodean en dos grandes clases: los magnéticos y los no magnéticos. Para ello los alumnos no tienen más que determinar si, al poner en contacto su imán con un objeto, aparece una fuerza de atracción entre ambos, siendo necesario ejercer otra fuerza, en sentido contrario, para despegarlo. Esta primera investigación no debe realizarse únicamente en el aula sino que debe extenderse al mundo en que se desenvuelve el niño.

Hay que tener en cuenta que todos los materiales presentan propiedades magnéticas, como veremos a lo largo de este libro. Aquí nos referimos a los materiales ferromagnéticos, como el hierro y el acero, el níquel y el cobalto, que son los que reciben corrientemente el nombre de materiales magnéticos.

Cuando comparemos los hallazgos de los alumnos, podremos encontrar algunos resultados aparentemente contradictorios; algunos pueden haber comprobado que los imanes atraen la carrocería de los coches, en tanto que otros pueden haber llegado al resultado contrario. Esto depende del material con que esté fabricada ya que, aunque la mayoría de los automóviles tienen carrocerías de acero, en la actualidad se empieza a utilizar el aluminio, material no magnético, por su menor densidad. Si el objeto de estudio es una llave, también pueden darse resultados contradictorios ya que también se fabrican tanto de hierro como de aluminio.

Dependiendo de la edad y conocimiento de los alumnos se puede proceder a una clasificación de los materiales, de manera que se encuentre alguna correlación entre sus propiedades magnéticas y su naturaleza u origen:

- De origen vegetal, como madera, hojas, frutas, telas, goma...
- De origen animal, como la piel del calzado, el hueso, concha de caracol, uñas, pelo, dientes, asta de toro...

- De origen mineral, como el carbón, la arena (que a veces contiene granos de magnetita, que sí son atraídos por los imanes), la piedra pómez...

Por otra parte podemos hacer otra clasificación con materiales empleados por el hombre en la fabricación de objetos de uso cotidiano como lavadoras, neveras, puertas (unas magnéticas, en el caso de estar blindadas con una chapa de hierro oculta, y otras no), etc.

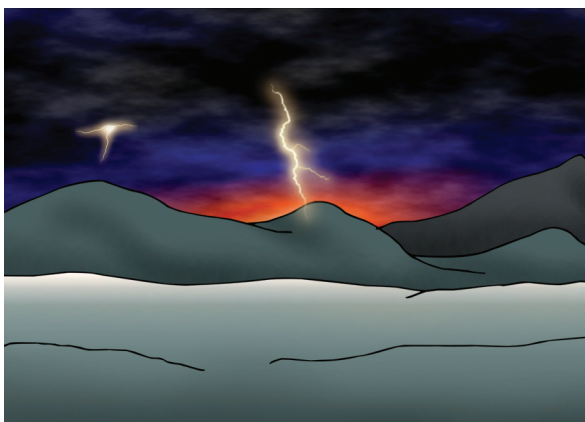
Para nuestros propósitos diremos que sólo son magnéticos los materiales hechos a base de hierro, cobalto o níquel.

Si está dentro de nuestras posibilidades, es conveniente contar con un trozo de magnetita, para que vean los alumnos un imán natural.

En la actualidad se sabe que los imanes naturales, que conocía Tales, eran trozos de magnetita (Fe_3O_4) que han sido expuestos al enorme campo magnético generado por un rayo caído en sus proximidades.

Pero ni Tales, en su época, ni nuestros alumnos, con los conocimientos que han adquirido hasta ahora, pueden entenderlo. Dejaremos la explicación de este fenómeno para más adelante, cuando, al final del libro, estudiemos el experimento de Oersted.

Pero, volvamos a nuestra historia, y veamos las aportaciones de otros científicos....





LAS DESCRIPCIONES DE PLATÓN
Y ARISTÓTELES



Platón también hace alusión a las propiedades de la piedra imán en sus escritos. Pone en boca de Sócrates la descripción de sus propiedades. Añade al relato de Tales la capacidad que presentan los objetos de hierro de atraer a otros trozos de hierro cuando están en contacto con un imán natural.

“...la piedra no solamente atrae anillos de hierro, sino que les transmite su poder de atraer a otros anillos; algunas veces se pueden ver muchos objetos de hierro colgando unos de otros formando una cadena; y todos reciben su poder de la piedra original, con la que están en contacto”.

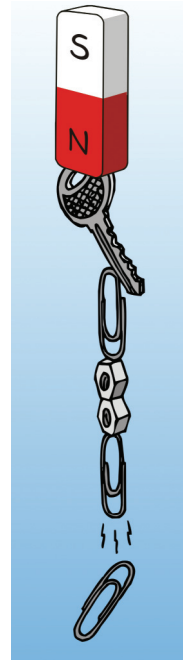
Aristóteles también describe los fenómenos eléctricos y magnéticos, y cita a Tales de Mileto refiriendo que éste atribuye una especie de alma a los objetos inanimados que tienen la propiedad de ejercer fuerzas sobre los demás objetos, como es el caso del ámbar y de la piedra imán o magnetita, abundante, como hemos dicho, en la región de Magnesia.

APLICACIÓN EN EL AULA

Nosotros podemos repetir en el aula los experimentos a los que se refiere Platón, de una manera muy sencilla.

En el primer contacto con imanes, el alumno ha aprendido a clasificar objetos de acuerdo a su comportamiento en presencia de un imán, llegando a la conclusión de que el hierro es un material magnético.

A continuación vamos a realizar experimentos empleando útiles que contengan hierro en su composición. El primero consistirá simplemente en prolongar nuestros imanes con un objeto de hierro, por ejemplo una llave antigua.



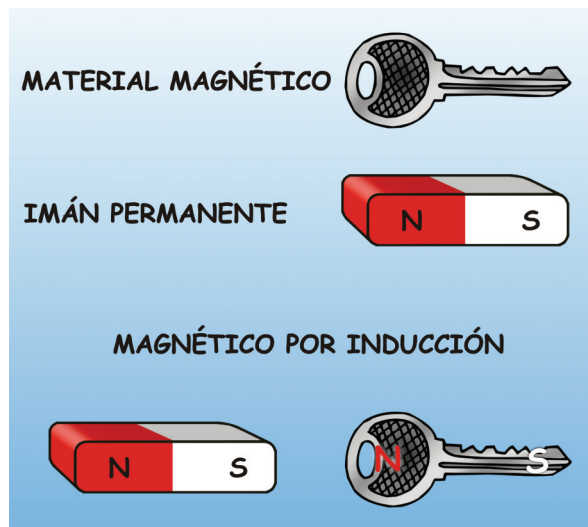
Como ya sabemos, la llave es atraída por el imán. Pero ¿qué ocurrirá si colocamos otro objeto de hierro, por ejemplo un clip, en el extremo de la llave? El resultado es que la llave atrae al clip.

Este resultado no deja de ser sorprendente, ya que la llave y el clip no se atraen cuando no está el imán, ni éste es tan potente como para atraer al clip a la distancia a la que se encuentra, si la llave no está interpuesta entre ambos. Si en vez de un objeto de hierro, empleamos uno de madera o de cobre, el clip no siente el efecto del imán. ¿Qué quiere decir esto? El efecto del imán se propaga a través del hierro de la llave y llega

al clip haciendo que el conjunto imán-llave se comporte como un imán más largo.

Sin duda es un fenómeno que merece la pena investigar.

La primera pregunta que nos surge es si la forma en que el imán comunica las propiedades magnéticas es a cualquier objeto que esté en contacto con él, o sólo se propaga por objetos de determinada naturaleza. La respuesta la obtenemos por medio de un experimento tan sencillo como sustituir la llave por otro objeto de diferente material y la misma longitud, y observar el efecto sobre el clip. Si el objeto no es de material magnético, la acción del imán sobre el clip no se modifica al interponer el objeto. Así pues, la atracción magnética sólo se transmite por materiales magnéticos.



La siguiente pregunta se refiere a la forma en que las propiedades magnéticas del imán se transmiten a la llave. Esta transmisión puede realizarse por contacto físico, como la conducción de la electricidad, o a través del espacio, como las fuerzas magnéticas, las eléctricas y las gravitatorias. De nuevo el experimento debe darnos la respuesta, y debemos pedir a nuestros alumnos que diseñen los experimentos apropiados para hallar la contestación.

La prueba más simple consiste en interponer una hoja de papel entre el imán y la llave, de manera que se interrumpa el contacto directo entre ambos elementos. Comprobaremos de inmediato que el efecto de la llave sobre el clip apenas se atenúa. Si retiramos ahora la hoja de papel, pero mantenemos separados el imán y la llave, veremos que el efecto de ésta sobre el clip sigue siendo el mismo, lo que nos hace concluir que el efecto de transmisión de la fuerza magnética no requiere el contacto físico, resultado al que no había llegado Platón.

Así pues, cuando un objeto de material magnético se encuentra cerca de un imán, se convierte él mismo en imán. El fenómeno se llama magnetismo inducido, ya que las propiedades magnéticas que aparecen en el objeto son inducidas por el imán.



TITO LUCRECIO CARO:
EL PODER DE LOS IMANES



Tito Lucrecio Caro, contemporáneo de Julio César y Cicerón, seguidor de Epicuro y de los atomistas griegos, describe en su poema *De Rerum Natura* (*La Naturaleza de las Cosas*) que ha visto moverse trozos de hierro dentro de un recipiente de bronce cuando éste se acercaba a un trozo de piedra imán.

APLICACIÓN EN EL AULA

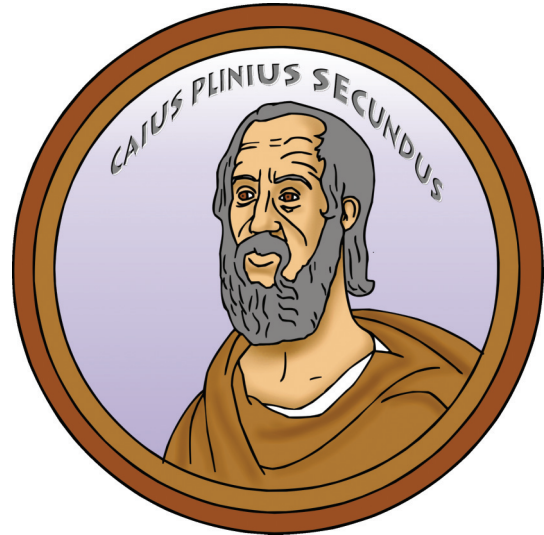
...Podemos repetir los experimentos que describe Lucrecio empleando imanes “de nevera”, es decir, de ferrita, en vez de utilizar imanes naturales. Sustituiremos el recipiente de bronce por un cazo de aluminio y emplearemos clips y llaves en vez de trozos de hierro.



En primer lugar, desprendemos los imanes de los adornos a los que suelen estar unidos. Después colocaremos en un recipiente de aluminio, de cobre, de vidrio o de cualquier material no magnético, algunos objetos magnéticos como clips y monedas magnéticas del grupo del euro (2 euros, 1 euro, 5, 2 y 1 céntimo). Si acercamos un imán al exterior del recipiente veremos que los clips y las monedas se mueven, comprobando que el fenómeno de la atracción magnética “atraviesa” las paredes del recipiente y hace que se muevan los clips que se encuentran en su interior.

Lucrecio describe, asimismo, cómo algunos trozos de hierro que han estado en contacto con la piedra imán son repelidos por dicha piedra cuando se acercan a ella. Éste es un fenómeno nuevo, tanto para Lucrecio como para nuestros alumnos. Lo podemos comprobar fácilmente empleando trozos de alambre de acero de unos cinco o seis centímetros de longitud y lo suficientemente gruesos para que no puedan clavarse en las manos, como ocurre con las agujas de coser cuyo uso en clase desaconsejamos. Si estos trozos de alambre de acero se ponen en contacto o en las proximidades de un imán permanente (que hace las veces del imán natural de Lucrecio), cuando se separan o alejan de él, conservan su estado magnético (magnetismo residual o remanente), habiéndose convertido en verdaderos imanes permanentes. Por esa razón, cuando uno de

PARA SABER MÁS



Había una vez un pastor de nombre Magnes...: Plinio el Viejo (23-79 d.C.)

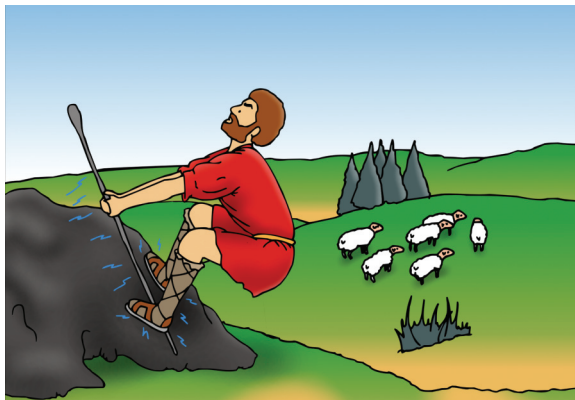
Cayo Plinio Segundo, Plinio el Viejo, vivió en la época de Nerón y desempeñó el cargo de almirante durante la de Vespasiano. Escribió una Historia natural enciclopédica de 37 libros. En ella refiere gran número de hechos útiles a la vez que relata leyendas y cuentos de viajeros que ilustran los conocimientos que quiere presentar. Entre ellos describe la existencia de una montaña de roca magnética, cerca del río Indus, y cuenta la historia del pastor Magnes, al que atribuye el descubrimiento del magnetismo, sin duda para personificar el fenómeno y dotarlo de fuerza didáctica.

estos trozos de alambre se acercan de nuevo al imán puede ser atraído o repelido dependiendo de la posición relativa de sus polos, de acuerdo con lo que está escrito en *De Rerum Natura*.

Acabamos de descubrir la existencia de dos tipos de materiales diferentes; uno de ellos, al que pertenece el hierro dulce, no conserva imantación alguna cuando se separa del imán permanente; el otro, al que pertenecen los aceros, permanece imantado aún después de ser separado del imán permanente, convirtiéndose él mismo en imán. Estos dos tipos de materiales recibieron el nombre de materiales magnéticamente blandos y magnéticamente duros, sencillamente porque el hierro dulce es, desde el punto de vista mecánico, muy blando; y el acero, empleado en martillos, cuchillos y espadas, mucho más duro. Actualmente, por tradición, se sigue empleando este término.

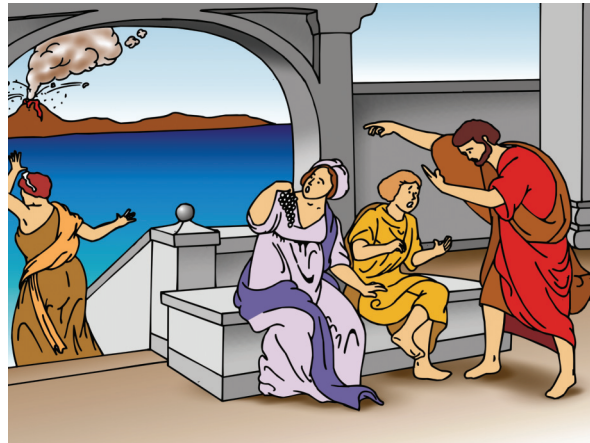
Ahora nuestros alumnos están en disposición de responder a la pregunta siguiente: ¿cómo puede saberse, disponiendo de un imán, si un objeto fabricado con material magnético es un imán o un simple pedazo de hierro no magnetizado? La respuesta es evidente. Si acercamos uno de los polos de nuestro imán a un trozo de hierro no magnetizado, éste será atraído por el imán independientemente de cómo se coloque; en cambio, si está magnetizado habrá siempre una parte del objeto (el que corresponda al mismo polo del imán que se le aproxima) que será repelido. Así pues, el hecho de que un objeto sea repelido por un imán es una prueba inequívoca de que está magnetizado.

De acuerdo con una de las versiones más populares, Magnes era un pastor griego y un día, cuando se encontraba pastoreando su ganado, se sentó sobre una piedra oscura y reclinó su bastón, de punta de hierro, sobre la misma piedra, quedándose dormido. Cuando despertó vio que sus ovejas se habían alejado; pero cuando se incorporó para seguir las observó que tanto sus botas, claveteadas con clavos de hierro, como su bastón, de punta de hierro, se habían quedado firmemente “pegados” a la piedra. Desde aquel día se llama magnetismo al fenómeno que describió nuestro pastor.



El mes de agosto del año 79, el Vesuvio entró en actividad. Plinio, jefe de la flota de Miseno, en la bahía de Nápoles, decidió acercarse con sus barcos para socorrer a los habitantes de Pompeya, así como para poder ver la erupción de cerca y describirla en sus escritos. Invitó a su sobrino e hijo adoptivo, Plinio el Joven, a realizar el viaje con él, pero éste, afortunadamente, declinó la invitación quedándose con su madre en Miseno. Plinio se acercó hasta la ciudad de Estabias y observó que la erupción aumentaba y se tornaba amenazadora, por lo cual organizó una operación de evacuación de los habitantes amenazados. Pero Plinio, posiblemente debido a su edad, no pudo resistir los gases sulfurosos que emanaban del volcán y murió en la arena de la playa. Su sobrino escribió en su epitafio:

“Mi tío fue hombre afortunado. Los dioses le concedieron los dos dones que hacen feliz a una persona: llevar a cabo hechos que merecen ser escritos y escribir obras que merecen ser leídas”.

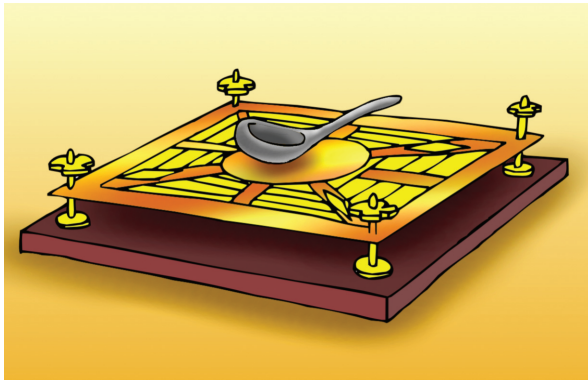


4

EL ESTUDIO DEL MAGNETISMO
EN LOS PUEBLOS ORIENTALES

El siguiente paso importante en el conocimiento de los fenómenos magnéticos tuvo lugar, según la tradición, en los pueblos de cultura china, probablemente durante la dinastía Qin (220-206 a.C.). Ya hemos dicho que las propiedades magnéticas de los imanes naturales resultaron sorprendentes desde su descubrimiento, sobre todo por la posibilidad de que su virtud podía atravesar objetos y recipientes no magnéticos. Esto hacía que los objetos magnéticos se empleasen por magos y adivinadores, unas veces con buena intención y las más de ellas con propósitos poco nobles. Incluso el Gran Hudini utilizó electroimanes y maletas con fondo de hierro en sus demostraciones.

Se sabe que hacia el siglo III a.C., y con propósitos mágicos, se tallaron en China algunos objetos empleando imanes naturales; entre ellos los más famosos fueron las cucharas magnéticas. Éstas se podían modelar de tal manera que se mantuviesen en equilibrio, apoyándose en un solo punto cuando se fijaban en una superficie plana, como indica la figura, lo que las dotaba de la propiedad de girar libremente cuando se acercaba otra piedra imán o, simplemente, un objeto de hierro.



Las primeras cucharas magnéticas se construyeron, con toda probabilidad, sin tener en cuenta la posición de los polos del imán natural, pero pronto se darían cuenta de que las más efectivas eran las que se tallaban de tal manera que las zonas de mayor poder de atracción (es decir, los polos) se encontraban en la dirección del eje que iba a lo largo del mango. Por alguna razón se generalizó la costumbre de modelarlas de tal manera que el mango se orientase hacia el sur, con lo que la cuchara magnética se convirtió en la primera brújula de la que se tiene noticia histórica.

Como resulta evidente, estas brújulas son difíciles de utilizar en un vehículo en movimiento. Según noticias históricas, en el siglo VIII d. C. estos instrumentos evolucionaron hacia las brújulas de aguja, montadas sobre un soporte que flotaba en agua. A partir de mediados del siglo IX comenzaron a utilizarse en navegación.

La idea de utilizar la aguja magnética como medio de orientación llegó a Europa hacia el siglo XII. Hasta fechas recientes se pensaba que esta idea había llegado a Europa a través de la ruta de la seda que unía China con India y Egipto, y desde allí los árabes la habrían introducido en Europa. Pero recientemente se comprobó que los barcos chinos, que desarrollaron una gran actividad comercial con la región del Golfo Pérsico, no llevaban ningún tipo de aguja magnética hasta, al menos, principios del siglo XII. No hubo ninguna referencia a este instrumento hasta el año 1217 en *De Utensilibus*, del monje Alexander Neckam.

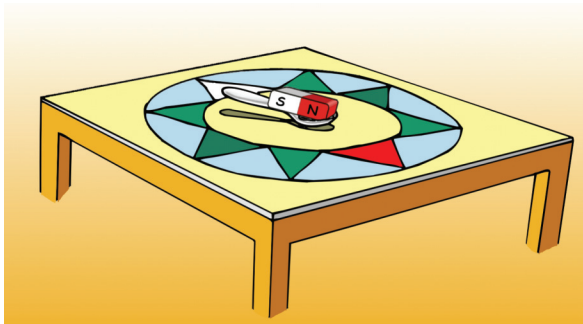
APLICACIÓN EN EL AULA

Aunque no dispongamos de piedra imán, podemos reproducir una cuchara china a partir de una cucharilla de café metálica y un imán bipolar. A continuación colocamos el imán con el polo sur orientado hacia el mango de la cuchara (como hemos dicho que se hacía en las cucharas magnéticas chinas), situado de tal forma que la cuchara quede en equilibrio, en la forma indicada en la figura. Si apoyamos la cuchara sobre una superficie de vidrio o plástico duro y plano, obtendremos nuestra brújula china, y comprobaremos que su mango señala al sur.

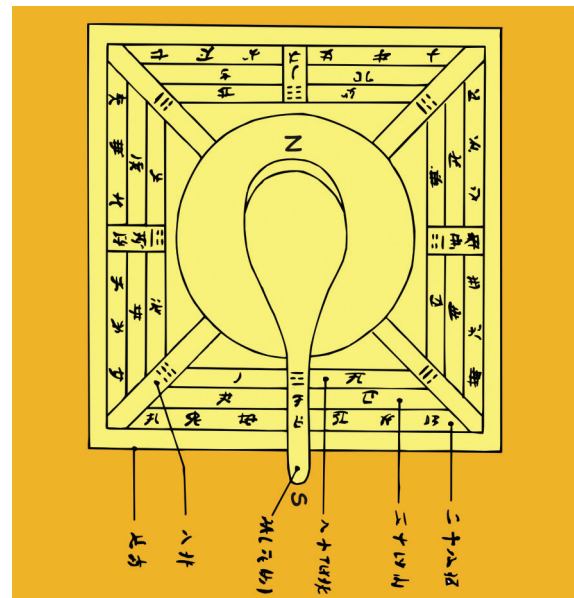


Podemos reproducir este juego sin más que colocar una de las cucharas que hemos construido sobre una superficie transparente, plana y dura, debajo de la cual se introduce (si queremos que “hable”) un papel en el que se haya escrito el alfabeto, de tal forma que el mango de la cuchara señale, al girar, una letra. También podemos sentar alrededor de la mesa a un grupo de alumnos y pedir a la cuchara magnética que nos señale al alumno que nombremos, lo que se consigue uniendo un imán a la rodilla y manejándolo de acuerdo con nuestras intenciones.

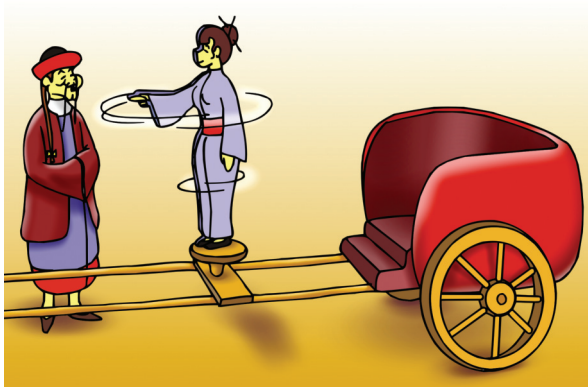
Debajo del plástico podemos colocar un papel en el que hemos dibujado la rosa de los vientos, con los puntos cardinales señalados, o una copia del plano que se adjunta, coloreado artísticamente. También podemos emplear un plato de papel o porcelana en el que hemos dibujado con un rotulador cualquiera de los motivos citados, cuidando siempre de que la cuchara pueda girar libremente.



Como hemos dicho, las primeras cucharas magnéticas de este tipo las emplearon los chinos con fines mágicos, es decir, para adivinar el porvenir a cambio de dinero o regalos. Estos instrumentos son especialmente apropiados para este fin, ya que el mago puede hacer girar el mango de la brújula de acuerdo con sus intereses, sin más que manejar con habilidad un imán natural oculto debajo de la mesa en la que se encuentra la cuchara magnética.



Son muchas las leyendas que refieren las propiedades extraordinarias de los objetos modelados a partir de imanes naturales. Una historia nos cuenta cómo Hoang-Ti, fundador del Imperio chino, se encontraba un día realizando importantes maniobras militares cuando cayó una espesa niebla que dejó a su ejército completamente desorientado. Para salir de esta situación mandó construir, montada sobre un soporte giratorio, una figura de mujer con la mano extendida, empleando la piedra mágica, de tal manera que el brazo de la figura señalase al sur, como se indica en la figura. Así lograron orientarse y dirigirse a sus cuarteles. Esta práctica es fácil de reproducir en clase. Una vez recortada en cartón duro la figura, se coloca un imán bipolar detrás de ella y se sujeta con cinta adhesiva. Si suspendemos la figura con ayuda de un hilo, habremos reproducido la hazaña de Hoang-ti.





LOS ALBORES DE LA
REVOLUCIÓN
CIENTÍFICA



El periodo comprendido entre la caída de Roma, en el siglo V, y los albores de la revolución científica, en el siglo XII, solía considerarse como la noche oscura del mundo occidental. Pero el hecho es que en este periodo aparecieron innovaciones tecnológicas y cambios en la concepción del mundo que conformaron una sociedad técnica e intelectualmente más avanzada que la del mundo clásico en la que vivió la mayoría de los habitantes de Occidente.

Aunque siempre es difícil estimar la diferencia que separa dos momentos históricos, es decir, cuantificar el avance de la sociedad, podemos realizar un experimento mental que nos ayude en este empeño. Consiste en elegir con nuestra imaginación a una persona del siglo V, de gran cultura y conocimiento, y trasladarla a la época del pontificado de Silvestre II, a principios del siglo XI. Nuestro viajero en el tiempo se extrañaría al ver que los hombres no llevaban toga, sino los pantalones introducidos por los bárbaros teutones. De la misma manera, se extrañaría al observar que en algunos lugares de Europa se empleaba mantequilla

para freír alimentos, en vez del ubicuo aceite de oliva. Los caballos tenían ahora una silla a la que sujetaban dos estribos, lo que permitía al jinete llevar el peso de la armadura sin caerse, e incluso disponer de las dos manos para manejar el arco o luchar con la espada. Quedaría sorprendido al contemplar la nueva forma de cultivar la tierra, con ciclos de tres tiempos en lugar de los dos que él conocía, con lo que su rendimiento y, por lo tanto, el número de personas que vivían de ella, aumentaba considerablemente.

En los ríos vería ruedas hidráulicas cuya energía, obtenida de la corriente de las aguas, se empleaba para moler trigo, para mover batanes o para subir el agua a un nivel aprovechable para regar. Gracias a estas innovaciones pudo liberarse una parte de la mano de obra antes necesaria para la producción agrícola, mano de obra que emigró a las ciudades propiciando el florecimiento de comerciantes y artesanos y donde pronto surgieron las universidades. Los reyes, viendo en el desarrollo de las ciudades una forma de

aumentar su poder frente al de los señores feudales, concedieron fueros y dictaron leyes que favorecieron su desarrollo, aumentando aún más su capacidad de innovación.



En lo que al conocimiento clásico se refiere, los estudiosos concebían el universo geocéntrico más o menos como el de los griegos prearistotélicos. De hecho, de las grandes obras clásicas sólo se conocían algunos tratados sobre lógica escritos por Aristóteles, permaneciendo la mayoría de las obras importantes olvidadas o perdidas.

Pero, como la luz del Sol, el nuevo conocimiento llegó a Europa desde oriente, a través de Egipto, Asia Menor y el norte de África, para alcanzar finalmente la Península Ibérica. Y llegó de manos de los musulmanes, se tradujo en las escuelas de traductores castellanas, donde lo habitual entre las personas cultas era hablar tres o cuatro idiomas (castellano, árabe, hebreo y latín medieval) y desde allí se propagó por el resto de Europa, probablemente por los caminos de Santiago.

Gracias a esta labor, a partir del siglo XII se pudieron leer en latín los textos de Arquímedes, Herón, Euclides y Ptolomeo, de tal manera que Europa recuperó la memoria de sí misma, aunque fuera a través de un camino tortuoso que pasaba por la Península Arábiga. Que esto fue así, lo atestigua la Física de Aristóteles: se sabe que

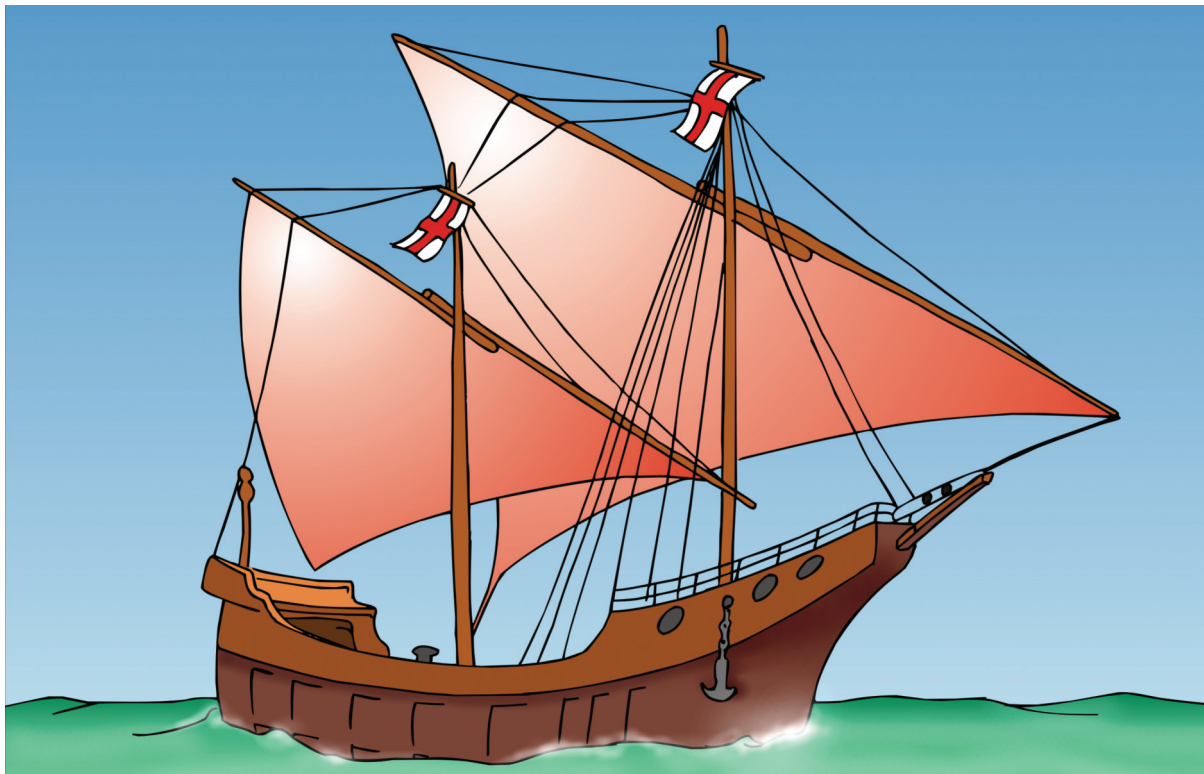
fue traducida, en este peregrinaje a través del tiempo y del espacio, del griego original al siríaco, del siríaco al árabe, del árabe al hebreo y de éste, finalmente, al latín medieval, en un momento en que el imperio de Harún al Rashid se extendía desde el Tajo hasta el Indo.



En 1120 un monje inglés encontró en Córdoba una traducción árabe de *Los Elementos* de Euclides. Gerardo de Cremona traduce del árabe al latín, en Toledo, 55 años después, el *Almagesto* de Ptolomeo, y en poco tiempo se pudo leer en latín un conjunto de obras griegas y romanas que contenían el conjunto fundamental de los saberes del mundo clásico, en su mayoría científicos, pero en el contexto de una sociedad más desarrollada, con unos conocimientos técnicos mucho más avanzados que los existentes a la caída del imperio romano. Aristóteles, de la mano de Averroes y sus seguidores, destrona de nuevo al Platón traído por San Agustín en el siglo V, dando comienzo un largo periodo en el que su *empíria*, o aprendizaje por el experimento, sustituye paulatinamente a la *apería*, o conocimiento *a priori*, causa de la mayoría de los preconceptos que todavía tenemos.

Si nuestro viajero virtual se hubiese asomado a un puerto de mar, una de las cosas que más le habría llamado la atención sería una especie de remo vertical que los navíos presentaban a popa. Se trataba de un nuevo elemento de gobierno, el timón. Y un palo a proa, casi completamente horizontal llamado bauprés, que permitía desplegar una nueva vela, complemento del

aparejo latino. Con este nuevo aparejo y el uso del timón, los barcos podían ceñir más en la dirección del viento, consiguiéndose una navegación más rápida y económica. Pero la sorpresa mayor le esperaba en el interior del buque, donde se habría quedado maravillado al ver una misteriosa aguja, que giraba en torno a un pivote o flotaba en una pequeña balsa de madera, situada siempre a la vista del timonel y que señalaba siempre al norte. Pero, eso sí, antes de permitirle subir al barco se habrían asegurado de que no llevaba ajos en sus bolsillos, ya que sus efluvios, según se creía, interferían con los que venían del polo norte o de la estrella polar y perturbaban el correcto funcionamiento de la brújula.

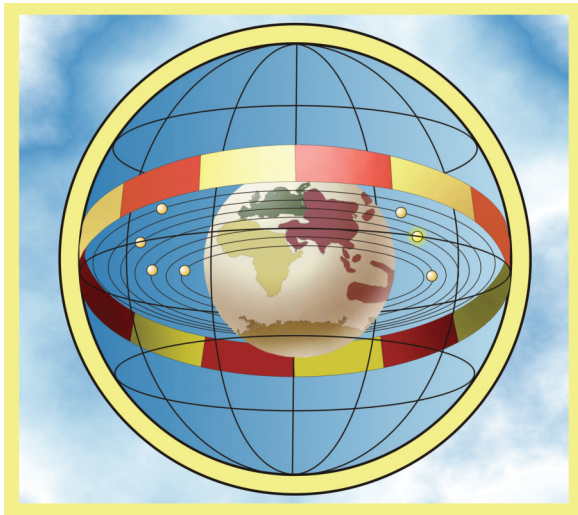




COSMOLOGÍA DE LA ÉPOCA

Recordemos que el modelo de universo aceptado en esa época era el del Ptolomeo, con la Tierra en el centro, más o menos como lo había establecido Aristóteles.

La cosmología de Aristóteles se puede enunciar, de una manera resumida, en la forma siguiente:



El centro del universo coincide con el centro de la Tierra.

El universo se divide en dos partes bien diferenciadas que están separadas por la esfera de la Luna. Ambas partes están compuestas por elementos diferentes, es decir, por diferentes tipos de átomos, y se comportan de acuerdo a leyes distintas.

La Tierra, situada por debajo de la esfera de la Luna, esta constituida por cuatro elementos o esencias que, debidamente combinados, formaban todas las sustancias materiales que en ella se hallan. Estos son los ya conocidos cuatro elementos de Empédocles: la tierra, el agua, el aire y el fuego.

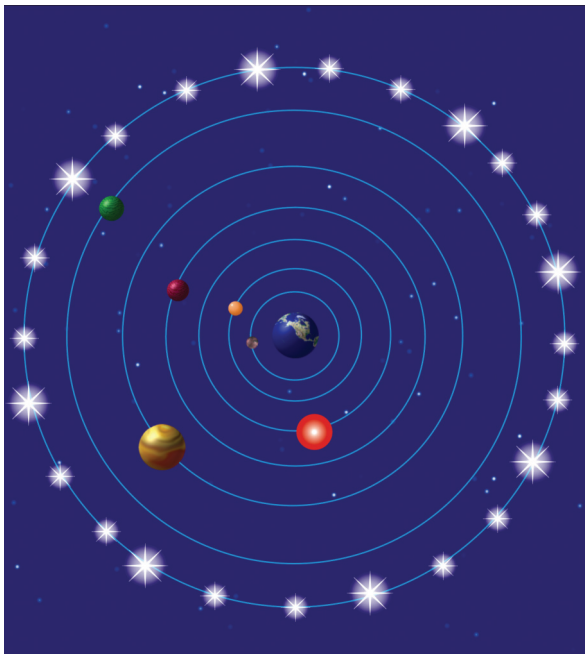
En el **universo sublunar** cada elemento tiene un lugar natural, donde le corresponde estar. El lugar natural del elemento tierra es una esfera cuyo centro coincide con el centro del universo (y por lo tanto con el de la Tierra).

En torno a esta esfera se encuentra el lugar que le corresponde al agua. Sobre el agua se sitúa el lugar natural destinado al aire y sobre éste el sitio reservado al fuego. Todos los espacios naturales de estos elementos están separados por una superficie esférica. El hecho de que en el universo sublunar existiera un cierto desorden era causado por los efectos de arrastre que producía la esfera de la Luna en su movimiento.

La parte de universo que se encuentra más allá de la esfera de la Luna es, como la platónica y al contrario de la sublunar, perfecta e inmutable. Aristóteles postuló que en esa parte de universo no existe ninguno de los cuatro elementos encontrados en la Tierra.

Todos los cuerpos que podemos llamar celestes, están constituidos por un único elemento o esencia, sin nombre específico, al que se conoce bajo la denominación de quinta esencia o quinto elemento. Esta esencia tiene la propiedad de que su movimiento natural no está dirigido hacia el centro del universo (que coincide con el centro de la Tierra). Sus átomos están animados de un movimiento circular, de tal manera que el centro de la circunferencia coincide con el centro del universo y, por lo tanto, paralelo a la superficie de la Tierra. De esa sustancia estaban hechas las estrellas y todos los demás cuerpos que se encontraban en el espacio situado más allá de la esfera de la Luna. Cada planeta (incluido el Sol, que para Aristóteles tenía la misma naturaleza que los planetas), se encuentra fijo en una esfera que tiene su propio movimiento circular.

Como límite superior del universo se encuentra la esfera de las estrellas fijas. Es ésta una esfera transparente (como las demás), donde se encuentran prendidas las estrellas como luces de un árbol de navidad, fijas en su sitio. La esfera de las estrellas fijas está animada de un movimiento de giro en torno al eje de la Tierra, de manera que da una vuelta al día. Todo ello se ha representado en esta ilustración.

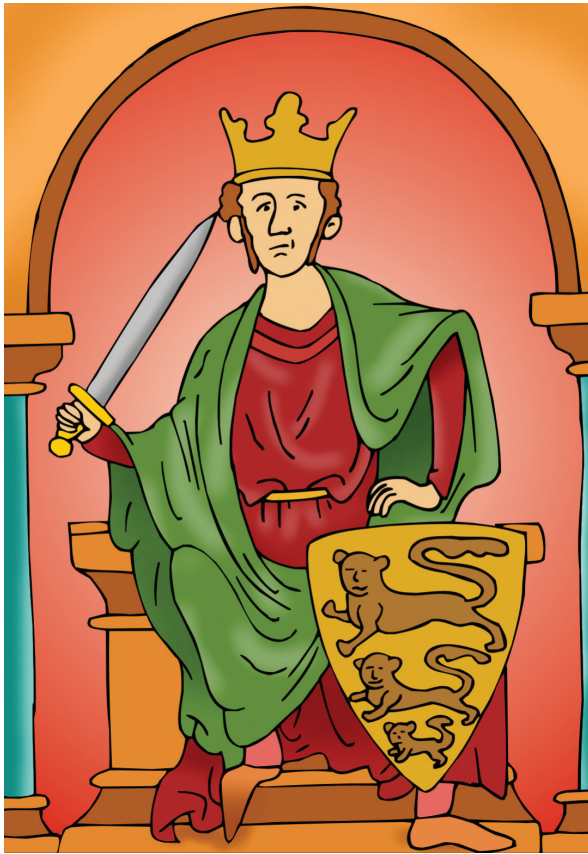


Y este mundo, tal como lo vería nuestro viajero, es el escenario en el que va a desarrollarse la parte siguiente de nuestra historia, que ahora avanza de la mano del averroísmo. Y a ella debemos retornar.



ALEXANDER NECKAM:
LA AGUJA DE MAREAR HÚMEDA Y
LA SUSPENDIDA

Alexander Neckam nació en Oxford, la misma noche en la que Ricardo Corazón de León vino al mundo, el 8 de septiembre de 1157. La madre de Alexander crió a su hijo junto con el príncipe; ambos fueron hermanos de leche. Su vida se desarrolló en tiempos de cruzadas, de lucha del mítico Robin Hood contra Juan sin Tierra, hermano de Ricardo, y en los tiempos en que se firmó la Carta Magna, precursora de la Cámara Alta de las modernas democracias.



Ricardo Corazón de León

Neckam dedicó su vida al estudio y a la enseñanza. En 1180 fue profesor de la universidad de París, donde poco después enseñó Tomás de Aquino. Fue monje agustino y, además de teología, estudió los fenómenos naturales, de acuerdo con el averroísmo reinante, como hemos indicado. Su presencia en nuestro relato se debe a que es el primero que explica cómo construir agujas de marear, tanto “húmedas” como “secas”, haciendo el nombre referencia a su utilización para orientarse en la navegación, posiblemente basándose en las brújulas flotantes chinas. De todo ello vamos a tratar en este apartado. La importancia de la brújula sólo puede entenderse si se conoce el sistema de navegación de aquella época, que perduró hasta que la construcción del reloj de Harrison permitió determinar la longitud de la posición del buque.

Alexander Neckam murió en 1217. Sus obras no pasaron inadvertidas para Roger Bacon, que lo cita en sus escritos en los que expone la nueva forma de estudiar la naturaleza, un método basado en construir hipótesis y comprobarlas por medio de experimentos. Estamos en pleno inicio de la revolución científica.

En sus obras, *De Utensilibus* y *De Naturis Rerum*, Alexander Neckam nos describe la importancia de la brújula y la forma de construirla, expresándose en estos términos:

“Los navegantes, cuando se encuentran en el mar con un cielo cubierto por nubes y no pueden orientarse estudiando el camino del Sol, o cuando navegan en una noche oscura y no pueden determinar su rumbo, emplean una aguja que se ha imantado poniéndola en contacto con una piedra imán y que colocan flotando en un recipiente. Esta aguja gira sobre sí misma y cuando este movimiento cesa uno de sus extremos señala exactamente el norte”.

Neckam nos está describiendo lo que se llamaba la brújula húmeda, de la que se conocen algunos ejemplares chinos sin datar. En el borde del vaso en el que flotaba la aguja, estaban señaladas las direcciones de los puntos cardinales; el rumbo del barco se fijaba haciéndolo girar hasta que la aguja señalase una dirección determinada.



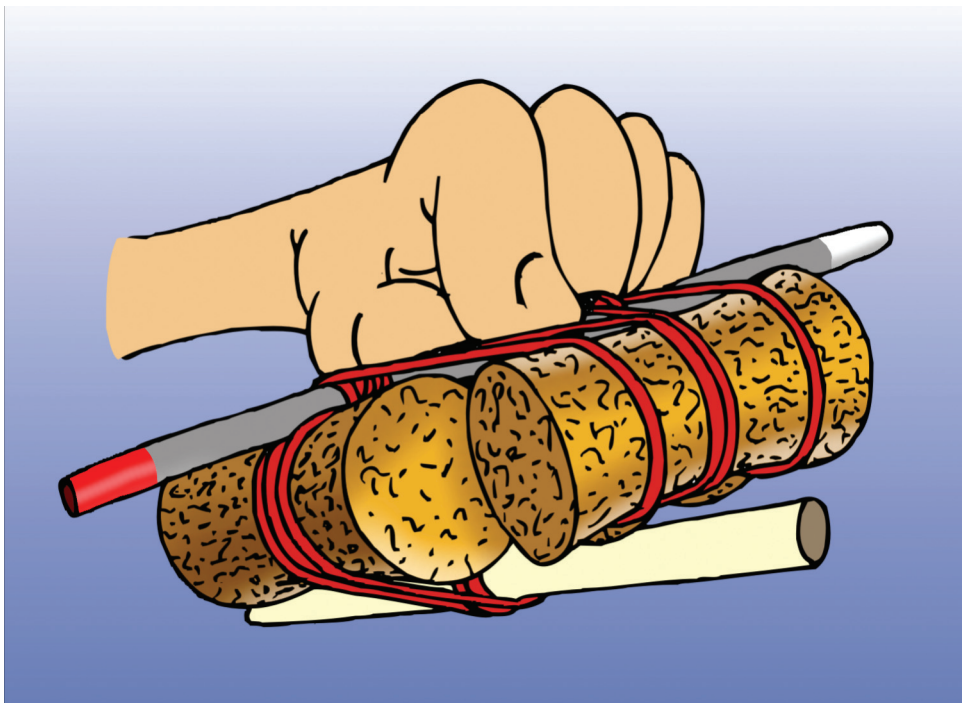
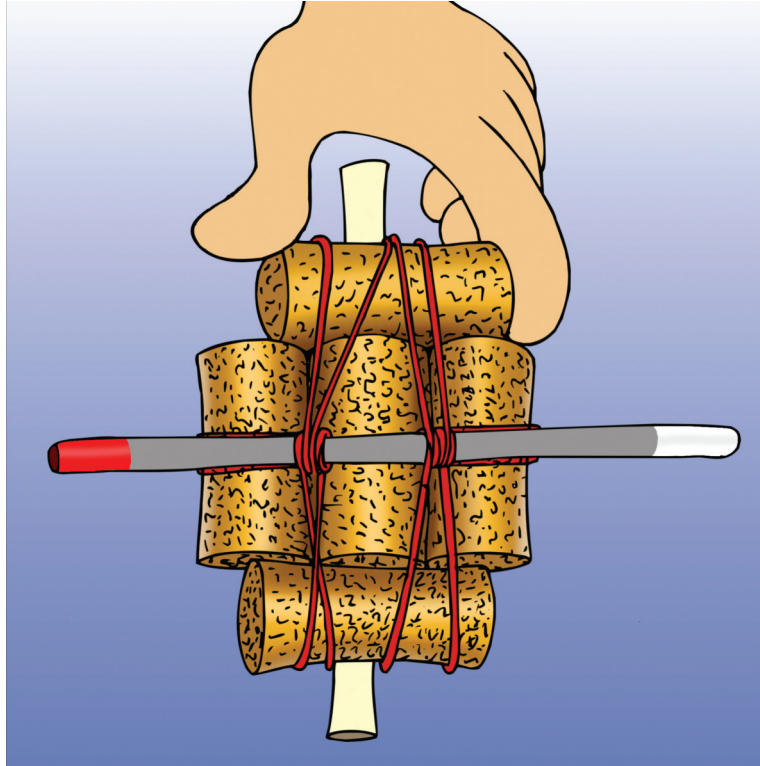
APLICACIÓN EN EL AULA

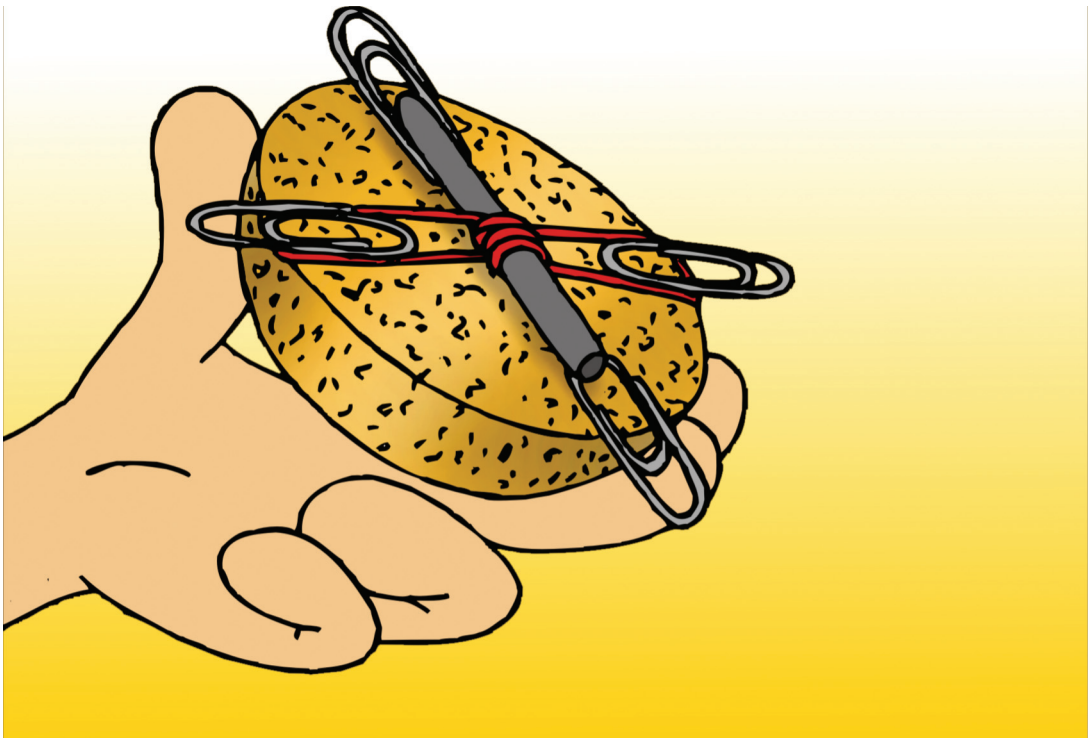
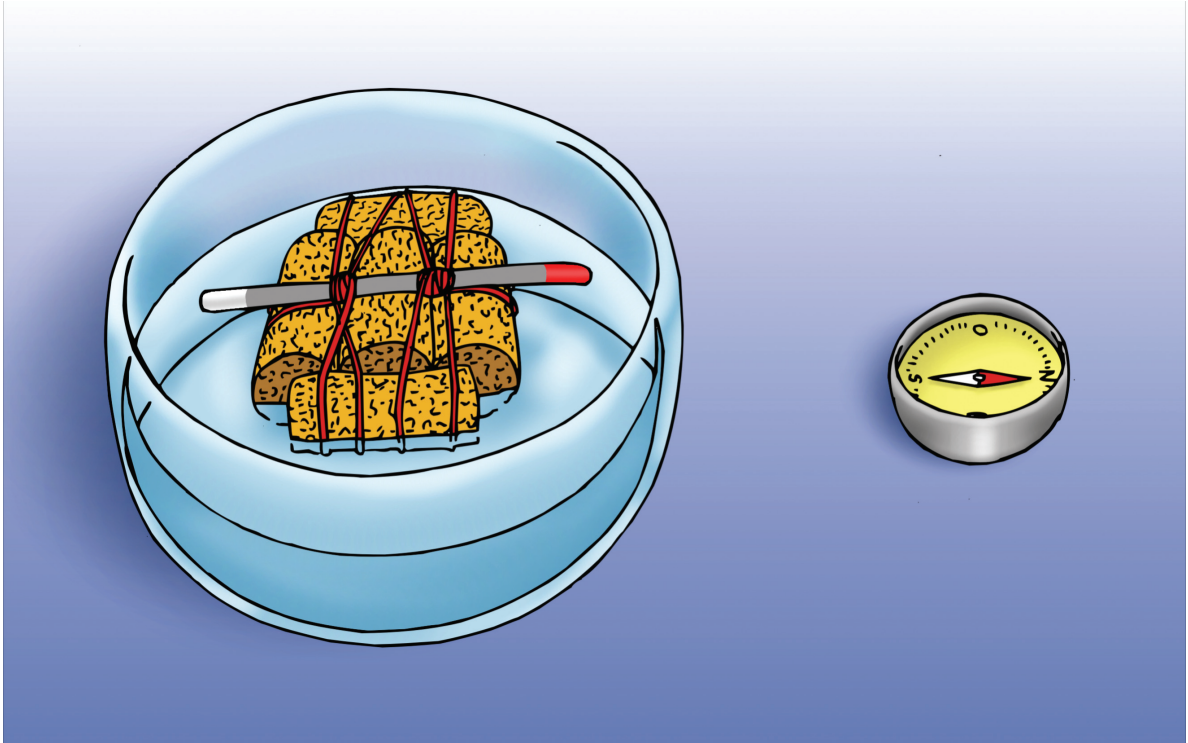
Construyamos una brújula de marear

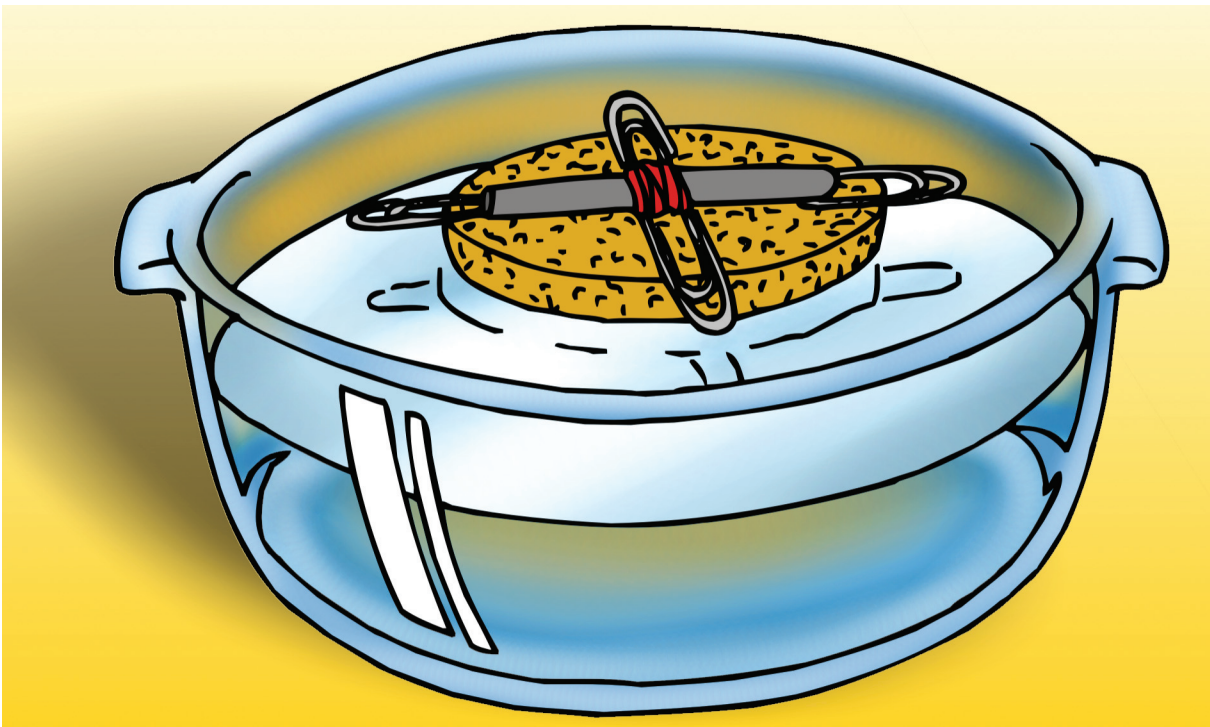
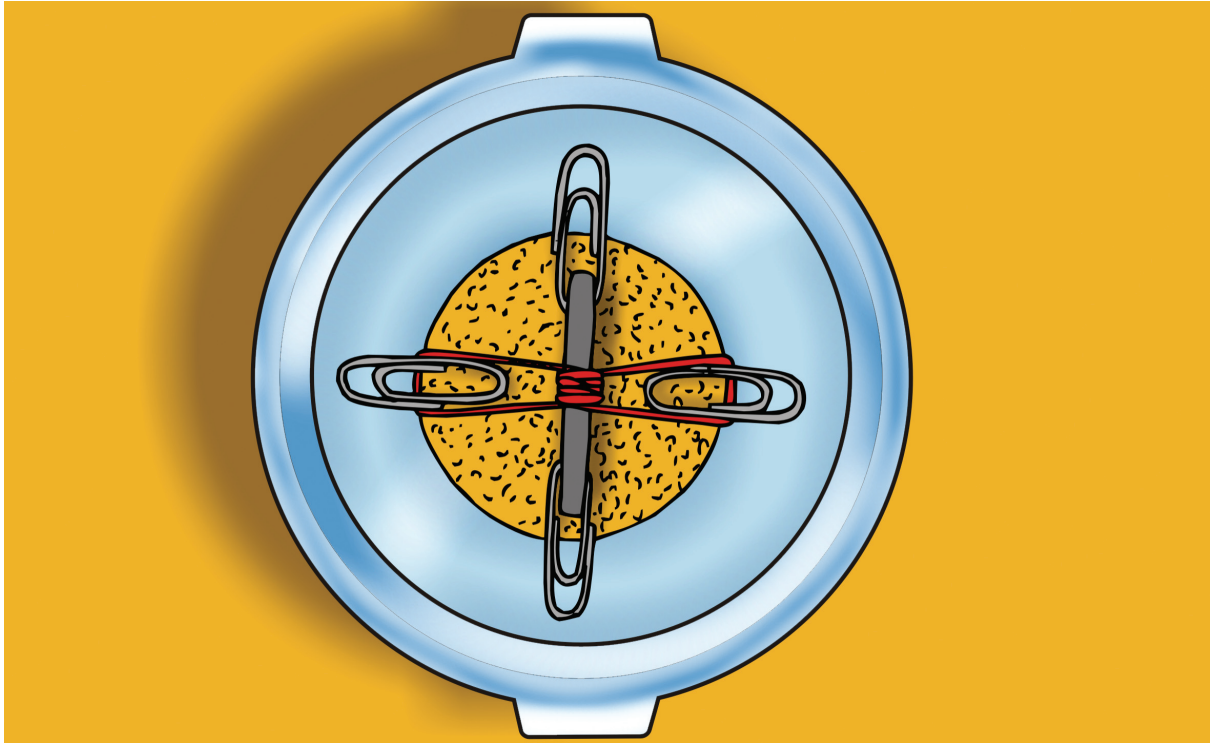
Nosotros, en el aula, vamos a seguir el procedimiento siguiente: se construye una pequeña balsa que flote en el agua y que soporte el peso de un imán de barra. En este caso es imprescindible que el imán sea bipolar. No valen los imanes cerámicos “de nevera”, ya que suelen ser multipolares, como veremos más adelante. Se fija el imán a la balsa y se deja flotar libremente el conjunto hasta que su posición se estabilice. Repetiremos el experimento partiendo de orientaciones iniciales diferentes del imán y comprobaremos que su orientación final siempre es la misma.

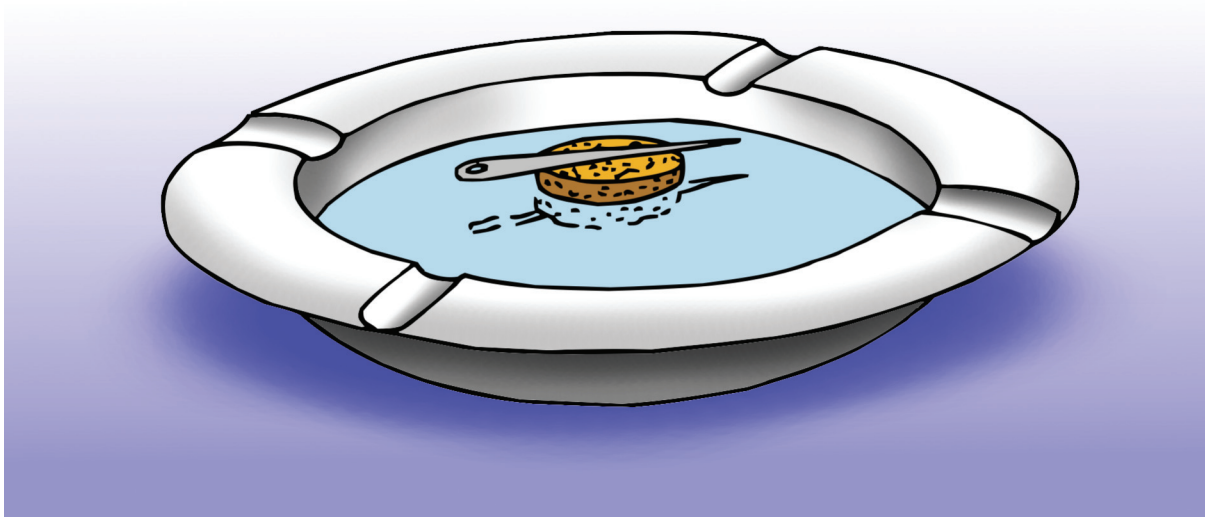


En las ilustraciones siguientes se pueden ver algunas formas de construir estas brújulas, de las muchas posibles.









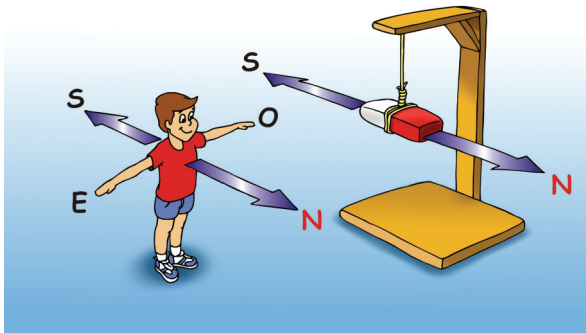
El paso siguiente consiste en que todos los alumnos, ya sea individualmente o por grupos, repitan el experimento. El resultado es espectacular, ya que todos los imanes se colocan, paralelos unos a otros, señalando la misma dirección geográfica. Éste es un resultado fundamental. Es muy importante que los alumnos se den cuenta de lo extraño que resulta este fenómeno, así como de la trascendencia de sus aplicaciones prácticas. Acaban de descubrir la brújula; el profesor debe hacerles comprender la utilidad de estos instrumentos para la navegación, la orientación en lugares desconocidos, el trazado de mapas..., así como que, detrás del hecho de que todos los imanes se coloquen paralelos, tiene que haber algún misterio que sería interesante descubrir y que no puede dejar de investigarse.

Nota: es fundamental realizar estos experimentos en lugares alejados de materiales magnéticos. Muchas mesas escolares se construyen con estructura metálica, lo que falsea los resultados. En ese caso se recomienda llevar a cabo estas pruebas en el patio del colegio.

En este punto, el profesor indicará a los alumnos que deben señalar con un rotulador rojo el extremo de los imanes que señalen en una dirección (el norte). Si los imanes estuviesen marcados, deberán darse cuenta de que siempre es el extremo o polo señalado con pintura roja el que señala al norte geográfico.

Para que los alumnos queden convencidos de que el extraordinario fenómeno de la orientación de los imanes no depende de que estén en el agua o de la habitación en la que realizamos el experimento, podemos repetirlo en otros lugares. Además tendremos que marcar alguna referencia exterior que permita comprobar que los imanes siempre señalan la misma dirección, para lo cual debemos elegir un objeto, edificio o monumento visible desde la escuela y suficientemente alejado para que indique una dirección geográfica. Este punto de referencia tiene que verse desde todos los lugares en los que comprobemos los resultados.

Otra comprobación que vale la pena realizar consiste en suspender el imán por su parte central, mediante un hilo, sujetándolo a algún punto donde se pueda colgar. Para ello se pueden emplear soportes fabricados con alambre de aluminio, como en la figura. Como es lógico, el extremo rojo se dirigirá hacia el mismo punto de referencia que señalan los imanes flotantes.



Finalmente construiremos una brújula moderna, basculante. Esta forma es un poco más difícil pero puede servir para que los alumnos desarrollen su ingenio y dotes prácticas. Nosotros vamos a exponer la forma de construir una de estas brújulas, similar a la que Neckam describe en su obra *De Utensilibus*. Como es muy difícil fabricar una aguja magnética con un casquillo central, lo más conveniente es obtenerla desarmando una brújula de bajo precio, de las que pueden adquirirse en una tienda de “todo a cien”. Una vez desarmada la caja y extraída la aguja, se montará sobre un alfiler un trozo de clip, un pedacito de cable de cobre aguzado o una aguja de coser clavada en un corcho que hace de soporte.

Y para evitar que la aguja imantada se salga de su soporte podemos fabricar con un alambre de aluminio, de latón o de cobre, una pieza que se sujeta al corcho. Ésta es la estructura básica de una aguja de marear de los siglos XII y XIII.

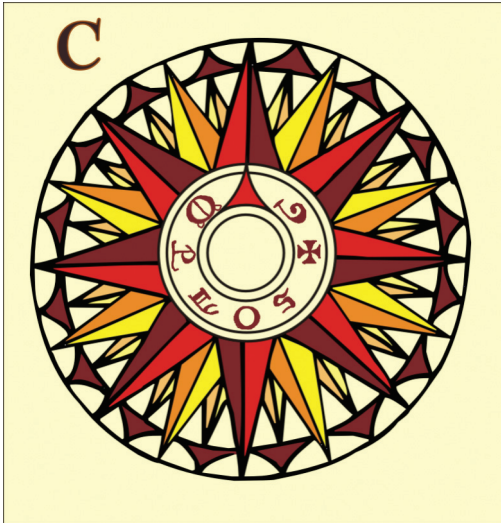
Es ahora el momento en el que el maestro debe explicar a sus alumnos la existencia de los puntos cardinales, en el caso de que les sean desconocidos,

basándose en la indicación de la brújula. Hasta ahora hemos dado por supuesto que existe una dirección norte-sur constante. Pero no sabemos qué significa ni a qué se debe. Nuestro próximo punto consistirá en introducir este concepto.



LA DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN
NORTE-SUR Y LA DECLINACIÓN MAGNÉTICA

La siguiente pregunta es: ¿qué significado tiene la dirección norte-sur? ¿Cómo podemos saber que la dirección que señala la brújula es la dirección del norte?



La naturaleza de los puntos cardinales es una cuestión difícil de tratar en el aula, ya que implica el fijar en el espacio una serie de direcciones privilegiadas, que no cambien con el tiempo. Estas direcciones, como es lógico, sólo se pueden definir respecto a puntos que se consideren fijos, para lo cual hay que recurrir a elementos astronómicos, como la estrella polar, que no forman parte de la vida cotidiana del niño.

APLICACIÓN EN EL AULA

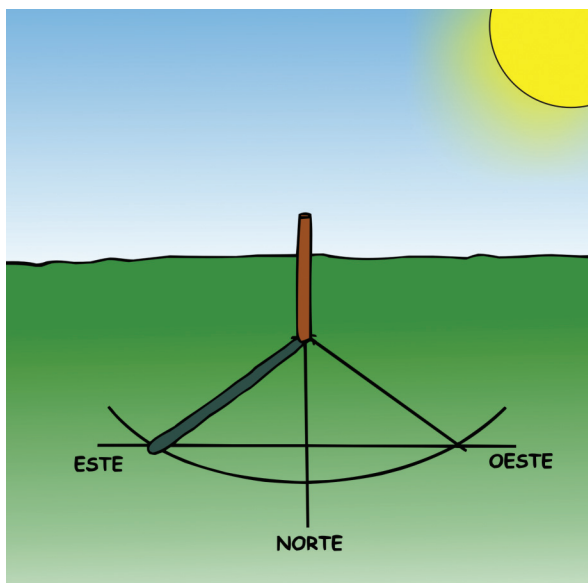
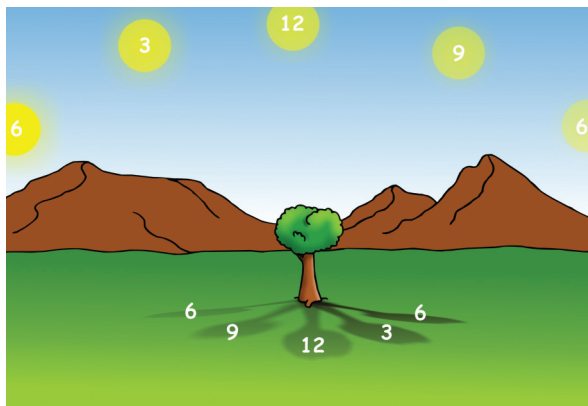
Vamos a orientarnos

Nosotros vamos a presentar una serie de conocimientos que creemos necesarios para entender el concepto de dirección norte-sur. El profesor deberá elegir el punto en el que quiere empezar su explicación y la profundidad que considera suficiente para sus alumnos.



Con la sombra de una vara: determinación de la dirección norte-sur.

Todos sabemos que la sombra de un árbol o de una vara iluminada por el Sol va cambiando su orientación a lo largo del día, como indica la figura. El principio de funcionamiento de un reloj de sol se basa justamente en este fenómeno. Si los alumnos no conocen el fundamento de ese instrumento y no se considera que éste sea el momento apropiado para enseñárselo, se puede explicar que la sombra de una vara vertical, situada sobre un suelo plano, se sitúa en la dirección norte-sur cuando son las doce horas solares (las 13 horas en invierno y las 14 horas en verano, según la hora oficial en España). Para determinar correctamente esa dirección, colocaremos la vara en el suelo con ayuda de una plomada, para asegurarnos de su posición vertical.

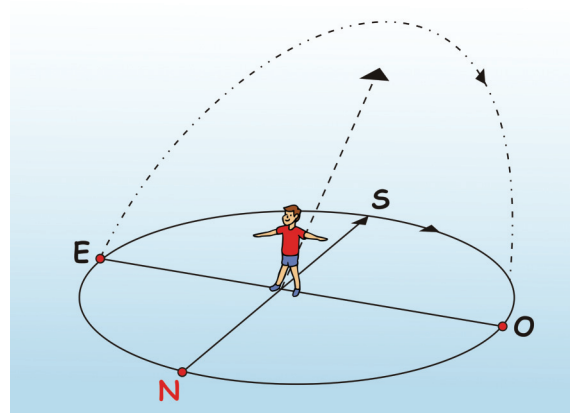


Luego señalaremos en el suelo la posición de la sombra a las 10, a las 11 a las 12, a las 13 y a las 14. A continuación buscaremos el punto medio de los segmentos determinados por las señales simétricas respecto al mediodía: el que va de las 10 a las 14, y de las 11 a las 13. La coincidencia de estos puntos medios con la señal de las doce nos dará una idea de la exactitud de nuestras observaciones. Si dibujamos un círculo que englobe las tres marcas tendremos nuestra determinación del norte. La recta que une el pie de la vara con este punto señala la dirección norte-sur.

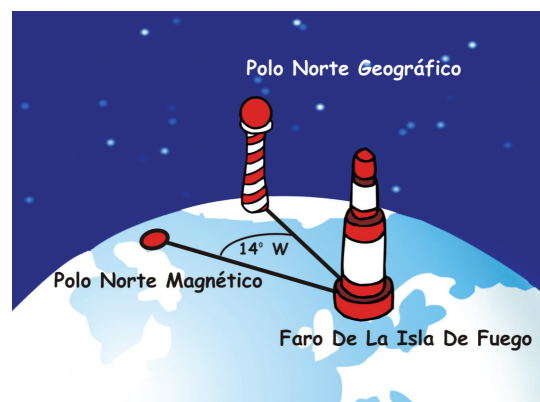
Y este es el momento de que comparemos esta dirección con la que señalan nuestras brújulas.

¿Qué ha ocurrido? **Los alumnos descubren un fenómeno nuevo: la declinación magnética.**

Efectivamente, nuestra brújula no señala exactamente hacia el norte geográfico. Las direcciones del norte magnético y el geográfico forman un ángulo, como indica la figura.

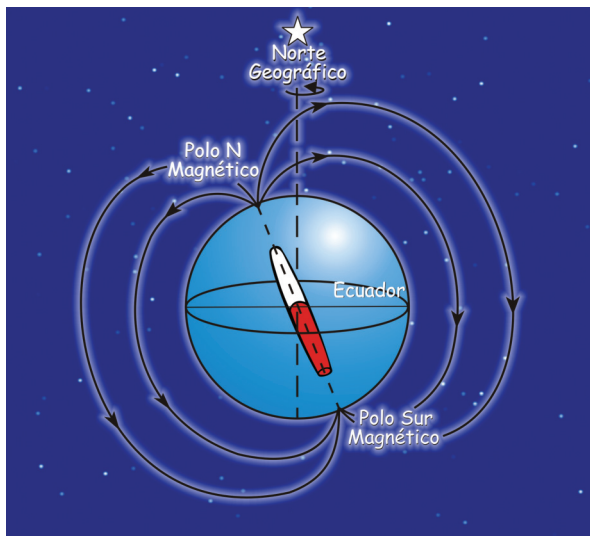


Se llama declinación magnética al ángulo que forma la dirección que marca la aguja del polo norte de la brújula con la dirección del polo norte geográfico, es decir, con la dirección del eje de rotación de la Tierra.



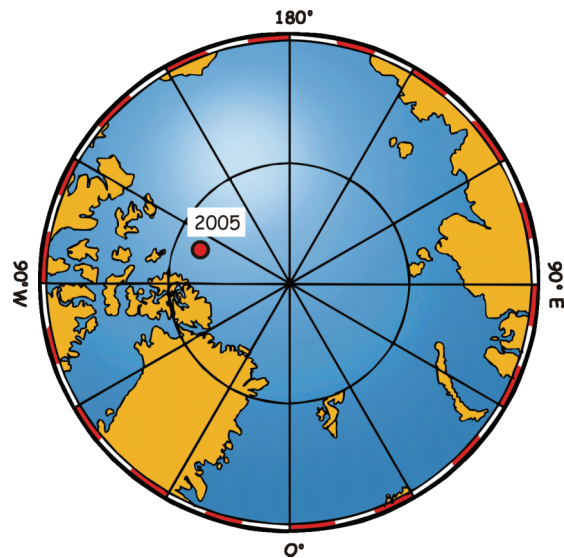
El valor de la declinación se toma como positivo si la brújula se desvía hacia el este y negativa cuando se desvía hacia al oeste. Así, una declinación de -9° quiere decir que la aguja se desvía 9° hacia el oeste geográfico. A veces se indica como $9^\circ W$.

La declinación magnética actual en España está comprendida entre los $3^\circ W$ en Menorca y los $9^\circ W$ en La Coruña, variando entre estos valores para los demás lugares de la península. Esto se debe a que el polo norte magnético está situado en el norte de Canadá, a una distancia de unos 1.600 kilómetros del norte geográfico.

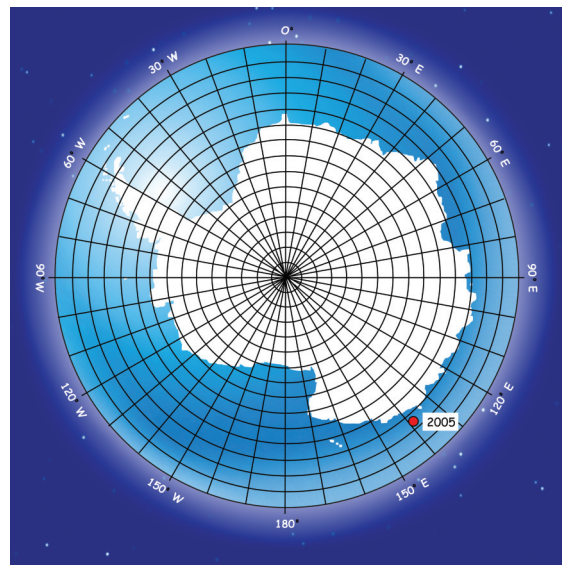


Para comprobar si nuestros alumnos han comprendido el concepto y las implicaciones del fenómeno de la declinación magnética, podemos preguntarles si existe alguna región del globo terráqueo en la que el polo norte de la brújula indique el polo sur geográfico.

A la vista de la figura, en la que se ha representado la situación del polo norte magnético y del geográfico, es evidente que en la región comprendida entre ambos puntos la indicación de la brújula será la opuesta a la correcta, ya que el polo norte magnético se encuentra en la dirección del polo sur geográfico.



Esta situación es la misma, pero intercambiando los polos, en el hemisferio sur; el polo sur magnético está situado a $71,6^\circ$ de latitud Sur y a 139° de longitud Este, a unos 2.600 kilómetros de distancia del polo sur geográfico, como indica la figura.





PEDRO PEREGRINO Y EL NOMBRE DE LOS
POLOS MAGNÉTICOS

Parece que ya en el siglo X los sabios chinos se dieron cuenta de que la dirección norte de la esfera celeste no coincide con la dirección que señala la brújula. De esa época es el diagrama que muestra la figura. El desplazamiento entre los signos iguales situados en los dos círculos exteriores es evidente y corresponde, sin duda, a la diferencia de direcciones entre el norte magnético y el geográfico, lo que demuestra su conocimiento de la existencia de la declinación magnética. El diagrama fue extraído de un libro de inicios del siglo X, y tiene como título *Las direcciones y emanaciones de la aguja fluctuante*.

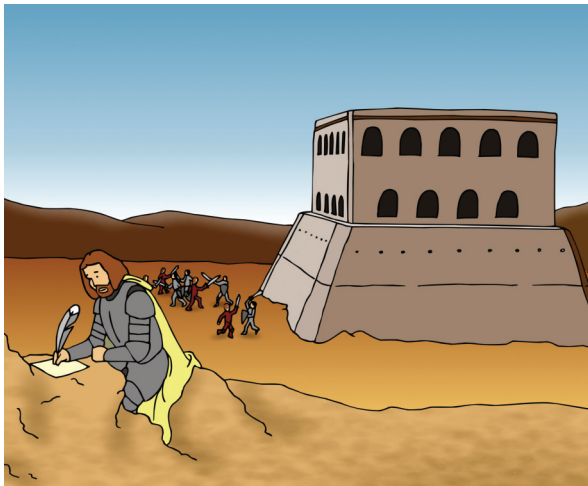


El efecto de la declinación sobre la determinación del rumbo de un barco es de la mayor importancia, ya que los paralelos y meridianos de los mapas están referidos a los polos geográficos.

Los científicos del siglo XIII, llamados entonces filósofos naturales, se enfrentaban con dos importantes problemas; buscar la razón por la que un imán se orientaba en la superficie de la Tierra y explicar por qué señalaba precisamente hacia un punto que no coincidía con el norte geográfico. Como veremos este tema fue objeto de numerosas conjeturas e investigaciones.

El siguiente paso en el empleo de la brújula se debe al ingeniero militar Pierre de Maricourt, conocido por Pedro Peregrino porque tomó parte en la cruzada de San Luis, rey de Francia.

Pedro Peregrino de Maricourt fue amigo personal de Roger Bacon, conocido como *doctor mirabilis*, que comenzó un movimiento filosófico que daría lugar a la revolución científica un siglo después. Su fama se debe a su tratado experimental sobre el magnetismo, escrito y firmado en el asedio de la plaza fuerte de Lucera, en sur de Italia, *el día ocho de agosto del día del Señor 1269*, con el título *Epistola Petri Peregrini de Maricourt ad Sygerum de Foucaucourt, militem, de magnete*.



La carta está escrita en pergamino y dirigida al soldado Sygerus de Foucaucourt y dividida en dos partes; en la primera, presenta de forma admirablemente razonada una serie de experimentos cuyos resultados conducen a las leyes fundamentales del magnetismo de imanes permanentes. Aunque algunas de estas leyes eran conocidas, la originalidad de su trabajo con-

sistió en presentarlas en un orden lógico y como resultado de experimentos. Explica diversos tipos de brújulas y diferentes experimentos, llegando a enunciar las características de los imanes, aunque la mayoría ya eran conocidas por los estudiosos de la época. La importancia del trabajo de Pedro Peregrino no radica solamente en sus resultados, también es importante el énfasis que puso en la realización de experimentos, más allá de la simple observación.

En esa época se sabía que un imán es un material capaz de atraer objetos de hierro y otros imanes. También se sabía que la capacidad de atracción es mayor en unos puntos determinados, a los que ahora llamamos polos. La región del espacio donde se manifiesta la acción de un imán se dice que está dentro de su campo magnético.

Ya hemos dicho que uno de los problemas científicos más importantes de la época es el de la razón por la que las agujas imantadas señalaban aproximadamente al norte geográfico. Maricourt concibió la idea de que la Tierra estaba hecha de material magnético, por lo cual cualquier otro imán situado en su superficie debía orientarse de manera adecuada. Para comprobarlo construyó una gran esfera de piedra imán, es decir, un modelo reducido de la Tierra, y procedió a estudiar el comportamiento de una brújula en su superficie.

Construyamos un modelo de Tierra magnética

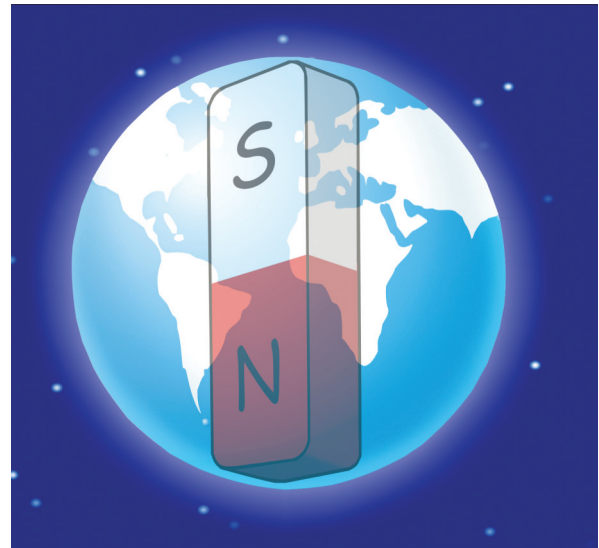
Nosotros, que no disponemos de un imán natural de estas proporciones, podemos construir un modelo de tierra magnética más sencillo.

Para ello debemos situar un imán bipolar en el interior de una esfera, como indica la figura.

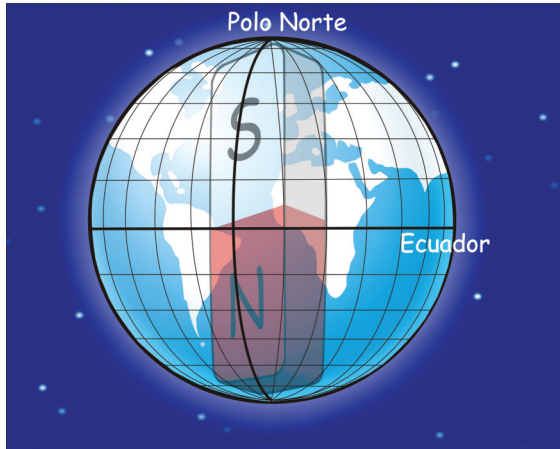
Se puede emplear cualquier esfera de que dispongamos y sea fácil de dividir en dos partes. Las más convenientes son las de poliuretano expandido, aunque se puede emplear una pelota de plástico duro partida en dos semiesferas, donde podamos fijar el imán en su posición. Si no disponemos de un imán de longitud suficiente lo podemos suplementar con una pieza de hierro, de manera que alcance las dimensiones apropiadas. En último caso podemos utilizar una calabaza o una sandía, teniendo cuidado de no mancharnos.

Una vez construido nuestro modelo de Tierra, podemos realizar los mismos experimentos que Pedro Peregrino llevó a cabo hacia 1250. En Castilla reinaba entonces Fernando III el Santo y en Francia su primo Luis IX, también santo, a cuyas órdenes guerreaba Pedro Peregrino. A continuación transcribimos exactamente las indicaciones que se encuentran en su manuscrito:

“Tómese una aguja o cualquier pieza alargada de hierro, estrecha como una aguja, y colóquese sobre la esfera de piedra imán, dibujando una línea en la dirección en la que se coloque la aguja, de manera que divida la esfera por la mitad. Colóquese después la aguja de hierro en otra posición sobre la esfera y márquese con otra línea de manera similar en esta nueva posición. Se verá que todas las líneas dibujadas de la manera que se ha indicado convergen en dos puntos o polos opuestos de la esfera”.

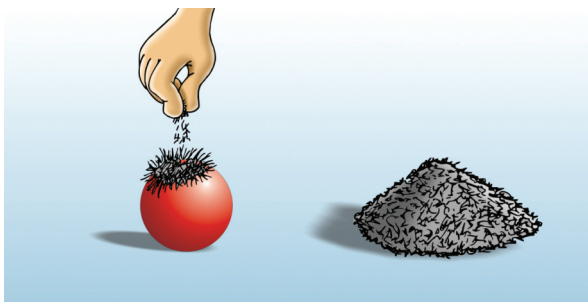


Aunque si se siguen las indicaciones de Pedro Peregrino se obtienen sus mismos resultados, nosotros preferimos utilizar una brújula que pueda considerarse de pequeñas dimensiones comparada con la esfera, en lugar de una aguja de hierro sin imantar, ya que sus indicaciones son las que estamos utilizando, y un rotulador. Iremos situando la brújula sobre diferentes puntos de la superficie de la esfera y señalando con el rotulador la dirección que señala la aguja imantada. Si unimos los puntos con líneas que sigan la dirección marcada por la brújula en cada uno de ellos, veremos que estas líneas corresponden a los meridianos de la esfera. El círculo máximo que corta a todos los meridianos, de manera que esté a igual distancia de los polos, es el ecuador. El segmento rectilíneo que une ambos polos es el eje magnético de la esfera.



Por esa razón Pedro de Maricourt llamó a los puntos en los que se cruzan los meridianos magnéticos, con toda lógica, polos de la esfera magnética. Y por esa razón seguimos designando con el nombre de polos los puntos de un imán en los que la brújula señala una dirección perpendicular a la superficie.

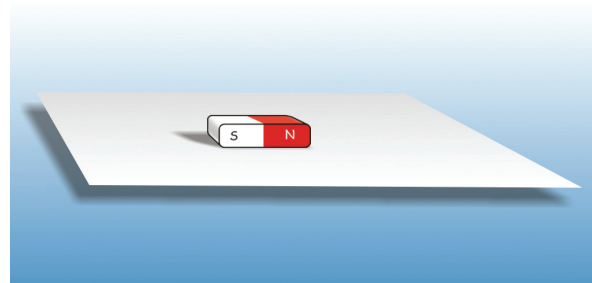
Si no disponemos de una esfera en la que situar un imán bipolar, podemos sustituirla por una bola de plastilina del tamaño de una naranja, en la que introduzcamos un imán. En este caso no es apropiado el uso de la brújula, ya que su tamaño es comparable al de la bola; es preferible utilizar limaduras de hierro, como hace Pedro Peregrino en su experimento. Las limaduras de hierro se distribuirán, revelando la posición de los polos.



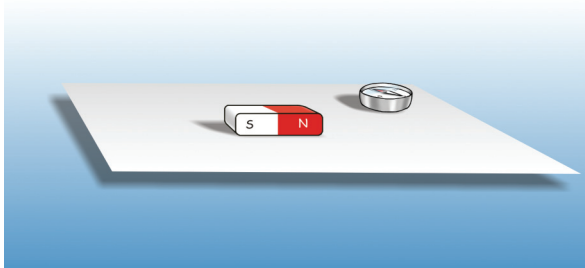
A continuación Pedro Peregrino colocó la esfera, acostada sobre un punto del ecuador, en un plato de madera que dejó flotar libremente en un recipiente más grande, permitiendo que la brújula se orientase en el campo magnético terrestre, de la manera que ya conocemos; el polo de la esfera que se sitúa mirando hacia el norte es el polo indicador del norte y el opuesto es el polo indicador del sur. Por razones de economía de lenguaje a los polos se los llamó simplemente polo norte y polo sur, lo que puede causar sorpresa entre los alumnos, como más adelante comentaremos.

Llegados a ese punto, en el que ya hemos adquirido práctica en el manejo de la brújula, podemos estudiar las características magnéticas de la región que rodea a un imán, es decir, de su campo magnético.

Para ello debemos disponer de un imán, en forma de barra, de gran tamaño y de suficiente potencia (si no lo tenemos podemos unir varios pequeños imanes). Disponeremos el imán en el centro de un papel DIN A-3 o mayor, en la forma que indica el dibujo.

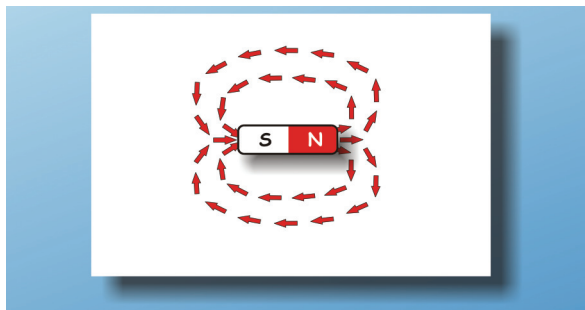


A continuación situamos la brújula (cuanto más pequeña, mejor) en un punto cualquiera del papel. Inmediatamente se orientará en una dirección determinada, siempre la misma en ese lugar.



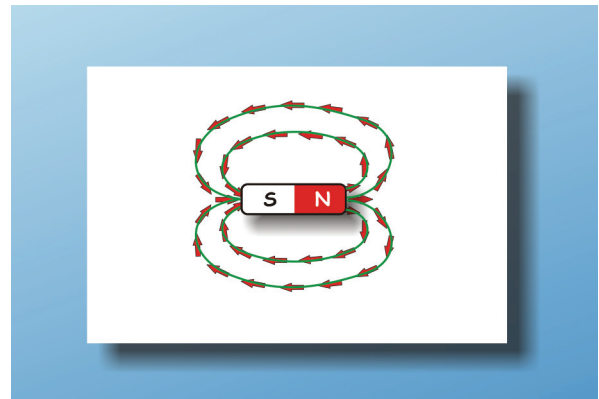
Esto quiere decir que en el punto del espacio donde hemos situado la brújula existe un campo (“algo”) que la obliga a orientarse en la dirección en que lo hace. Dibujaremos una flecha, con la punta dirigida al norte de la brújula, que nos indica la posición exacta de la aguja imantada en ese punto. Esta flecha nos indica la dirección del campo magnético.

A continuación, vamos situando la brújula en diferentes puntos del papel, viendo la dirección que toma la aguja en cada punto y dibujándola en nuestro papel. Al cabo de unas cuantas operaciones, habremos señalado la dirección del campo en un número suficiente de puntos como para hacernos una idea de la distribución del campo en la hoja de papel.



Ahora hagamos un alto para pensar un poco y recapacitar sobre los resultados de nuestro experimento. Aunque hubiese sido preferible tener la dirección del campo en todos los puntos de la superficie del papel, puesto que en todos los puntos existe, podemos adivinar cómo es el campo en los puntos que faltan, de la misma manera que podemos adivinar el trayecto de un

tren, es decir, el trazado de sus vías con sólo saber la posición del tren en las estaciones. Vamos a unir las flechas que estén más cerca con una línea, como indica la figura.



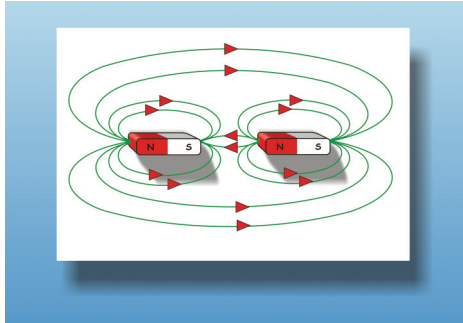
Ya sabemos cómo es el campo magnético: sigue unas líneas que salen del polo norte de nuestro imán y entran por el polo sur del mismo.

Estas líneas del campo representan la fuerza que ejercen sobre la aguja de la brújula. Por eso se llaman “líneas de campo” o “líneas de fuerza”. Para comprobarlo vamos a hacer el experimento al revés. Tomemos uno de los imanes de barra pequeños, situémoslo en el centro de una hoja de papel DIN A-3 y dibujemos directamente las líneas de campo que creemos que produce el imán en el espacio. Después coloquemos la brújula en diferentes puntos y veamos si nuestro campo corresponde a la realidad. El conjunto de líneas de campo es lo que forma el campo magnético que queríamos estudiar.

Materialización de las líneas de campos magnéticos

Podemos llegar más lejos en nuestro estudio de la geometría de un campo magnético. Podemos materializarlo realmente. Para ello vamos a emplear limaduras de hierro, pequeños trozos de “hilo” de hierro que se producen cuando se lima una pieza de metal.

Las limaduras de hierro al orientarse, parecen materializar unas líneas que van de un polo a otro. Estas

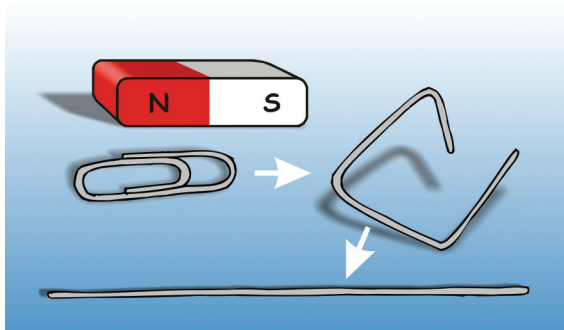


Este punto es fácil de comprobar. Para ello tomamos un imán de ferrita, de los de nevera, y después de separarlo del adorno lo golpeamos suavemente con un martillo y un destornillador, estudiamos el magnetismo de los trozos resultantes con ayuda de la brújula. Comprobaremos que todos los trozos presentan una parte (no necesariamente un extremo) que corresponde al que señala al norte y otra que corresponde al que señala al sur.

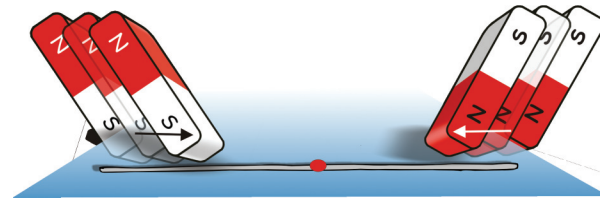
4. No se pueden separar los polos de un imán.

Podemos seguir dos caminos para estudiar este tema. El primero (el de la comprobación anterior) consiste en dividir un imán en dos mitades, con el objeto de separar sus polos. El segundo, como sabemos fabricar un imán, podemos emplear uno construido por nosotros con un clip, de la manera que se describe a continuación.

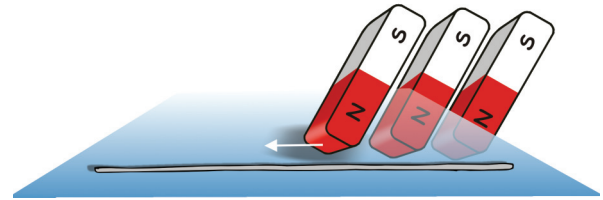
Consiste en fabricar un imán con un clip de acero o un alambre de acero blando (sin templar) del mismo diámetro, y cortarlo por la mitad para separar los polos, si es que es posible separarlos.



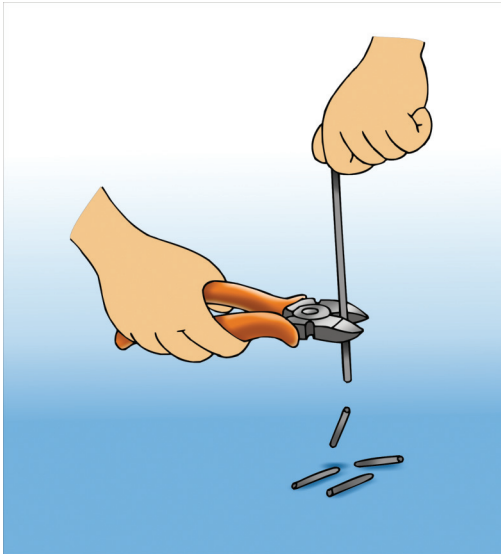
Para ello señalamos con un rotulador uno de los extremos del clip de acero enderezado, así como su punto medio. A partir de este punto medio deslizaremos repetidamente el polo norte del imán permanente hacia lo que va a ser el polo sur del nuevo imán, y el polo sur del imán permanente hacia lo que va a ser el polo norte del nuevo imán, en la forma descrita en la figura. La exposición del fundamento científico de esta operación, debida a Weiss, se presenta más adelante.



Este procedimiento es más eficiente que el normalmente utilizado desde la antigüedad, consistente en deslizar un polo, siempre el mismo, desde un extremo a otro del la pieza de acero, siempre en la misma dirección, como indica la figura.

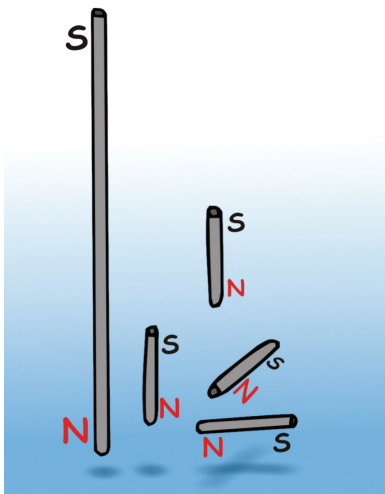


A continuación, con unos alicates de corte, dividimos el hilo imanado en dos y estudiamos con la brújula cada uno de los dos trozos.



El resultado es desconcertante...

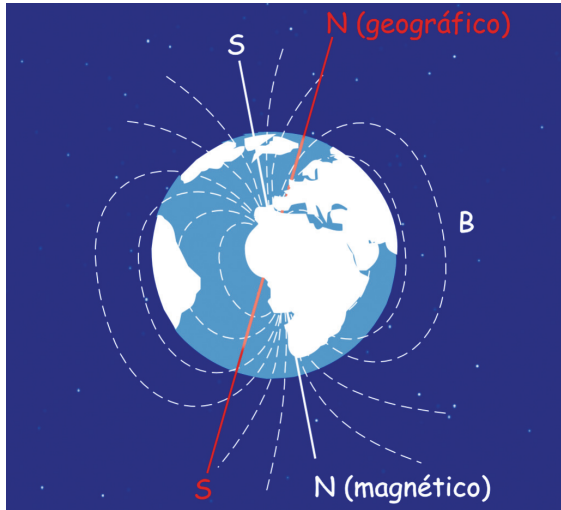
Cada una de las partes en las que hemos cortado el hilo de acero se ha convertido en un imán, con sus dos polos, por pequeña que sea su longitud. Lo cual es, como hemos dicho, verdaderamente desconcertante. Éste es un momento apropiado para definir una característica de los imanes, su momento bipolar o momento magnético. De una manera cualitativa, corresponde al producto de la fuerza de sus polos por la distancia entre ellos. De esta característica haremos uso a lo largo del libro.



Para los primeros investigadores era como si, al dividir un clavo en dos partes, se obtuvieran dos clavos completos, con su cabeza y su extremo puntiagudo. Y necesariamente tiene que indicar algún hecho importante, alguna propiedad fundamental del magnetismo. Los polos tienen el mismo comportamiento que la cara y la cruz de una moneda; por mucho que la dividamos siempre presenta una cara y una cruz, un anverso y un reverso; y cuando las monedas se apilan resulta una ordenación que sólo presenta una cara y una cruz, cualquiera que sea su número. Lo que nos dice que lo fundamental no es ni la cara ni la cruz, sino la moneda en sí. Cualquier modelo que construyamos sobre la constitución de un imán debe explicar este extraordinario resultado, pero dejaremos este problema para después de estudiar el experimento de Oersted.

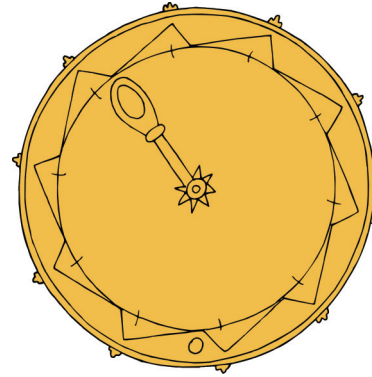
Del experimento que hemos realizado resulta que, además de las cuatro leyes anteriores, se tienen que cumplir:

5. Los polos o partes de dos imanes distintos que señalan al norte se repelen entre sí, igual que las partes que señalan al sur. Los extremos que señalan a polos distintos se atraen.
6. La fuerza que se produce entre dos imanes disminuye cuando se alejan y aumenta cuando se acercan.
7. Los imanes no atraen a todos los materiales; sólo atraen un tipo de materiales llamados materiales magnéticos.
8. La acción de los imanes atraviesa los materiales no magnéticos, como el papel o el plástico.
9. Los materiales magnéticos se convierten en imanes cuando están próximos a un imán.
10. Los polos de un imán pueden invertirse si se sitúan en el seno de un campo magnético mayor.

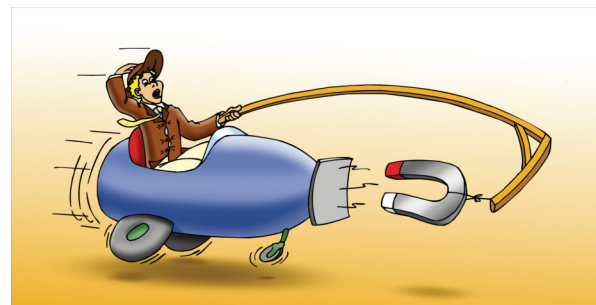


Hemos visto que algunos materiales conservan el magnetismo después de estar en contacto con un imán, es decir, presentan magnetismo remanente. Este es el caso de las agujas de las brújulas, que están hechas de acero imanado por inducción, al ser sometidas al campo de un imán. Si colocamos una de estas agujas de brújula en un campo contrario, veremos que se producirá una inversión de los polos, señalando la brújula aparentemente al revés. Esto nos proporciona un método práctico de “reparar” las brújulas que utilizan los alumnos en clase, ya que sufren muy a menudo esta inversión de polos, haciéndolas inservibles para su uso en el aula. Como hemos visto, se reparan fácilmente desarmándolas y sometiéndolas a un campo magnético en el sentido correcto.

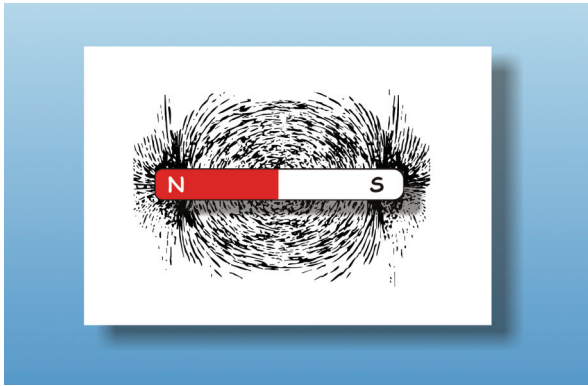
Con estos conocimientos Pedro de Maricourt da los últimos toques a su modelo: la Tierra es una esfera enorme de imán natural, con el polo sur magnético situado en las proximidades del polo norte geográfico y el polo norte magnético situado en el otro extremo del polo magnético, de manera que el eje magnético y el eje de giro no coinciden, explicándose así el fenómeno de la declinación.



En el siglo XIII se conocía la declinación magnética, pero no se tenían suficientes datos como para saber que el valor de la declinación era distinto para cada punto de la superficie de la Tierra. Por ello la hipótesis del eje magnético fijo perdurará hasta finales del siglo XV, como veremos a continuación. En la segunda parte de su epístola, menos importante que la primera, Pedro de Maricourt presenta los planos de una máquina de movimiento continuo, uno de los mitos de todas las épocas. Estas máquinas persiguen la producción de trabajo sin consumir energía, cosa imposible a la luz de las leyes de la termodinámica. La supuesta máquina de Maricourt es circular y bastante complicada, pero su fundamento y el resultado que de ella se espera es semejante al que se indica en esta caricatura.



líneas, como ya hemos dicho, se denominan líneas de fuerza y ellas señalan el campo magnético, es decir, la fuerza que se ejerce sobre las limaduras. Por convenio se imagina que salen del polo norte y se dirigen al polo sur por el exterior del imán, cerrándose por su interior, por el que van desde el polo sur al polo norte.

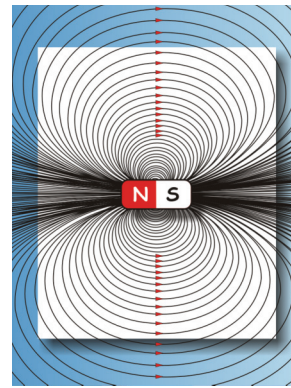


Debemos tener cuidado para que las limaduras no vayan directamente al imán, ya que es difícil quitarlas. Una vez que retiremos el imán, las limaduras se pueden recoger fácilmente para usarlas de nuevo.

Las líneas del campo magnético siguen unas reglas fijas, fáciles de observar a partir de estos experimentos. Son las siguientes:

- Siguen el camino de menor resistencia entre los polos del imán, formando un camino que se cierra por el interior del imán.
- Nunca se cruzan dos líneas.
- Todas representan la misma fuerza sobre un imán pequeño; por ejemplo, una brújula diminuta.
- La densidad de estas líneas indica la intensidad del campo magnético. Así, las líneas se separan cuando se alejan de los polos.
- Se les ha asignado una dirección arbitraria, suponiendo que salen del polo norte y entran por el polo sur del imán. En el interior del material fluyen del polo sur hacia el polo norte, cerrando así el lazo.

Éste es un experimento difícil de realizar y que requiere cierta habilidad. Comenzaremos situando un imán debajo de un plástico rígido transparente. Sobre el plástico, que debe estar lo más horizontal posible, se irán dejando caer las limaduras de hierro, de manera que al orientarse señalen las líneas de fuerza del campo magnético. El resultado es espectacular, ya que ante nuestros ojos van apareciendo las líneas de campo.



A continuación, una vez identificados los polos de la esfera magnética, aplicando el mismo método, Pedro Peregrino comprobó y enunció las leyes que obedecen los imanes permanentes:

1. Las fuerzas magnéticas, como la gravedad y las fuerzas eléctricas, actúan a distancia.
2. Todos los imanes presentan dos puntos especiales, unidos por una recta que los atraviesa. Uno de ellos señala aproximadamente al norte de la Tierra y otro señala al sur.
3. Los polos de un imán siempre aparecen a pares: uno norte y otro sur. En palabras de Pedro Peregrino, cada trozo de una piedra imán, por pequeño que sea, constituye un imán completo, con ambos polos presentes.



COLÓN Y LA DECLINACIÓN
MAGNÉTICA

En su primer viaje, Colón comprobó la variación de la declinación magnética en función de la longitud geográfica, que parece que desconocía. No obstante, en el regreso de su segundo viaje, en mayo de 1496, sí anotó cuidadosamente esta variación y la tuvo en cuenta en sus cálculos de corrección de rumbo, de manera que pudo estimar aproximadamente la longitud geográfica de su posición comparando la dirección de la estrella Polar y la de la aguja magnética.

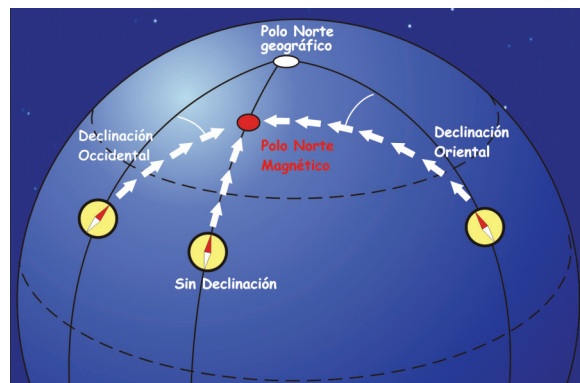


Cristóbal Colón

Como anécdotas del viaje debemos recordar la sorpresa de Colón por el cambio de declinación de la brújula.

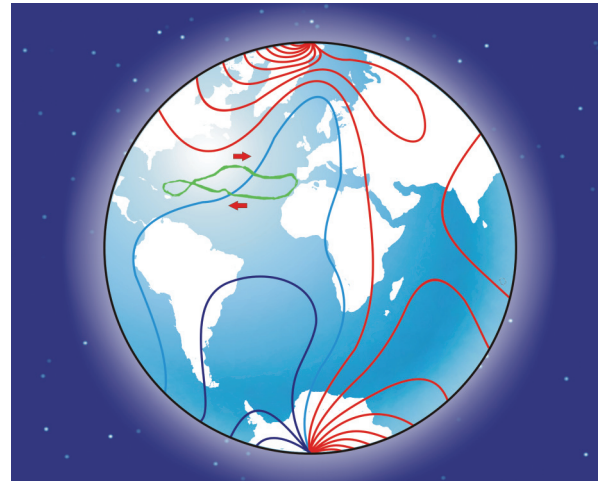
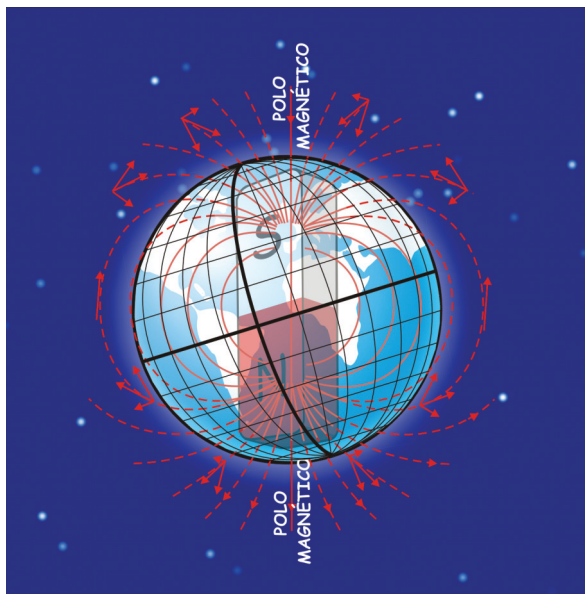
Probablemente debido a que la posición del polo norte geográfico se asociaba a la posición de la estrella polar y a que en ese momento se admitía todavía el modelo de universo inmutable (preconcepto aristotélico), Colón creía que la orientación de la brújula era consecuencia de algún tipo de acción a distancia que la estrella ejercía sobre la brújula. Pero la posición de la estrella polar no coincidía exactamente con el polo norte geográfico; en la actualidad esta desviación es del orden de un grado, pero en el siglo XV su dirección estaba desviada algo más de tres grados. Por esa razón Colón atribuyó el cambio de declinación a un movimiento de la estrella Polar. A fines de septiembre de 1492, Las Casas hace la siguiente descripción del primer viaje:

“... También de otra cosa los pilotos de los tres navíos recibieron mucho temor, sospechando algún peligro, hasta que él les dio la razón y es que las agujas noruestaban una cuarta entera en anocheciendo y en amaneciendo estaban fil con fil de la estrella. Dioles la causa de esta diferencia Cristóbal Colón diciendo que aquello causaba el movimiento de aquella estrella que llamamos Norte hace con su círculo alrededor del verdadero Norte o Polo, por manera que aquella estrella se muda o tiene un movimiento violento de Oriente a Occidente como las otras, y las agujas siempre señalan el verdadero Norte o Polo, mostrando la verdad...”



De esta explicación se deduce que Colón no debía conocer el trabajo de Pedro Peregrino o, si lo conocía, no lo tomó en consideración. Lo que había ocurrido es que la Santa María había atravesado el meridiano en el que están situados ambos polos, el magnético y el geográfico, como indica la figura anterior.

Este mapa corresponde al modelo de Tierra con polos magnéticos fijos. Con este modelo se obtienen meridianos magnéticos que son círculos máximos, como los representados en la figura.



(<http://www.phys.uu.nl/~vgent/magdec/magdec.htm>)

En realidad las líneas de declinación en el año 1500 eran las representadas en la siguiente ilustración, donde se ha representado también la ruta que siguió Colón en su primer viaje.

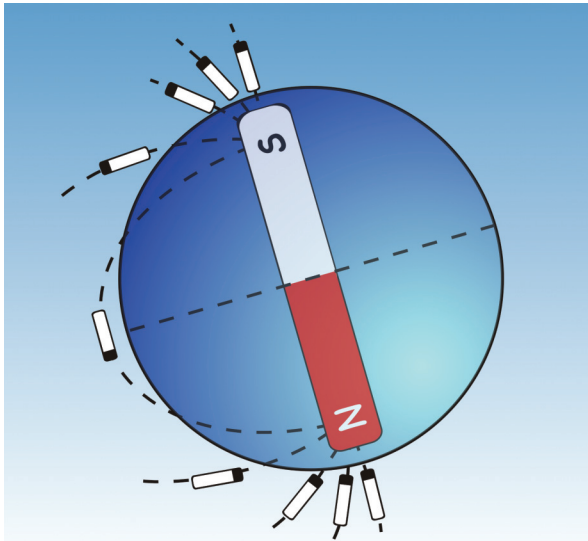
6

ROBERT NORMAN Y EL DESCUBRIMIENTO DE
LA INCLINACIÓN MAGNÉTICA

Hacia 1575, Robert Norman, un constructor de brújulas para barcos, publicó un experimento, realizado en Londres, que lo condujo al descubrimiento de la inclinación del campo magnético terrestre.

El experimento consistió en construir una aguja de hierro "magnéticamente duro" y suspenderla de un hilo por su centro de gravedad, de manera que en equilibrio formara un ángulo de 90° con la horizontal, medida con un nivel de burbuja.

A continuación imantó la aguja con ayuda de un imán natural, por el procedimiento que hemos dicho en la página 80, y la dejó en libertad en su soporte. El resultado fue que la aguja se orientó en dirección al norte magnético, pero a la vez se inclinó unos veinte grados hacia el interior de la Tierra, en vez de permanecer horizontal. Este ángulo, que forman las líneas del campo magnético terrestre con la horizontal del lugar, recibe el nombre de *inclinación magnética*. Los resultados los publicó en 1581 y fueron, sin duda, estudiados por Gilbert, que estaba ejerciendo la medicina en Londres y tenía 37 años.



Ya hemos dicho que, si todavía quedaba alguna duda sobre la localización en el universo del punto que atraía a las brújulas, con este experimento debió aclararse.

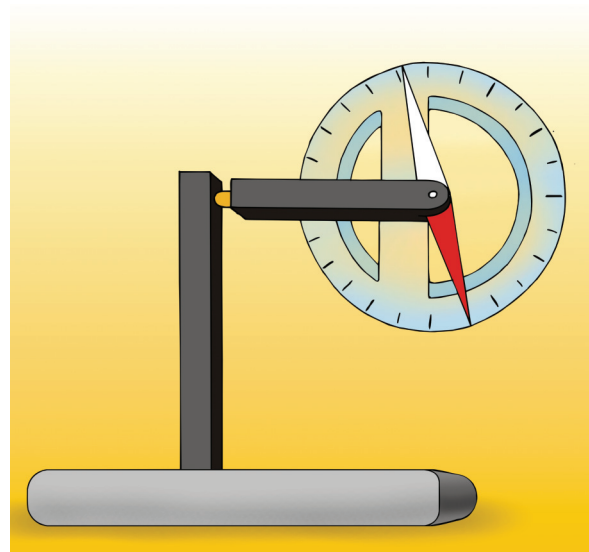
APLICACIÓN EN EL AULA

Nosotros podemos realizar este experimento empleando el modelo de Tierra que hemos construido para reproducir los experimentos de Pedro Peregrino y los pedacitos de hilo de acero que convertimos en pequeños imanes, para comprobar que no existen polos magnéticos separados, es decir, monopolos magnéticos.

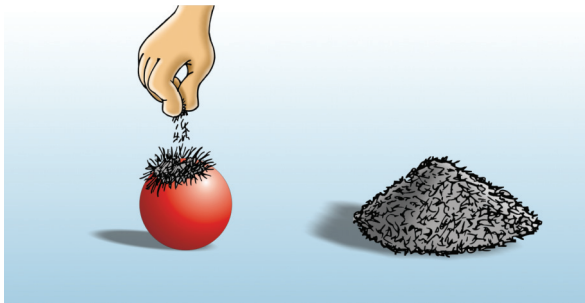


Si situamos estos pequeños imanes en distintos puntos de la esfera, veremos que se colocan formando un ángulo con su superficie, indicando la dirección de las líneas del campo magnético.

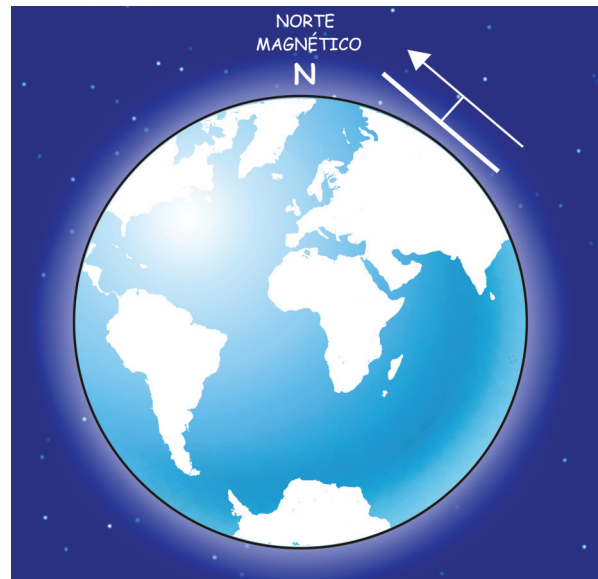
También se puede utilizar una aguja magnética montada sobre un eje fijo, como indica la figura. Con ayuda de un transportador podemos medir el ángulo de inclinación.



Probablemente lo más conveniente sea utilizar el modelo de Tierra magnética construido con plastilina, donde los trocitos de clip de acero se pueden sujetar clavándolos ligeramente en la superficie de la bola. En último caso siempre podemos repetir el experimento de la distribución de las limaduras de hierro, que materializan con claridad las líneas de fuerza.



Pero, de acuerdo con nuestro estudio, esa circunstancia sólo se da en el ecuador magnético, donde el campo magnético es paralelo a la superficie de la Tierra. En los demás lugares siempre existe una componente vertical del campo que hace que la aguja se incline, rozando con el fondo e impidiendo su correcto funcionamiento.

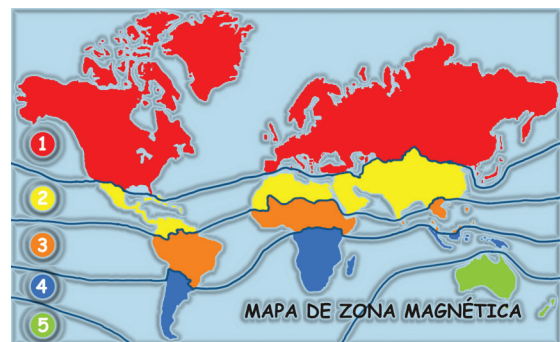


Este resultado plantea un problema práctico para los fabricantes de brújulas.

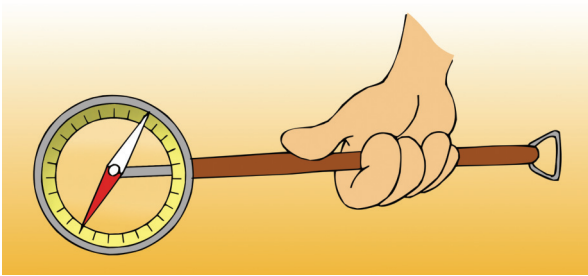
Cuando utilizamos una brújula con propósito de orientarnos, es claro que lo deseable es que la aguja se mueva en un plano horizontal, de manera que su manejo resulte fácil.



Por esa razón las brújulas se construyen añadiendo contrapesos de manera que se mantengan en un plano horizontal. Pero la inclinación es variable, por lo cual las brújulas se fabrican para una región determinada del globo. Con este propósito la Tierra se ha dividido en las cinco regiones magnéticas señaladas en la ilustración. Salvo instrumentos especiales, de muy buena calidad, las brújulas que funcionan bien en Tierra de Fuego no sirven para España.



Inmediatamente después de la publicación de Norman en la que explicaba el fenómeno, los buscadores de minas de hierro supusieron que la inclinación magnética estaría afectada por los depósitos de material magnético. Por ello aparecieron muy pronto agujas magnéticas construidas para determinar la componente vertical del campo magnético terrestre, que variaba en uno u otro sentido cuando se situaba cerca del yacimiento. Parece que estos instrumentos se manejaban sin bajarse del caballo y que sus resultados eran excelentes.



Así, en la época en que vivió Norman, el método científico comenzaba a ser conocido y utilizado, tanto por el conocimiento que permitía adquirir sobre la naturaleza, como por las muchas aplicaciones prácticas que reportaba.

Se había descubierto la existencia del genio de la Ciencia, pero todavía no se sabía cómo abrir la botella.



La llave la fabricaría Galileo Galilei.



EL INICIO DE LA
REVOLUCIÓN
CIENTÍFICA

El cambio de las ideas a lo largo de la historia, lo que marca el paradigma de la sociedad, nunca es brusco. No obstante, se suelen situar marcadores en el tiempo con el propósito de facilitar el estudio de la evolución de las sociedades. Así, se suele hacer coincidir el comienzo de la revolución científica con la publicación, en 1493, de la obra de Nicolaus Copérnico, *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. El efecto de este libro fue tan importante que, desde entonces, los cambios significativos de cualquier tipo han tomado el nombre de revoluciones, precisamente del título de la obra de Copérnico.

Cuando, en nuestro recorrido por la historia, llegamos al siglo XII, vimos que se avecinaba un cambio en el pensamiento, cambio que llegó de la mano de Averroes y de su redescubrimiento de la “empíria” como forma de adquirir conocimiento. Ahora, al comenzar el siglo XVI, de nuevo nos encontramos frente a un cambio en el pensamiento, una modificación del centro de atención de la humanidad. En vez de preocuparse por lo que anunciaba la aparición de un cometa, pasaron a preocuparse por lo que era y por qué aparecía y desaparecía. Pero para ello deberían desembarazarse del paradigma aristotélico, que ahora, con la nueva filosofía, no proporcionaba las herramientas necesarias para entender el mundo. Como veremos, las ideas preconcebidas que subyacen en el pensamiento aristotélico irán

cayendo poco a poco, con trabajo y esfuerzo; porque lo que más ha costado en el avance de nuestra historia ha sido, precisamente, luchar y vencer nuestros propios preconceptos.

Cuando Copérnico vino al mundo, el esquema cosmológico era, básicamente, el mismo que hemos descrito en el preámbulo de la revolución científica, en el siglo XII. Copérnico contribuyó a modificarlo radicalmente.



COPÉRNICO Y LA CAÍDA DE DOS GRANDES
PREJUICIOS ARISTOTÉLICOS



Copérnico

Copérnico nació en febrero de 1473 en la ciudad hanseática de Torun, en la actual Polonia, en el seno de una familia acomodada. Para situarnos en su momento histórico, diremos que, cuando nuestro personaje tenía un año de edad, se produjo en la distante España la coronación de Isabel la Católica como reina de Castilla, y faltaban nueve años para que Colón descubriese América. A los diez años murió su padre, por lo que fue a vivir con su madre y sus hermanos a casa de su tío materno Lucas Watzelrode, circunstancia que condicionó su vida. Lucas era en ese momento canónigo y decidió dedicar a su sobrino Nicolás al estudio. A continuación pasó a la universidad de Ferrara para estudiar Leyes y más tarde a la universidad de Bolonia, hasta 1501. Ese mismo año su tío, ya obispo, le consideró suficientemente formado para proponerle para una

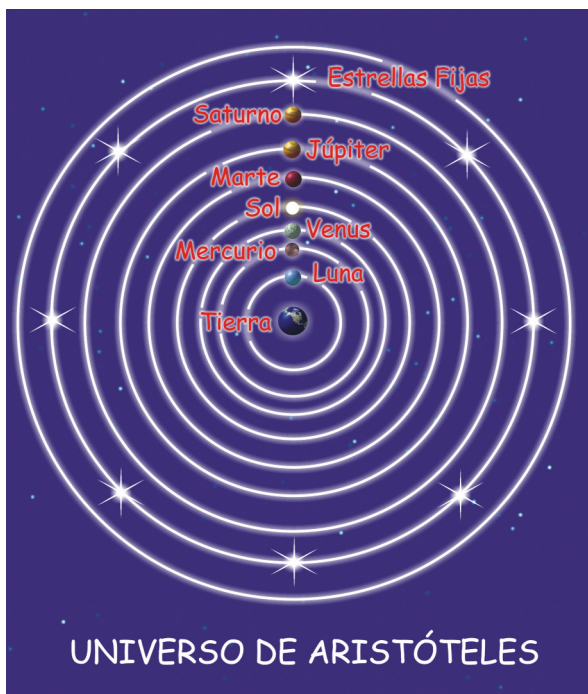
plaza de canónigo en Frauerburg, que obtuvo sin dificultad. Parece que fue en Bolonia donde Copérnico conoció las teorías heliocéntricas de Aristarco. A pesar de que sus escritos se habían perdido, gracias a unos trabajos de Aristóteles en que refuta las ideas de Aristarco, llegó a nosotros noticia de su modelo.

Hacia 1516 Copérnico edita un manuscrito en el que expone su nueva teoría: *De Hypothesibus Motuum Coelestium A Se Constitutis Commentariolus*. La obra debió extenderse a través de copias manuscritas por toda Europa, ya que durante el concilio de Letrán el obispo Pablo de Middeburgo solicita la opinión de Copérnico sobre el problema de la reforma del calendario.

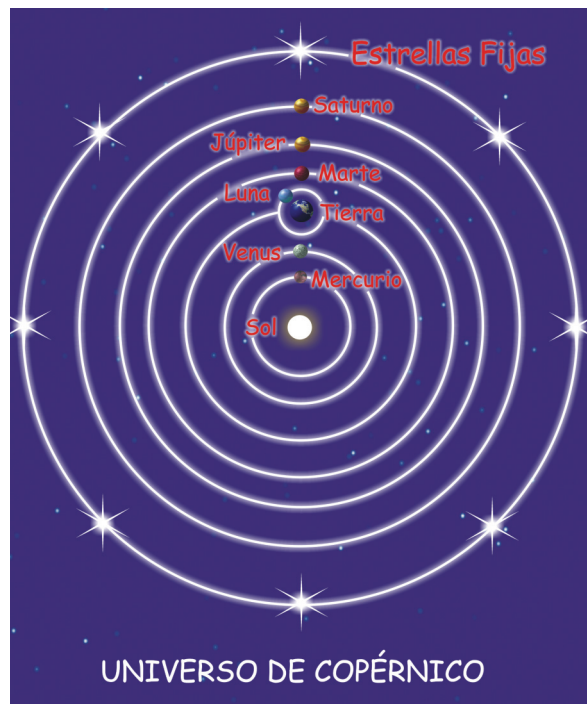
En 1543 Nicolaus Copernicus publicó su obra *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, dedicada al Papa. Copérnico murió en Fromborn, en Polonia, en 1543, muy poco tiempo después de publicar su obra.

No sabemos cuándo concibió Copérnico su idea sobre el universo. Posiblemente cuando estudiaba en Italia, donde podía disponer de observaciones astronómicas recientes y precisas. Hay que tener en cuenta que la astronomía de observación había recibido un gran impulso, debido a su importancia para la navegación sobre todo en los grandes viajes trasatlánticos que eran numerosos tras el descubrimiento de América. En su libro, *Sobre las Revoluciones de los Cuerpos Celestes*, se desechan dos grandes prejuicios que habían sido aceptados durante los últimos veinte siglos: la idea de que la Tierra era el centro del universo y la no menos importante de que se encontraba inmóvil. Pero se mantenía un tercer preconcepto que consistía en suponer que las órbitas de los cuerpos celestes eran o podían descomponerse en movimientos circulares y uniformes, ya que el círculo era la figura perfecta por excelencia.

En este esquema presentamos la versión del modelo de Ptolomeo, tal como llegó en el *Almagesto*. Obsérvese que en este modelo es Venus el planeta más cercano al Sol, y Mercurio el más cercano a la Tierra. Así mismo se puede notar la influencia de las teorías pitagóricas en el empleo del círculo como figura perfecta.



esta simplificación describió el movimiento de los cuerpos celestes (los planetas conocidos y el Sol) con sólo cuarenta y ocho círculos o epiciclos, en lugar de los ochenta necesarios para llegar a esa precisión con el modelo ptolemaico.



La forma más sencilla de entender los cambios introducidos en *De Revolutionibus* consiste en describir, en primer lugar, el proceso de demostración que se llama método, que consiste en formular el modelo mediante un número limitado de proposiciones verdaderas de las cuales se deduzcan por el empleo de la lógica los movimientos de los cuerpos celestes. Estos movimientos deducidos han de salvar las apariencias (coincidir con los hechos observados) y no contradecir los preceptos pitagóricos, según los cuales los movimientos de los cuerpos celestes han de ser circulares y uniformes.

Copérnico supuso que la Tierra giraba sobre su eje dando una vuelta al día y, simultáneamente, giraba en torno al Sol en una órbita que recorría en un año. Con

Una de las ventajas del modelo geocéntrico, si no la mayor, era explicar de forma sencilla los movimientos retrógrados de los planetas, que aquí aparecen de forma natural. Pero no queremos tratar aquí este punto, que nos apartaría de nuestro camino principal.

El modelo copernicano implica que el centro del universo no es el único que tiene la propiedad de atraer a los elementos (gravedad), sino que cada planeta tiene su propio centro gravitatorio, lo cual implica que fuera de la esfera de la Luna siguen existiendo los mismos elementos que en la Tierra, contradiciendo las reglas de Aristóteles.

Más graves son las consecuencias del giro diario de la Tierra; desconociendo los tres principios de Newton, pensaban que, al girar la Tierra, el aire quedaría retrasado produciendo un enorme viento, dada la magnitud del radio de nuestro planeta. Además, si se lanza un objeto hacia arriba, cuando cae no lo hará sobre el lugar de lanzamiento sino en un punto situado al este del inicial, ya que la superficie de la Tierra se habrá desplazado durante el tiempo en que el objeto ha permanecido en el aire. Esta aparente paradoja quedaría sin contestación hasta que Galileo, casi un siglo después, le diese cumplida contestación. Pero sin entrar en la física del problema, nuestro astrónomo acepta su modelo ya que explica los hechos y lo hace de una manera más simple que el modelo anterior, propuesto por Ptolomeo.



Queremos resaltar la importancia de la aparición y la aceptación por los astrónomos independientes del modelo geocéntrico. Con él, en cierto modo, desaparece la barrera psicológica que impedía a los científicos del medioevo rechazar las doctrinas de Galileo, que tanto trabajo había costado introducir.



GILBERT Y EL TRIUNFO DE LA
EXPERIMENTACIÓN EN LA CIENCIA



Gilbert

William Gilbert, o Gilberd, como se escribía en su época, nació en Colchester, Inglaterra, en 1544, el año siguiente al de la publicación de *De Revolutionibus*. Transcurrían los últimos años del reinado de Enrique VIII, y vivió una parte de la historia de Inglaterra especialmente azarosa. A la muerte de Enrique, en 1553, sube al trono María, segunda mujer de Felipe II, entonces heredero de la corona española.

Comenzó sus estudios en Cambridge, en el St. John's College, donde obtuvo su título de doctor en Medicina en 1563. Hacia 1580 empezó a investigar sobre mag-

netismo, estudiando y repitiendo los experimentos de los autores que le precedieron, a los que nos hemos referido en las páginas anteriores. Con la subida al trono de Isabel I, las relaciones entre España e Inglaterra se fueron deteriorando hasta llegar a la enemistad declarada. Los constantes ataques de Drake a las posesiones españolas en América y la animadversión de Isabel hacia todo lo español fueron las causas de que Felipe II, ya rey de España, concibiese la idea de atacar Inglaterra. La ejecución de la católica María Estuardo, reina de Escocia, terminó de decidir a Felipe II a enviar la mal llamada Armada Invencible contra Inglaterra, siendo vencida y en gran parte aniquilada. Tras la derrota, se abrió para Inglaterra el camino hacia la colonización de las tierras americanas, antes reservadas a España y Portugal. De hecho, el primer territorio ocupado por los ingleses se llamó Virginia, en honor a Isabel I, la Reina Virgen.



Isabel I, Reina de Inglaterra

Pero el camino hacia América era largo y el éxito de la navegación dependía casi enteramente de la brújula, por lo que el estudio del magnetismo se convirtió, como el de la astronomía, en un campo no sólo de interés científico sino también importantísimo para la navegación, el comercio y el dominio marítimo. En 1530, el astrónomo real de Carlos V propuso un sistema para la determinación de la longitud basado en relojes mecánicos, pero esta solución tardó siglo y medio en poderse llevar a la práctica dadas sus dificultades de construcción. En 1569, su alumno Mercator publicó un mapa del mundo empleando un nuevo tipo de proyección inventado por él, especialmente útil para la navegación. Era tal el interés por estos temas que en 1598 Felipe III ofreció, apenas subió al trono, un premio de mil coronas para el que resolviese el problema de la determinación de la longitud, siendo España la primera de una serie de potencias navales que establecieron premios similares. Estas circunstancias debieron de influir en Gilbert, animándole a seguir con su trabajo. Cuando, tras dieciocho años de investigación, publicó sus resultados en el año 1600, fue elegido presidente del Colegio Real de Médicos (Royal College of Physicians) y, probablemente como consecuencia, médico de Isabel I. Parece que la reina, interesada por la ciencia, asistía con frecuencia a las demostraciones de Gilbert, como apuntan algunas fuentes históricas.



Gilbert ante la reina

En 1600, Londres era una ciudad congestionada y en plena expansión, de unos 150.000 habitantes, con malas condiciones higiénicas y una permanente plaga de ratas, transmisoras de la peste bubónica. Ese año Shakespeare estrenó su *Hamlet* y *Las alegres comadres de Windsor*, a cuyas representaciones asistieron, con toda seguridad, tanto la reina como Gilbert. Cinco años más tarde Cervantes publicaría la primera parte de *El Quijote*.

En 1603 murió la reina Isabel, terminando así la dinastía Tudor. Le sucedió Jacobo I de Inglaterra, hijo de María Estuardo, a la que Isabel había condenado a muerte. Jacobo confirmó a Gilbert como médico real, pero se declaró un episodio de peste en Londres y nuestro médico murió en noviembre de ese mismo año. La peste era, para los médicos, un peligro profesional.

Pero volvamos a nuestra historia y a las aportaciones de William Gilbert al magnetismo.

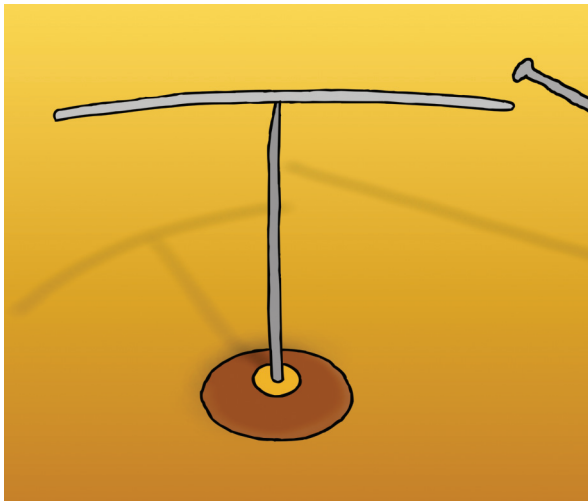
Gilbert publicó los resultados del trabajo al que nos hemos referido en 1600, como hemos dicho, en "*De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure*" (*Sobre el magnetismo, los cuerpos magnéticos y el imán de la Tierra*).

Dedicó la obra a aquéllos que buscan el conocimiento no sólo en los libros sino en las cosas mismas. Como resultado de su obra, Gilbert fue conocido como el padre del magnetismo. Cinco años después, Francis Bacon publicó su primera obra, *The Advancement of Learning*, en la que expone los principios del método científico, al que él llama simplemente *el método*: la aplicación de la inducción incompleta, en lugar de confiar en los conocimientos *a priori*, como se hacía en la filosofía escolástica medieval. En 1610 Galileo publica su primer libro importante, que no tardó en hacerle famoso: el *Sidereus Nuncius*, "*El mensajero de los astros*".

Gilbert, en su tratado, empleó por primera vez la palabra *eléctrico*, para referirse a los fenómenos de carga por frotamiento, debido a que el nombre del ámbar es

elektron en griego. También demostró la diferente naturaleza de las fuerzas eléctricas y magnéticas, por medio de un sencillo experimento que vamos a exponer a continuación, muy fácil de realizar en el aula.

El experimento consiste en fabricar un *versorium* (del latín, que puede girar) de aluminio, una especie de aguja de grandes dimensiones, parecida a la que se representa en la figura.



Al estar construido con material no magnético, era insensible a los campos producidos por los imanes. En cambio, cuando se acercaba una varilla de vidrio electrificada por frotamiento, debido a la carga inducida, giraba para seguir el movimiento de la varilla, demostrándose así la diferente naturaleza de la electricidad y el magnetismo.

APLICACIÓN EN EL AULA

Hagamos como Gilbert

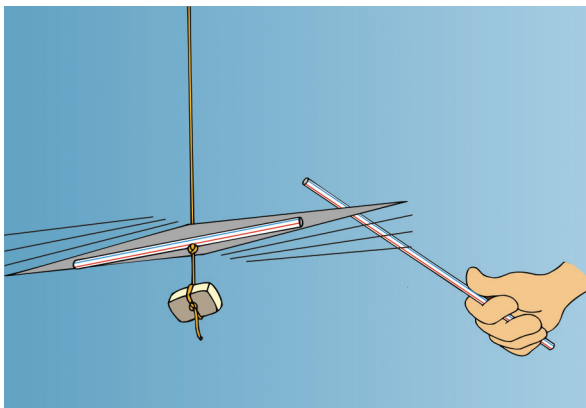
Nosotros vamos a repetir este experimento, cuya trascendencia no se oculta al lector, de manera que pueda ser realizada por los alumnos en el aula.

Nuestro *versorium* consistirá en un trozo de papel de aluminio un poco grueso al que se ha dado la forma de una aguja de brújula de grandes dimensiones (entre diez y quince centímetros de longitud y unos tres centímetros de anchura). A continuación, se atraviesa nuestro *versorium* con un hilo y se cuelga de un soporte adecuado. El hilo debe tener un nudo para evitar que el *versorium* se deslice hacia abajo, y llevar colgado algún objeto de poco peso con el fin de mantener al hilo vertical y con una cierta tensión. Puede darse rigidez al conjunto pegando un trozo de pajita de refresco en forma de travesaño, en la parte inferior de la hoja de aluminio.

Una vez que el *versorium* se ha colgado de un soporte, se toca con un cable conectado a tierra, a fin de eliminar cualquier carga eléctrica que pudiera haber adquirido, y se deja que llegue a su posición de reposo. A continuación tomamos un imán, lo descargamos tocándolo igualmente con el cable de tierra y lo acercamos al *versorium*. Como es natural, al ser el aluminio un material no magnético, el *versorium* permanecerá en reposo.



A continuación se electriza una pajita de refresco frotándola con una servilleta de papel, en la forma descrita al tratar de la electricidad estática, y se acerca a uno de los extremos del *versorium*, teniendo cuidado de que no entren en contacto. Veremos que el *versorium* sigue los movimientos de la pajita hasta que ésta pierda la carga, quedando así demostrado que ambos fenómenos, eléctricos y magnéticos, son de diferente naturaleza.



Algunas de las diferencias que Gilbert cita entre la electricidad y el magnetismo son las siguientes:

- La magnetita no necesita ningún tipo de estímulo para que se despierten sus propiedades de atracción, en tanto que el vidrio y el ámbar requieren que se los frote enérgicamente para que muestren propiedades eléctricas.
- La cuerpos electrizados pueden atraer muchos tipos de materiales, en tanto que los imanes sólo atraen objetos de hierro (en esa época no se conocía el cobalto ni el níquel).
- La situación que adquiere un cuerpo cuando se electriza se pierde al cabo de un tiempo corto; en cambio un imán mantiene sus características un tiempo indefinido.
- Los imanes presentan mayor fuerza de atracción en sus polos que en otros puntos, en tanto que los objetos electrizados atraen a los objetos pequeños con igual intensidad por toda la superficie.

- La humedad dificulta los fenómenos eléctricos, que se facilitan calentando suavemente los objetos que se van a electrizar, cosa que no ocurre con los fenómenos magnéticos.

Pero Gilbert no siempre acierta en sus observaciones. Por ejemplo dice que...

- *Los imanes pueden transmitir su poder al hierro, en tanto que el ámbar no* (lo que supone la imposibilidad de la electrización por contacto y la conducción eléctrica).
- *Los imanes se repelen unos a otros, en tanto que los cuerpos electrizados no se repelen* (lo que indica que no había experimentado con dos trocitos de ámbar electrizados).

Él creía igualmente que tanto los efectos eléctricos como los de los imanes se transmitían por efluvios, emanaciones materiales que iban desde el imán al hierro y que eran las responsables de las fuerzas magnéticas. Este modelo implica que el magnetismo no debe manifestarse en el vacío. Este es otro prejuicio aristotélico, que supone que todas las acciones son de naturaleza mecánica, y que las fuerzas se transmiten solamente por contacto. Pero la respuesta a este problema no llegaría hasta cincuenta años más tarde, cuando Otto von Guericke inventa una bomba de vacío suficientemente perfeccionada para comprobar que los fenómenos eléctricos y magnéticos tienen lugar en el vacío, acabando definitivamente con la teoría de los efluvios y con el prejuicio de las acciones mecánicas como únicas existentes. Pero el camino de la ciencia es largo, y todo eso lo irán descubriendo otros investigadores.

Gilbert describe también la forma de imanar una pieza de acero, frotándola con un imán natural, en la forma que hemos indicado anteriormente. También descubrió que si se mantiene una barra de hierro durante largo tiempo en la dirección de un meridiano magnético (es decir, en la dirección que marca la brújula), la barra queda imanada débilmente. Si, además, se golpea con

un martillo, se consigue que se imane en menos tiempo y que su imanación sea mayor.

Al hilo de este descubrimiento no queremos pasar por alto la historia del *imán de Groenlandia*, protagonizada por William Scoresby muchos años más tarde. En 1819 su barco quedó atrapado en un océano helado, cerca de Groenlandia. Tras realizar varias medidas de inclinación de la brújula y viendo que en ese lugar las líneas de campo incidían casi verticalmente en la superficie de la Tierra, llegó a la conclusión de que estaba cerca del polo magnético. Como el campo de un imán es mayor cerca de sus polos, decidió sacar provecho de ello; tomó una barra de hierro, la colocó en posición vertical y la golpeó durante largo tiempo, de acuerdo con las indicaciones de Gilbert. Así consiguió un imán lo suficientemente potente como para levantar un objeto de hierro de cinco kilos. Se le llamó *imán de Groenlandia*, y todavía se conserva en el museo de Whitby.

Asimismo, Gilbert descubrió otro fenómeno importante. Describió cómo, cuando se calienta un imán por encima de un cierto punto, su magnetismo desaparece. Como consecuencia de ambos descubrimientos, fabricó imanes calentando varillas y barras de acero y manteniéndolas en la dirección del campo magnético terrestre durante el proceso de enfriamiento, como indica la figura.



El fenómeno de la desaparición de la imanación al aumentar la temperatura fue estudiado cuantitativamente por Pierre Curie (1859-1906). En la actualidad, la temperatura a la que un material ferromagnético pierde su comportamiento ferromagnético y se convierte en un material paramagnético (que explicaremos más adelante) recibe el nombre de temperatura de Curie. Esta temperatura depende del tipo de material. Para el hierro es del orden de los 800 grados celsius, que puede alcanzarse con un mechero de gas. La temperatura de Curie para el níquel es de unos 600 grados, en el límite de la temperatura de una vela, pero alcanzable con un mechero de alcohol. Para un imán de tierras raras, en cambio, la temperatura de Curie es del orden de los 300 grados, fácilmente alcanzable con la llama de una vela, razón por la que lo hemos elegido para nuestra demostración.

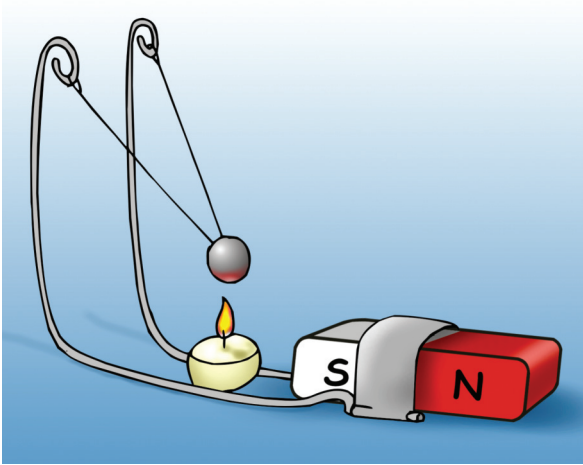
APLICACIÓN EN EL AULA

Hagamos el experimento

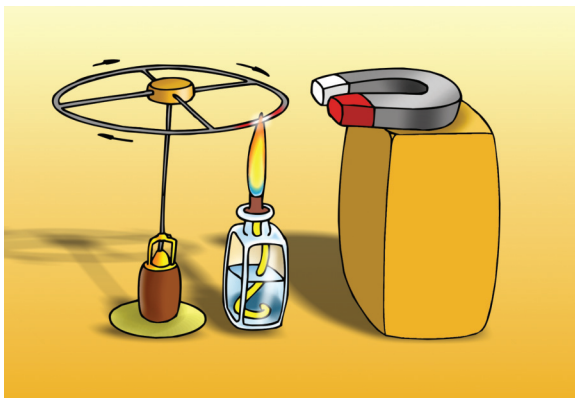
El experimento es muy sencillo de realizar. Basta con sujetar un "imán de tierras raras" con un hilo de cobre muy fino. Se puede obtener a partir de un cable de conducción eléctrica formado por muchos hilos finos de los que se utilizan para alumbrado. A continuación se sujeta como si fuese la lenteja de un péndulo, de forma que pueda ser atraído por otro imán situado a una distancia fija, como indica la figura. Debajo de nuestro imán se sitúa una vela o un mechero de alcohol, de manera que la llama lo caliente. Cuando el imán alcance la temperatura de Curie, el material del que está hecho dejará de ser ferromagnético, no será atraído por el imán fijo y se comportará como un peso colgado de un hilo. En su nueva posición



el imán oscilante se enfriará; cuando su temperatura alcance un valor inferior a la temperatura de Curie recuperará su naturaleza ferromagnética y volverá a ser atraído por el imán fijo, repitiéndose el ciclo. Este dispositivo constituye, como habrá descubierto el lector, una máquina térmica, semejante en sus principios de funcionamiento a una máquina de vapor, obteniéndose de la llama la energía necesaria para su funcionamiento.



Existen otros muchos motores térmicos basados en la transición de Curie, algunos de ellos especialmente ingeniosos. Una máquina térmica especialmente sencilla que produce un movimiento circular se puede construir fácilmente a partir de una rueda de alambre de níquel o hierro, como indica la figura. La explicación detallada de su funcionamiento se deja a la curiosidad del agudo lector.



Otro de los experimentos famosos de Gilbert consistió en construir un imán esférico tallando un imán natural, a semejanza de la esfera que describió Pedro Peregrino para repetir sus experimentos. Le llamó *terrella*, pequeña Tierra, afirmándose en la idea de que la fuerza que gobierna el funcionamiento de las brújulas se debe al *Magno Magnete Tellure*, el gran imán que es la propia Tierra.

Como era de esperar, una aguja magnética reproducía sobre la *terrella* los efectos generales de la inclinación magnética, que correspondían a la estructura magnética de un imán, aunque los valores no tenían la exactitud deseada. Gilbert, preocupado por el problema de la determinación de la latitud, propuso la utilización de la inclinación magnética para resolver el problema, y con objeto de medir con más precisión ese ángulo, inventó un aparato especialmente diseñado para ello, representado en una de las figuras de *De Magnete* que hemos reproducido. Se construye utilizando una aguja de acero sin magnetizar, que atraviesa un corcho o cualquier material de menor densidad que el agua. El conjunto se lastra de tal manera que cuando se sumerge en un recipiente con agua, su peso sea igual al empuje, encontrándose en equilibrio, sin fuerzas verticales. La aguja de acero se sitúa de tal manera que cuando se sumerge, las dos partes que sobresalen del corcho estén en equilibrio, como los brazos de una balanza. A continuación se imana la aguja de acero por inducción, utilizando un imán natural, y se repite la experiencia. Como ya sabemos, la aguja se colocará siguiendo las líneas del campo magnético terrestre, señalando hacia el interior de la Tierra con un ángulo que corresponde al valor de la inclinación magnética.

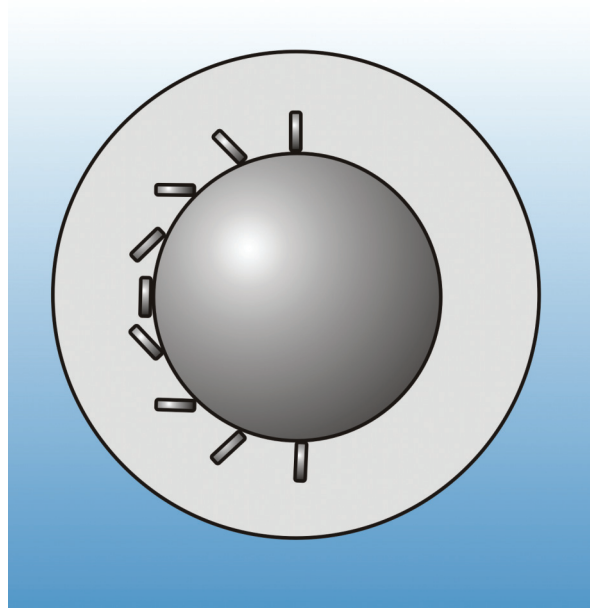


Gilbert con su *terrella*

Pero el caso de la declinación magnética era más complicado. Además había cambiado completamente desde el año 1269 en que Pedro de Maricourt escribió su epístola y ahora se sabía que la declinación magnética no seguía un patrón de meridianos magnéticos, como había observado Pedro Peregrino en su modelo. En vez de eso, las líneas de declinación dibujaban un mapa caprichoso, que no seguía las pautas rígidas que se deducían de la esfera magnética. La figura ilustra el mapa magnético que corresponde al año 1500, sólo parcialmente conocido en su época.

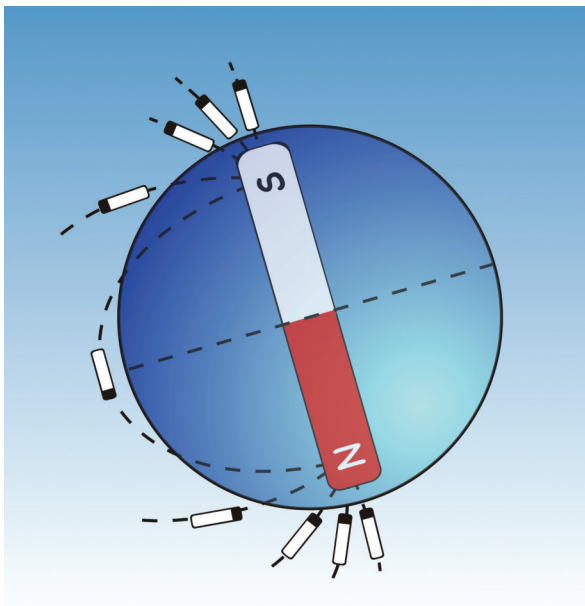


Era evidente que el modelo no podía ser tan simple como la *terrella*. Como la única razón para inclinar el eje magnético era la declinación, y el fenómeno no quedaba explicado, desechó esta característica. Gilbert reelaboró el modelo, alineando los polos del imán con el eje de la Tierra y conjeturando que la declinación se debía a la distribución no homogénea de los continentes. La idea misma de norte magnético como lugar al que se orientan la brújulas, dejó de tener sentido.



Asimismo abandonó la idea de la Tierra homogénea y perfectamente esférica, de manera que fuese la distribución de masas (magnéticas) lo que produjese la declinación. Gilbert, una vez formulada la hipótesis, la comprobaba experimentalmente, de acuerdo con el método.

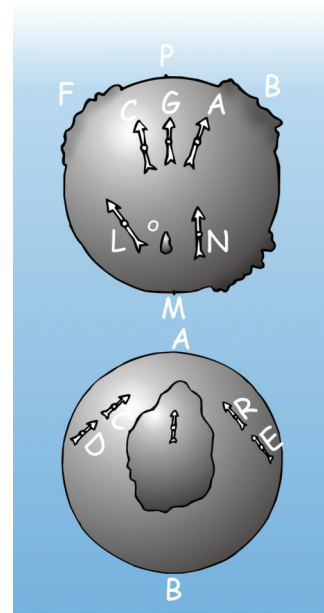
Gilbert toma una esfera de imán natural que presente imperfecciones en su esfericidad debidas a la corrosión, de manera que la parte que falta corresponda al hueco del océano Atlántico, y comprueba que la aguja imantada se desvía hacia las partes de la terrella con mayor masa de magnetita, dando así por explicada la distribución de la declinación magnética. Este modelo lleva a la conclusión de que *la declinación no debe modificarse en ningún punto de la superficie de la Tierra, a menos que se modifique la distribución de los continentes o se produzca un hundimiento como el que tuvo lugar cuando desapareció la Atlántida, como nos refiere Platón. Por ello, la declinación debe ser inmutable.* Esto explicaba correctamente la observación de Colón. Al llegar a un cierto punto, en la mitad del océano, la declinación cambió de este a oeste señalando hacia América en lugar de desviarse hacia Europa. De acuerdo con el nuevo modelo, el cambio de la desviación se debía al efecto de la atracción del nuevo continente (aunque él creía que se trataba de las Indias).



APLICACIÓN EN EL AULA

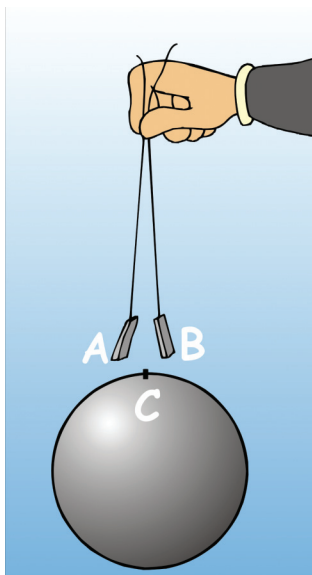
Construyamos nuestra terrella

Nosotros podemos materializar el modelo de la nueva *terrella* de Gilbert empleando imanes bipolares de nevera, o trozos más pequeños obtenidos rompiendo estos imanes, que podemos fijar con cinta adhesiva en los lugares apropiados, de manera que obtengamos la distribución correcta. Si se tiene habilidad suficiente se pueden pintar los continentes sobre la superficie de la esfera y reproducir las líneas de los meridianos, colocando imanes pequeños en los lugares apropiados. Pero no se debe poner demasiado interés en este trabajo ya que, como se verá más adelante, no es ésta la razón correcta. Nuestro planeta no está formado por material magnético y, por lo tanto, no es ésta la razón por la que las brújulas se orientan.

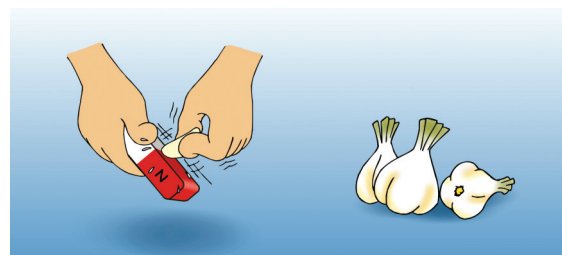


Otro de los experimentos que publica Gilbert en su libro es el que lleva a cabo con su magnetoscopio, parecido al electroscopio de dos hojas, inventado por Abraham Bennet en 1786 y del que se dará noticia más adelante.

El instrumento que describe Gilbert es muy difícil de llevar al aula, ya que su manejo es complicado. Nosotros proponemos un aparato equivalente, fácil de construir y manejar y, sobre todo, de funcionamiento fácilmente comprensible. Consta de dos clips de hierro, unidos por sus extremos mediante una pieza que los abraza y permita que se separen y se unan como las páginas de un libro. Cuando se acerca un polo de un imán permanente a la parte que hace el papel de bisagra, los clips se separan. La razón es que ambos clips se magnetizan por inducción, adquiriendo la misma polaridad y, por lo tanto, repeliéndose. El ángulo de separación de ambos clips, cuando se sitúan verticalmente de manera que su peso tienda a cerrarlos, da una idea cuantitativa de la magnitud del campo magnético.



Otro de los experimentos que se hicieron famosos fue el del imán y el ajo. La idea, que ya hemos expuesto, de que los efluvios que emanaban del ajo interferían con los que provenían del polo terrestre o de la estrella polar y orientaban la brújula, procedente nada menos que de Plutarco, cuyas palabras cita Ptolomeo en su obra *Tetrabiblos* y desde entonces es aceptada como verdad evidente, es decir, se convierte en un prejuicio. Nadie, hasta Gilbert, puso a prueba idea tan peregrina sin más que preparar una serie de agujas imantadas, aproximadamente de las mismas características, y frotar la mitad de ellas con ajo, llevando las demás a un lugar suficientemente alejado para que dichas emanaciones no las alcanzaran. Al cabo de unas cuantas aplicaciones, Gilbert comparó el poder de atracción y de orientación de los dos conjuntos, encontrándolos exactamente iguales. Así, de una manera tan sencilla, se esfumó un prejuicio que había nacido hacía casi quince siglos.



También realizó experimentos para comprobar los poderes curativos de los imanes, en los que estaba muy interesado por su profesión de médico. La conclusión a la que llega es también negativa, pues *los imanes hacen el mismo efecto que un casco de hierro o un gorro de acero*.

PARA SABER MÁS

Johann Kepler, uno de los gigantes sobre cuyos hombros se alzó Newton (1643-1727)



Johann Kepler

Lo que sabemos de la niñez e infancia de Kepler se lo debemos a él mismo, pues lo relata en un documento que elabora con propósitos astrológicos cuando ya es un hombre adulto. Hijo de padre luterano y madre católica, nació prematuramente el 27 de diciembre de 1571, circunstancia a la que achaca su mala salud.

Al poco tiempo del nacimiento de Kepler su padre dejó la casa para servir, como soldado mercenario, en el ejército de los Países Bajos del Duque de Alba. Su madre siguió a su marido algún tiempo después, dejando a Kepler en manos de sus abuelos. Siempre perseguido por la mala suerte, Kepler pasó la viruela, que le dejó una miopía muy pronunciada e incapacidad de fundir las imágenes de ambos ojos, secuelas de las que nunca se recuperaría. Tras pasar la enfermedad, asistió a la escuela de Leonberg, donde se había establecido

un plan de educación general. Allí, debido tanto a su naturaleza enfermiza, que le impedía dedicarse a labores más duras, como a su brillante inteligencia, tanto su abuelo como sus maestros decidieron que su futuro estaba, sin duda, en el estudio.

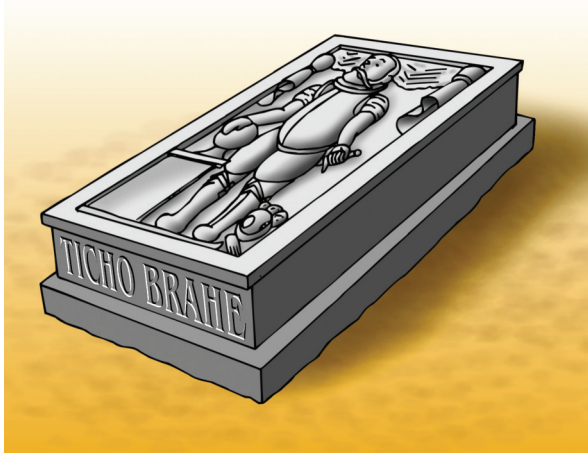
Durante esta época volvieron sus padres al hogar. Parece que, con los ahorros de la vida de soldado del padre, se establecieron por su cuenta, abriendo una especie de fonda u hostel, pero el negocio no prosperó. Entretanto Kepler, decidido a seguir su formación, debe ingresar en un seminario. Allí sigue el esquema clásico de *Tribium* y *Quadribium*, que le permite ingresar en la universidad de Tubinga. Durante su estancia en la universidad, su padre se enrola de nuevo como mercenario. Su madre, para sobrevivir, hubo de dedicarse a la elaboración de productos culinarios, profesión que debió ejercer en los tiempos en que tenían la fonda. Parece que se hizo experta en infusiones de plantas medicinales y ungüentos curativos, actividad que debía ser peligrosa en aquella época, como veremos a su debido tiempo.

Entretanto Kepler siguió sus estudios, sobresaliendo especialmente en teología y en astronomía. En teología, el problema estaba centrado en la elección entre las tres opciones de las religiones cristianas, la católica, la luterana y la calvinista. En astronomía, la cuestión estaba en elegir entre los dos grandes sistemas que describían el mundo, el ptolemaico y el copernicano, como lo plantearía en 1623 Galileo, siete años mayor que Kepler. La búsqueda de soluciones a estos problemas conformaron la historia de los siglos XVI al XVIII.

En 1599 Kepler se incorpora al equipo de trabajo de Tycho Brahe (1546-1601). Tycho había inventado unos magníficos instrumentos astronómicos con los que realizó las observaciones más precisas que se podían hacer a ojo desnudo sobre la posición de los planetas, y estaba por entonces en Praga como astrónomo real

en la corte de Rodolfo III. Kepler tenía entonces 29 años y Brahe 53.

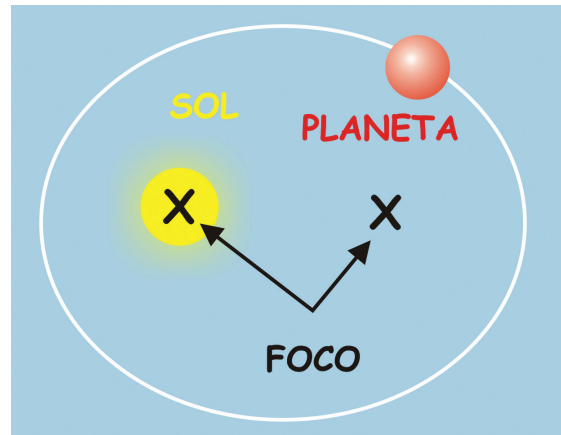
Kepler no era un buen observador, debido probablemente a sus problemas de visión. Pero tras la muerte de Tycho, ocurrida en 1601, pudo disponer de sus datos. Y se dedicó con empeño a ajustar la órbita de Marte con la precisión de los datos que poseía, pero con la mente lastrada por los prejuicios de la órbita circular y el movimiento uniforme. Como todos los prejuicios, aparecían en su época como verdades evidentes. Finalmente, tras innumerables esfuerzos, Kepler publicó *Astronomía Nova*, en 1609, donde enunció sus dos primeras leyes.



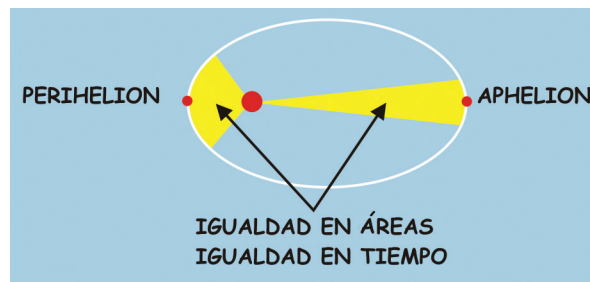
Tumba de Tycho Brahe en Praga

La primera ley de Kepler dice simplemente que las órbitas de los planetas son elipses, y que el Sol se encuentra situado en uno de los focos.

Para enunciar esta ley Kepler tuvo que liberarse del preconcepto de las órbitas circulares, que estaba vigente en la cosmología griega desde el tiempo de Pitágoras.



La segunda ley de Kepler se refiere a la forma en que los planetas se mueven por su órbita elíptica: lo hacen de manera que para tiempos iguales las áreas que barren la línea que une el centro del Sol y el centro del planeta son también iguales, independientemente del lugar de la órbita en el que se mueva el planeta. Con esta ley cae el último de los prejuicios aristotélicos: el que se refiere a los movimientos uniformes de los planetas. La revolución científica está en marcha.



En 1619, tras un trabajo de 18 años, Kepler logra ajustar los datos de las paralajes de diversos planetas, obtenidos por Tycho, descubriendo la 3ª ley que relaciona los periodos de los planetas con sus distancias medias al Sol. La ley es clara y su enunciado no puede ser más simple: el cuadrado del periodo es proporcional al cubo de la distancia.

$$\frac{P_1^2}{P_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}$$

Podemos decir que Kepler no fue feliz. Su madre, Katherine, una anciana de 73 años y aspecto siniestro, cambió su oficio de cocinera por el de curandera, aprovechando sus conocimientos culinarios. En aquella época este oficio no se miraba con buenos ojos y fue acusada de brujería y condenada a la hoguera. Kepler tuvo que dejar su trabajo y ejercer de abogado defensor, gracias a lo cual pudo salir Katherine de la prisión aunque, debido a la dureza del año de prisión que soportó, murió seis meses después. Kepler murió pobre, tras un penoso viaje que realizó con la intención de cobrar el salario que se le debía desde hacía meses. Fue enterrado en Ratisbona el 16 de noviembre de 1630 con el epitafio que él mismo escribió:

"Medí los cielos; ahora mido las sombras; al cielo miraba mi mente; ahora, en la tierra descansa mi cuerpo".

Galileo Galilei y el destronamiento de Aristóteles



Galileo

Cuando Galileo nació, en 1564, la revolución científica estaba a punto. En 1572, cuando contaba ocho años, ocurrió un fenómeno extraordinario; apareció en el cielo una estrella supernova, cerca de Casiopea. Ocurrió la noche del 11 de noviembre y Tycho la vio más brillante que ninguna otra estrella. Su brillo era comparable al de Venus y llegó a ser visible durante el día. Estupefacto, Tycho se puso a estudiarla de inmediato y la observó durante más de un año, notando que, a diferencia de los planetas, la estrella nueva no se movía con respecto a las otras estrellas como lo hacían los planetas, concluyendo que estaba situada más allá de la esfera de la Luna y de la de los planetas, en la esfera de las estrellas fijas. Se la conoce como la supernova de Tycho Brahe.

En 1604 apareció de nuevo una supernova, esta vez en la vía Láctea, al pie de la constelación de Ophiuchus. Esta estrella es conocida como supernova de Kepler, ya que fue este astrónomo el que la estudió y describió en su libro *De Stella nova in pede Serpentarii* (Sobre la estrella nueva en el pie de Serpentario). De acuerdo con sus medidas, esta estrella se encontraba también, en la esfera de las estrellas fijas.

La aparición de ambas supernovas contradecía el preconcepto aristotélico de la inmutabilidad de los cielos, desapareciendo cualquier razón filosófica para rechazar el modelo de Copérnico. El paso definitivo en esta dirección lo dio Galileo Galilei con su gran obra de exposición de la cosmología copernicana *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano*; en esta obra, escrita en italiano en vez de latín, con intención claramente divulgadora, ridiculiza los puntos de vista aristotélicos defendidos por uno de los personajes, Simplicio, que se comparan con los de la nueva astronomía expuestos por Salviati, y a los que el buen juicio de Sagredo da la razón. Aunque la obra había sido editada con el *imprimatur*, en 1632 se le acusó de herejía y se inició contra él un proceso el 12 de abril de 1633 que terminó con la condena a prisión perpetua. Debido a que había renunciado a defenderse y a su retractación formal, la pena fue suavizada, permitiéndole que se recluyera en su casa de Arcetri, cercana al convento de clausura donde se encontraba su hija Virginia desde 1616 bajo el nombre de sor Maria Celeste.

Galileo murió en la madrugada del 8 al 9 de enero de 1642, acompañado únicamente por dos de sus discípulos, Vincenzo Viviani y Evangelista Torricelli, a los que se les había permitido convivir con él los últimos años.

Pero tan importante como sus resultados experimentales fue su nueva concepción de las ciencias físicas, para las que preconiza el empleo de las matemáticas como hasta entonces sólo se había hecho con la astronomía. Está magníficamente expresado en un fragmento de una carta del mismo Galileo en respuesta a Sarsi, defensor del aristotelismo.

“En Sarsi discierno la creencia de que en el discurso filosófico se debe defender la opinión de un autor célebre, como si nuestras mentes tuvieran que mantenerse estériles y yermas si no están en consonancia con alguien más. Tal vez piense que la filosofía es un libro

de ficción escrito por algún autor, como la Iliada. Bien, Sarsi, las cosas no son así. La Filosofía está escrita en ese gran libro del universo, que está continuamente abierto ante nosotros para que lo observemos. Pero el libro no puede comprenderse sin que antes aprendamos el lenguaje y alfabeto en que está compuesto. Está escrito en el lenguaje de las matemáticas y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin las cuales es humanamente imposible entender una sola de sus palabras. Sin ese lenguaje, navegamos en un oscuro laberinto”.

La importancia de este trabajo está en que marca el comienzo del estudio cuantitativo de la física, con el empleo de fórmulas en vez de descripciones con palabras.

Pero para entender la importancia del empleo del lenguaje matemático en la ciencia, debemos comprender lo que es una fórmula. Para mayor sencillez, tomaremos un caso concreto, la definición de la velocidad, como ejemplo.

$$V = L/T$$

En esta expresión V es el símbolo de la velocidad, L es el símbolo de la longitud recorrida y T es el símbolo del tiempo que ha tardado en recorrer la longitud L.

La primera aclaración se refiere a su naturaleza. Una fórmula es una ecuación que relaciona cantidades obtenidas como resultado de una medida. Para aplicar la fórmula, el símbolo L se sustituye por el resultado obtenido al medir la longitud recorrida, resultado que está expresado por un número y una unidad. Así, si queremos medir la velocidad media que desarrolla una persona cuando va de su casa a la escuela, medimos en primer lugar la distancia que separa ambos lugares. La medida se realiza con ayuda de un metro y cuyo resultado es, por ejemplo, 800 metros. El tiempo que se tarda en el recorrido se mide con un reloj y el resultado se expresa, como hemos dicho, por medio de un

número y el nombre de la unidad empleada, 800 segundos, por ejemplo. Sustituidas estas medidas en la fórmula, obtenemos:

$V = 800 \text{ metros} / 800 \text{ segundos} = 1 \text{ metro/segundo}$, que leemos en lenguaje coloquial en la forma de *un metro por segundo*.

La importancia del uso de ecuaciones consiste en que permite despejar la variable que se desee, obteniéndose todas las relaciones entre variables que sean posibles. Si nos desplazamos a una velocidad de 2 metros /segundo, en 10 segundos recorreremos una longitud de

$L = V \cdot T = 2 \text{ metros/segundo} \times 10 \text{ segundos} = 20 \text{ metros}$.

Lo que constituye una enorme ventaja sobre el lenguaje normal, es decir, el que empleamos normalmente para comunicarnos.

Con Galileo, el genio del desarrollo científico había salido de la botella. Nadie, hasta ahora, ha vuelto a encerrarlo.





HENRY GELLIBRAND Y LA VARIACIÓN DE LA
DECLINACIÓN MAGNÉTICA



El modelo de Gilbert de magnetismo terrestre cumplía las condiciones requeridas por el *método*, pero su vigencia fue efímera. En 1634 Henry Gellibrand, profesor de Astronomía del Gresham College, observó que el ángulo entre el norte geográfico y la dirección señalada por las brújulas en Londres cambiaba lentamente con el paso del tiempo, pero de manera observable. En principio, debido a la idea todavía reinante de que las cosas no cambiaban, la idea pareció absurda a los investigadores de la época. Pero la verdad estaba allí, y para verla no hacía falta otra cosa que realizar medidas. Y el resultado fue el que anunció Gellibrand: la declinación magnética variaba con el tiempo.

La importancia práctica que este descubrimiento tuvo para la navegación es evidente. Como es sabido, los barcos navegaban “*a estima*” en esa época y las correcciones al rumbo que se podían hacer por métodos astronómicos requerían observaciones difíciles de ejecutar en un barco pequeño agitado por el mar. Por ello se hizo necesario poner al día los valores de las declinaciones magnéticas actualizándolos cada pocos años, de manera que los capitanes de barco dispusieran de valores precisos con que realizar sus travesías.

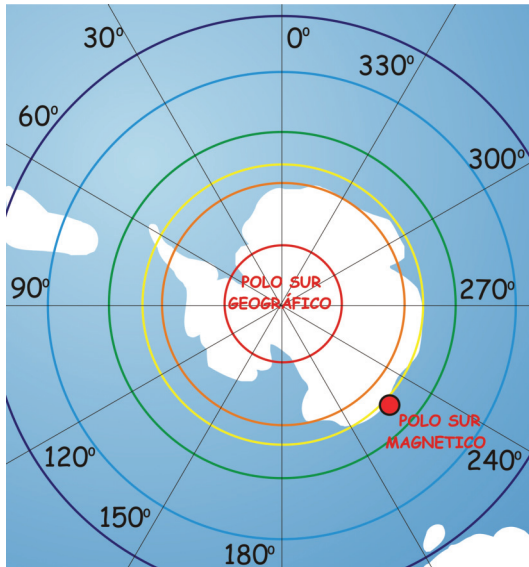
Pero por grande que fuese la importancia práctica del descubrimiento, la teórica no fue menor. Para los conocimientos de aquella época, en la que los únicos imanes conocidos eran los imanes permanentes, esta

* Nota. Este método de navegación consiste en calcular la posición a partir de la situación del punto de partida y de la trayectoria seguida por el barco, aproximada por una línea quebrada. La longitud de cada uno de los segmentos se obtiene por una estimación de su orientación en el mapa, de la velocidad media del buque y del tiempo que tarda en recorrerlo. En la época a la que nos referimos la orientación se determinaba por medio de la brújula, el tiempo por medio de relojes de arena; la velocidad podía estimarse lanzando un trozo de madera al agua por la proa y midiendo el tiempo que tardaba en cruzar la línea de popa.

variación era inexplicable. ¿Cómo era posible que cambiase la posición del polo magnético en un planeta sólido como la Tierra? Era, pues, necesario modificar el modelo de la *terrella* de Gilbert, de manera que explicase las nuevas observaciones. Como vemos, en la historia de la ciencia apenas se resuelve un problema aparece otro aún más interesante, convirtiéndola en una aventura interminable, una aventura del pensamiento. La idea que había estado latente en todos los modelos de Tierra invariable se demostraba falsa, porque no se podía achacar esta variación a catástrofes que hiciesen desaparecer continentes, como la Atlántida que citaba Gilbert, pues el fenómeno se hacía patente en unos pocos años sin que nuestro planeta se hubiese modificado; de hecho un cambio de un grado en quince años no es nada extraordinario.

El nuevo descubrimiento planteaba muchas preguntas. La primera era la relativa a la existencia de un eje magnético inclinado respecto al eje de giro, como se establecía en el modelo de Tierra de Pedro Peregrino, o coincidente con éste, como en la *terrella* de Gilbert, antigua cuestión aún sin resolver.

La única manera de salir de dudas era determinar en qué puntos el campo magnético se hacía vertical, y calcular sus coordenadas geográficas. Pero, dado que los polos magnéticos se encontraban cerca de los geográficos, se requería llevar a cabo expediciones largas y peligrosas. Tras muchos intentos heroicos, James Ross alcanzó el polo norte magnético en 1831, situado a unos 1.600 kilómetros del geográfico, en Canadá a unos 78° Norte y 104° Oeste. En el siglo siguiente, en 1904, Roald Amundsen determinó de nuevo la situación del polo, a unos 50 kilómetros del punto en el que estaba situado cuando Ross fijó su posición. El Polo Sur magnético fue localizado en 1908 por el explorador Ernest H. Shackleton, a unos 86° Sur y 65° Este.



Para que el lector tenga una idea de la magnitud de la variación de los polos, en la figura se indica la trayectoria seguida por el Polo Norte magnético desde el año 1600.

Así pues, los polos magnéticos existían, aunque las líneas de declinación magnética no eran, ni mucho menos, meridianos. Esto indicaba que el campo magnético terrestre se debía a una causa más complicada que un simple imán permanente y fijo, lo que requería nuevos modelos que explicasen este fenómeno. Veamos ahora las soluciones que se propusieron.



4

HALLEY Y SU MODELO DE TIERRA
CON CAPAS CONCÉNTRICAS



Halley

Edmond Halley nació en noviembre de 1656 cerca de Londres, cuando Newton tenía trece años, y murió en enero de 1743 en Greenwich, ciudad de donde toma el nombre el meridiano origen de nuestras latitudes. Estudió en Oxford y fue asistente del secretario de la Real Sociedad desde 1685 hasta 1696, profesor de Geometría en Oxford y astrónomo real desde 1720 hasta su muerte. Halley, contemporáneo y amigo de Newton, es famoso por sus estudios sobre la periodicidad de la aparición de los cometas; pero no sólo se dedicó a la astronomía, sino que también realizó importantes estudios sobre el magnetismo terrestre.

Halley modificó el modelo de Gilbert, que postulaba una *terrella* formada por una sola pieza, introduciendo una serie de capas magnéticas concéntricas situadas en torno a un núcleo central. Estas capas podían moverse independientemente, produciendo así una variación del campo magnético resultante que sería la suma de los campos producidos por cada una de las capas. Aunque este modelo no corresponde a la realidad, tiene una enorme importancia ya que destruye el prejuicio de la Tierra homogénea e inmutable que sub-

yace en la visión heredada de los filósofos griegos y admitida por Aristóteles.

Pero, independientemente de las razones del cambio de la declinación magnética, su valor era un dato fundamental para la marina. Por esa razón, el Almirantazgo británico encargó a Halley la elaboración de un mapa magnético del Atlántico y de sus costas. Para ello le proporcionó un buque, el *Paramore*, en el que llegó cerca de la Antártida, realizando su labor tras un sinnúmero de contratiempos.

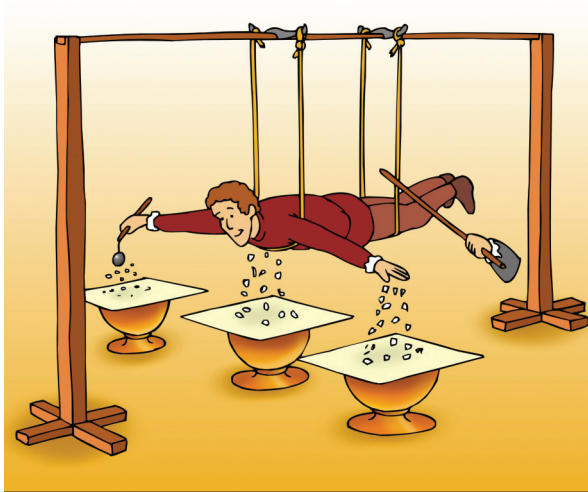


LA ELECTRICIDAD EN
LA EDAD MODERNA



ANTECEDENTES

A partir de Gilbert puede decirse que el estudio de la electricidad adquiere entidad propia siguiendo, hasta 1820, un camino independiente del magnetismo, camino verdaderamente apasionante, como veremos a continuación. En un principio la carga eléctrica de la que se podía disponer se encontraba en los objetos que se electrizaraban por frotamiento y no se conocía su naturaleza ni apenas sus propiedades. Pero muy pronto el trabajo de los investigadores fue desvelando sus características.



Experimento de Grey

Hacia 1725 Stephen Gray descubrió que la electricidad podía transmitirse por unos materiales, en tanto que otros no permitían su paso, descubriendo así la existencia de conductores y aislantes.

En 1733 Charles Du Fay comunicó a la Academia Francesa un descubrimiento crucial, la existencia de dos clases de electricidad. Las llamó vítrea y resinosa, en referencia a la que adquirían el vidrio y el ámbar (que es una resina fósil), cuando se frotaban con un paño de seda o algodón. En nuestro lenguaje moderno

ambas clases de carga se denominan positiva (la vítrea) y negativa (la resinosa).

Muy pronto se inventaron aparatos, que ahora llamamos condensadores, capaces de almacenar la carga producida en otros objetos; en 1746 Musschenbroeck inventó la botella de Leyden (nombre de la universidad donde se construyó por primera vez), capaz de acumular carga y producir elevadas tensiones eléctricas y uno de los instrumentos científicos más famosos de la historia. Algunos de los investigadores que la utilizaron, apenas inventada, recibieron descargas tan fuertes que casi acababan con sus vidas, haciéndose evidente que la electricidad tenía efectos sobre los seres vivos. Uno de los experimentos más famosos, en relación con este tema, fue el realizado por el abad Nollet con la intención de medir la velocidad con la que se transmitía la electricidad.

El experimento se realizó en París, en la primavera de 1746, en presencia del rey. Se organizó una cadena de doscientos monjes con las manos unidas, formando un círculo abierto. El abad descargó la botella de Leyden en la mano del monje que se encontraba en uno de los extremos con el propósito de contar el tiempo que tardaba el monje del otro extremo en notar la descarga,



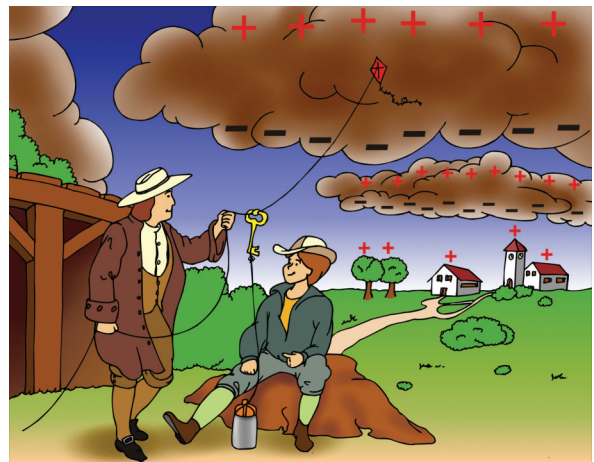
pero, para su sorpresa, los doscientos monjes saltaron simultáneamente. La velocidad de transmisión, que Du Fay creyó infinita, era demasiado elevada para poder apreciarse por ese método.

El siguiente investigador que aparece en nuestra historia es Benjamín Franklin, ejemplo de lo que era una persona ilustrada. Defendió el principio de que el pago de impuestos da derecho a la representación política. Este principio, que entonces resultaba revolucionario, inspiró la Declaración de la Independencia del 4 de julio de 1776, que lleva su firma. Pero la razón por la que Franklin aparece en nuestro relato es de índole científica. Contrariamente a Du Fay, Franklin defendía la existencia de un solo fluido eléctrico, que al pasar de un cuerpo a otro producía un exceso o defecto de este fluido, siendo ésta la causa de la electrización de los objetos. Debido al gran prestigio de este investigador, su modelo fue adoptado de forma casi universal, y es la razón de nuestra nomenclatura actual. Los cuerpos que tienen menos cantidad del fluido de Franklin tienen una carga *menos* y tienen una carga *más* los que tienen más cantidad de fluido. Casi inmediatamente se comenzaron a utilizar los signos + y – como forma de escritura abreviada, lo que condujo a los nombres de positivo y negativo que en la actualidad utilizamos.



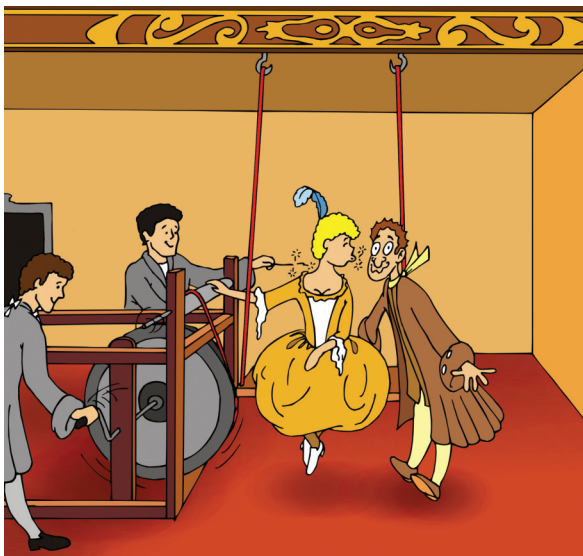
Benjamín Franklin

Una de las aportaciones de más trascendencia de Franklin fue la demostración, con su famoso y peligrosísimo experimento de la cometa, que las nubes están cargadas de electricidad. Como puede verse en la ilustración, un día no muy nublado del verano de 1752, Franklin hizo elevarse una cometa hasta la parte baja de las nubes que, en nuestro lenguaje actual, estaba cargada negativamente, sujetando con sus manos un gran carrete de hilo fabricado con un buen aislante eléctrico, probablemente madera seca. El hilo de la cometa estaba unido a una llave de grandes proporciones situada a una corta distancia (del orden de un centímetro) de una varilla de hierro enterrada en la tierra. Como era de esperar, la nube negra en la que había desaparecido la cometa comenzó a producir una fina lluvia que mojó el hilo haciéndolo conductor, con lo cual parte de la carga de la nube fue conducida a lo largo del hilo hasta la llave, aumentando así su tensión eléctrica. Cuando ésta llegó a un valor suficientemente elevado (del orden de los 10.000 voltios) comenzaron a producirse chispas entre la llave y la varilla, quedando demostrado que las nubes estaban cargadas eléctricamente y que, lógicamente, el rayo no era otra cosa que una enorme chispa eléctrica.



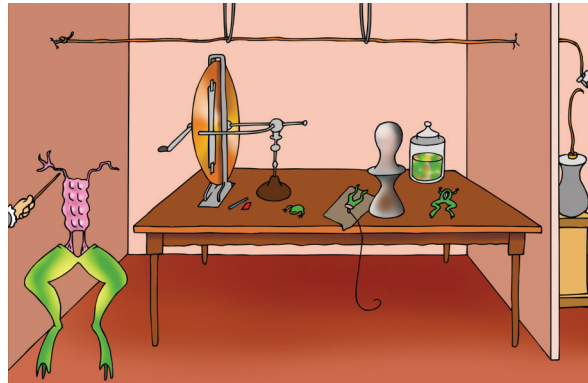
Como no habrá pasado inadvertido para el agudo lector, en ningún momento se produjo la descarga de un rayo a través del hilo, ya que esto habría producido la muerte instantánea de nuestro insigne investigador. Este experimento inspiró a Franklin su invento más conocido y más utilizado, el pararrayos, que encontramos en la mayoría de edificios e iglesias como un permanente homenaje a su inventor.

Mientras esto sucedía en el ámbito científico, en las ferias comenzaron a aparecer atracciones en las que la gente pagaba para sentir los efectos de la electricidad. Entre las más famosas se encontraba la del beso eléctrico en la que una joven, convenientemente aislada, era electrificada con ayuda de una máquina de frotamiento. Los asistentes que deseasen recibir su bautismo eléctrico pasaban al lado de la joven y recibían un beso en la mejilla, a la vez que una ligera descarga.



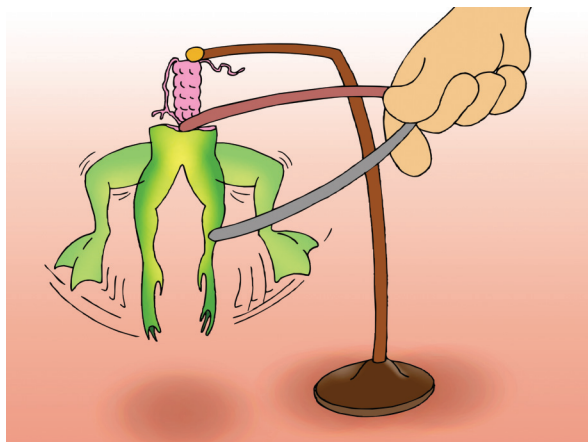
Era evidente que el paso de la electricidad producía movimientos involuntarios en los seres vivos. Pero pronto los investigadores se dieron cuenta que también producía movimientos en los cuerpos muertos. Luigi Galvani, profesor de la universidad de Bolonia, realizó a partir de 1780 una serie de experimentos en los que

producía contracciones en patas de rana muerta, al poner en contacto una botella de Leyden o una máquina generadora de electricidad con el músculo o con el nervio del animal.



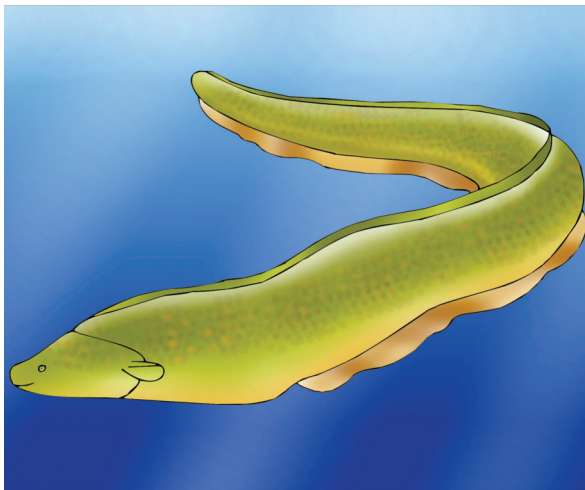
Laboratorio de Galvani

Aunque Galvani se limitó a estudiar este fenómeno en animales, otros investigadores (entre los que destacaron los médicos ingleses) lo estudiaron en cuerpos humanos, en los que produjo los mismos efectos. Así surgió la idea de que la electricidad podía estar íntimamente relacionada con los misterios de la vida y la muerte, dando lugar a historias espeluznantes sobre cuerpos reconstruidos que cobraban vida por medio de descargas eléctricas. La más famosa de ellas es, sin duda, la del *Frankenstein* que Mary Shelley publicó en 1818, en la que el monstruo comienza a vivir mediante una descarga eléctrica obtenida de un rayo.



Pero hemos ido demasiado lejos en nuestro relato y debemos retroceder dieciocho años para recuperar el hilo de nuestra historia.

Galvani no se limitó a producir contracciones musculares, e inició en 1786 una serie de experimentos sistemáticos en su laboratorio, demostrando que no es necesario emplear ningún tipo de generador eléctrico exterior para que se contraigan los músculos. Esta contracción se produce formando un circuito eléctrico con dos varillas de metales distintos (cobre y acero en su caso), unidas por un extremo y colocadas de forma que el extremo de una de ellas esté en contacto con el nervio, y el extremo de la otra con el músculo. Inmediatamente relacionó este descubrimiento con la producción de electricidad de algunos animales, como la anguila eléctrica que es capaz de producir descargas importantes y llegó a la conclusión de que la electricidad se generaba en el músculo del animal, siendo las varillas metálicas simples conductores que servían para llevarla al exterior.

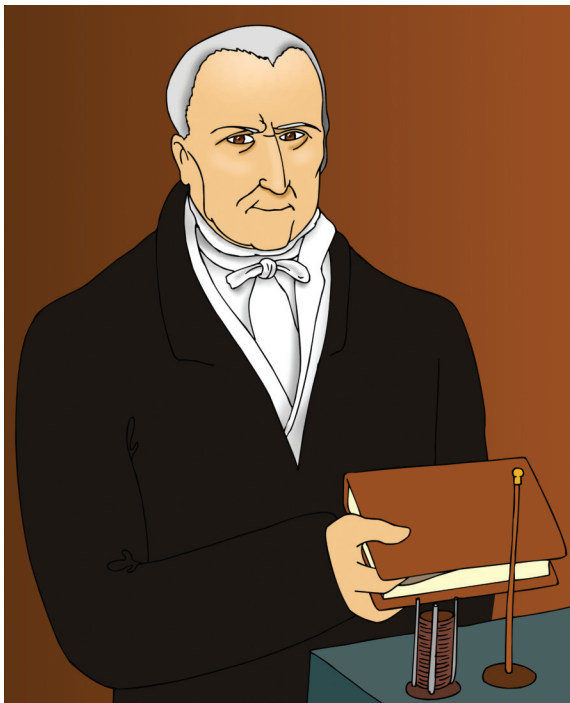




ALEJANDRO VOLTA

Pero no todos los investigadores estaban de acuerdo con la explicación de Galvani. Alejandro Volta, profesor de física de la Universidad de Pavía, pensó que los músculos no jugaban ningún papel en la producción de electricidad. Tras innumerables experimentos en los que sustituyó el tejido animal por otros componentes, en 1800 descubrió que las dos varillas de Galvani producían igualmente electricidad si se sumergían en una solución de sal común en agua, e igual ocurría con otros pares de metales, aunque la tensión generada dependía de la naturaleza de esos metales. Inmediatamente construyó un aparato consistente en una serie de rodajas de zinc y cobre (del orden de dos docenas), entre las que intercaló otra rodaja de papel secante empapado en agua de sal. Volta apiló el conjunto de rodajas y lo sujetó con unas tablas, formando la primera pila eléctrica de la historia.

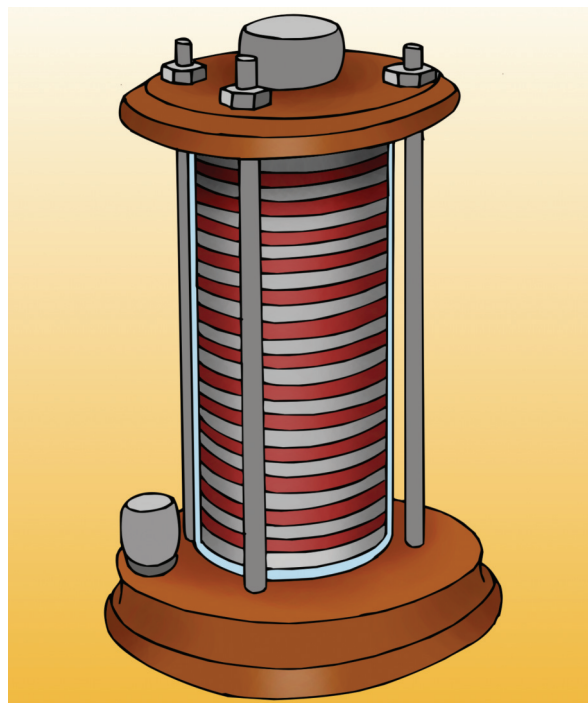
De esta manera el siglo XVIII terminó con un invento sensacional, la pila de Volta. Ese mismo año Goya acababa el cuadro de la familia de Carlos IV.



Alejandro Volta

Volta fue uno de los científicos que más fama alcanzó en vida. Napoleón lo nombró conde, recibió la Legión de Honor francesa y fue socio honorario de la Royal Society. Pero el premio mayor lo recibió de la comunidad científica que puso su nombre a la unidad de diferencia de potencial: el voltio. Es probablemente el nombre de un científico más repetido en cualquier parte del mundo y cualquier idioma. Cuando compramos pilas, bombillas o cualquier aparato eléctrico indicamos la tensión a la que trabajan, que se expresa en voltios, y la unidad de energía en física atómica es el electrón-voltio.

Hasta entonces la única fuente eléctrica con que se contaba era la botella de Leyden, en la que la carga era muy limitada y su paso por un conductor producía una corriente demasiado débil y de muy corta duración para que se pudiese emplear en estudios sistemáticos de laboratorio. Pero la nueva pila permitía disponer de corrientes importantes durante periodos de tiempo suficientemente largos como para realizar estudios sis-



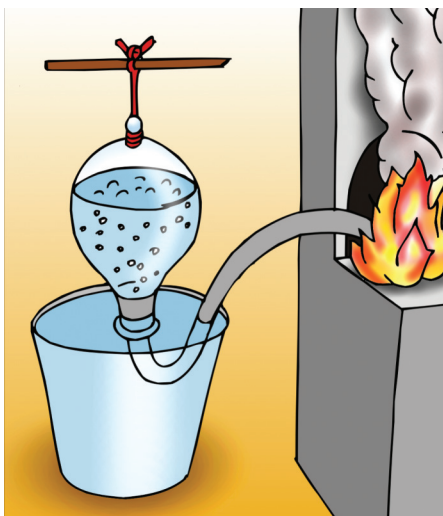
temáticos en el laboratorio, permitiendo observar los efectos que ésta producía. La pila de Volta fue rápidamente perfeccionada y ha dado lugar a las que utilizamos en los relojes, radios, teléfonos móviles y todo tipo de aparatos eléctricos portátiles. Veinte años más tarde, gracias a estas pilas, la electricidad y el magnetismo que Gilbert había separado, se unirán de nuevo durante una clase de un profesor de universidad, Hans Christian Oersted.



OERSTED Y EL ELECTROMAGNETISMO

Estamos en 1820. El mundo científico está inmerso en lo que podríamos llamar el paradigma de los fluidos, desarrollado en el último siglo y cuyo fin está próximo. Permítasenos, con el fin de situarnos en ese momento histórico, describir brevemente la historia que lo precede.

Desde finales del siglo XVIII se aceptaba la existencia del flogisto, debida a George Stahl (1660-1734), médico alemán que resucitó una idea de Aristóteles incorporándola al pensamiento científico de la época. Recibía el nombre de flogisto (de la palabra griega *flogistós*, inflamable) la capacidad de ser combustible. Esta capacidad se perdía durante el proceso de la combustión y se podía recuperar por el contacto con materiales que lo contuviesen, como el carbón, la madera u otros combustibles. Sobre esta idea Stahl construyó un modelo que permitía explicar las reacciones químicas y los procesos de intercambio de calor. De acuerdo con este modelo cuando algo ardía, su parte combustible, el flogisto, pasaba al aire. Otros procesos, como la oxidación de los metales, eran análogos a la combustión y se producían también con pérdida de flogisto. La madera y sustancias orgánicas obtenían su flogisto del Sol, por lo que formaban combustibles caloríficos.



Esta situación cambió cuando el químico británico, reverendo Joseph Priestley, utilizó un método inventado por Cavendish, recogió y estudió casi una docena de gases nuevos. El descubrimiento más importante de Priestley fue el oxígeno; pronto se dio cuenta de que este gas, componente del aire ordinario, era el responsable de la combustión y de la respiración animal. Pero, sumergido en el paradigma de su época, no rompió con el preconceito del flogisto y supuso que las sustancias combustibles ardían enérgicamente y los metales formaban escorias con más facilidad en oxígeno porque este gas no contenía flogisto. Por tanto, el gas aceptaba el flogisto presente en el combustible o el metal más fácilmente que el aire ordinario que ya contenía parte de flogisto. A este nuevo gas lo llamó 'aire desflogistizado' y defendió su teoría hasta el final de sus días. Sin embargo, no todos los químicos estaban contentos con el modelo del flogisto. A Lavoisier, por ejemplo, le preocupaba el hecho de que los metales ganaban peso cuando se oxidaban, cuando se suponía que estaban perdiendo flogisto.



Priestley

En 1774 Priestley visitó París y le comentó a Lavoisier su descubrimiento del aire desflogistizado. Lavoisier entendió rápidamente el significado de esta sustancia, dando la explicación correcta; la combustión era una combinación con el oxígeno.



Lavoisier

El mismo Lavoisier propuso una alternativa con la teoría del calórico, introduciendo un nuevo fluido, el calórico, que en su *Traité Élémentaire de Chimie* figuraba (junto con la luz) como unos de los elementos químicos. Supuso que el calórico era un fluido elástico, una sustancia que no se podía ni crear ni destruir, que pasaba de los cuerpos calientes a los fríos, hasta igualar sus temperaturas. Este modelo se utilizó para estudiar y explicar adecuadamente un buen número de fenómenos durante el primer desarrollo de la termodinámica. El calórico gozó de su existencia en el platónico mundo de las ideas científicas hasta que el físico inglés James Prescott Joule, en la década de 1830, demostró que el calor era una forma de energía. Así se explicó, por fin, el enigma descubierto por Benjamín Thompson, que unos años antes se dio cuenta de que se podía producir calor por medio de fricción, como ocurre al perforar los cilindros de acero en la fabrica-

ción de cañones. Era evidente que se podía generar tanto calor como quisiera a partir de procesos de rozamiento y fricción. Pero estamos en 1820, y el calórico formaba todavía parte de los elementos químicos.

La electricidad también estaba constituida por dos fluidos, el vítreo y el resinoso, que pasaban de un cuerpo a otro cuando se electrizaban o se ponían en contacto. Estos fluidos podían almacenarse en frascos convenientemente preparados al efecto, como la botella de Leyden, para disponer de ellos en el momento apropiado. El magnetismo, como la electricidad, se debía a la existencia de dos fluidos magnéticos que se repelían y se atraían, pero de distinta naturaleza y propiedades.

La luz, como había demostrado Huygens, tenía naturaleza ondulatoria. Pero las ondas, a diferencia de las partículas, no se propagan por el vacío; necesitan un medio material, como una cuerda o el aire de la atmósfera, para poder existir. Como era evidente que, a los ojos de los habitantes de la Tierra, la luz llegaba proveniente del Sol y de las estrellas, tenía que existir algún medio material que llenase todo el espacio, por el que se propagasen las ondas luminosas. Este medio misterioso, cuya presencia no se manifestaba por ningún otro proceso, recibió el nombre de *éter lumínico*, y se definía como otro fluido de características casi mágicas.

Así pues, desaparecido rápidamente el calórico, en la imaginación de los investigadores seguían existiendo el flogisto, los dos fluidos eléctricos, los dos magnéticos y el éter lumínico, aparentemente sin ninguna relación entre ellos. Esta situación no hacía, ni mucho menos, felices a los científicos. Como siempre ha ocurrido en ciencia, sentían la necesidad de simplificar sus modelos, disminuyendo el número de campos en que la física estaba dividida.

Es difícil saber cómo ocurrió el descubrimiento, pero contamos con una carta que Christopher Hansteen, alumno de Oersted, envió a Faraday en diciembre de

1857, en la que aporta información sobre cómo pudo suceder. La hemos elegido porque ilustra la variedad de maneras en que puede realizarse un descubrimiento, que aumenta el limitado y rígido método científico que Francis Bacon enunció en el siglo XVII. Esta forma tiene un nombre propio; los investigadores lo llaman *serendipia*, en clara referencia al cuento *Tres Princesas de Serendip*, de *Las Mil y Una Noches* en el que las princesas, tanto por su sagacidad como por su buena suerte, realizaban descubrimientos en temas que no coincidían exactamente con lo que iban buscando. La ciencia está llena de ejemplos de serendipia y uno de los más famosos y afortunados es, sin duda, el descubrimiento de la penicilina por Fleming.

Hans Christian Oersted nació en 1777 en Rudkjoebing, y fue el primogénito de la familia del farmacéutico de la villa. Un año antes se había firmado la Declaración de Independencia de los Estados Unidos y ese mismo año Coulomb, experimentando con la balanza de torsión, descubrió las leyes de atracción y repulsión entre fuerzas eléctricas.



Oersted

Oersted estaba convencido que las personas cultas e ilustradas eran mejores ciudadanos y, en consecuencia, dedicó muchos esfuerzos a la divulgación científica. Por esa razón fundó una sociedad para divulgar las ciencias de la naturaleza, para despertar la curiosidad, el espíritu crítico y el amor por el conocimiento.

Fue amigo personal de su tocayo Hans Christian Andersen, otra de las grandes glorias nacionales de Dinamarca, al que dijo que sus cuentos lo harían inmortal. Cuando Andersen murió legó sus manuscritos a Matilde, la hija menor de Oersted.

Durante su vida tuvo lugar la Revolución Francesa y en España reinaron Carlos III, Carlos IV, José Bonaparte, Fernando VII e Isabel II. Fueron años de luchas sociales en los que, siguiendo el ejemplo de Estados Unidos, consiguieron la independencia muchas naciones sudamericanas. Se puede decir que durante su vida se produjo un cambio profundo en la sociedad al que él, con sus descubrimientos, contribuyó de manera importante. Murió en 1851, en Copenhague.

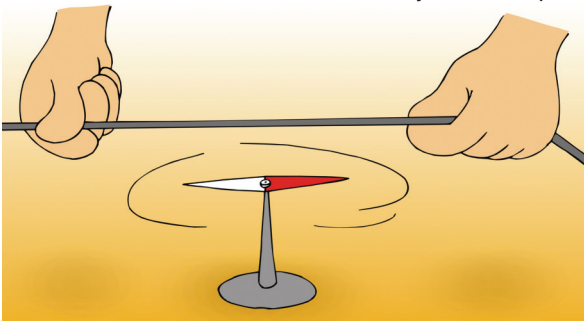
Hans Christian Oersted era profesor de la universidad de Copenhague. Para terminar el curso 1819-1820 preparó, a finales de mayo, una clase especial. Su objetivo era el de mostrar a sus alumnos las conexiones, al menos aparentes, que existían entre los diferentes fluidos admitidos en física, para lo cual realizó delante de ellos algunos experimentos de cátedra que en esa época revestían una gran novedad. Les habló de fenómenos que relacionaban la electricidad con el magnetismo (aunque ninguno se había podido reproducir en el laboratorio), como la desmagnetización de la brújula de los barcos cuando caían rayos cerca, o la imanación de los clavos de hierro que se encontraban en los tejados de las iglesias, cerca de los pararrayos. Les explicó que, a pesar de todo, no se había encontrado ningún procedimiento de relacionar los dos tipos de fluidos, y para demostrárselo acercó una pila de Volta a una brújula y conectó uno de sus polos a la aguja imanada, sin que nada ocurriese.



Oersted en clase

A continuación dejó sobre el mostrador de la cátedra la pila de Volta y unió sus polos con un fino hilo de platino de gran longitud, estableciendo así una corriente eléctrica a lo largo del conductor. Acto seguido hizo pasar a sus alumnos por su mesa para que tocaran el hilo con sus manos y comprobasen que su temperatura había aumentado. Así les demostró que la corriente eléctrica produce calor cuando pasa por un hilo conductor, como ocurre en las estufas, calentadores y cocinas eléctricas que todos tenemos en nuestras casas, lo cual implicaba una conexión entre el fluido calórico y los fluidos eléctricos.

Después, rodeado por sus alumnos, Oersted fue disminuyendo la longitud del hilo de platino, produciéndose un aumento progresivo de corriente eléctrica. Al ir aumentando la corriente aumentó la temperatura del hilo de platino, llegándose a poner incandescente y emitir una luz blanca e intensa. Este fenómeno demostraba la relación entre la electricidad y la luz, explicó



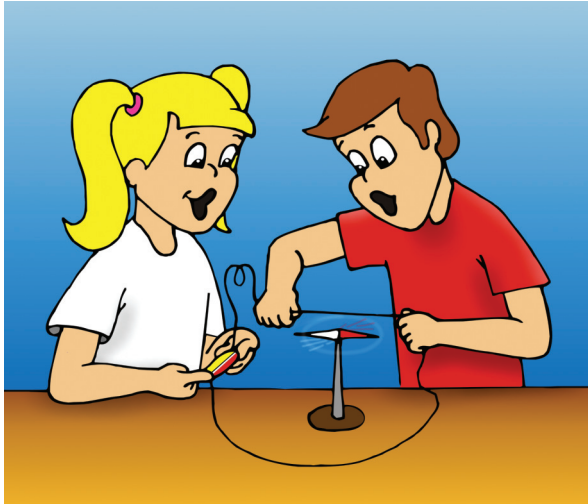
Oersted a sus atentos alumnos. Mientras hablaba, la temperatura del hilo alcanzó el punto de fusión del platino y se fundió por un punto, dando fin así al experimento. Y en ese momento, según cuenta Christopher Hansteen, Oersted se dio cuenta de que la aguja de la brújula que había situado cerca de la pila había sufrido un cambio de orientación. Silencioso, siguió su clase y finalizó sus demostraciones, pero en los meses siguientes trabajó duramente intentando buscarle un sentido al nuevo fenómeno. Pero no lo encontró. Se limitó a publicar sus resultados, a finales de julio de ese año, en un artículo titulado *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum Magneticam*, cuya resonancia fue indescriptible.

APLICACIÓN EN EL AULA

Hagamos como Oersted

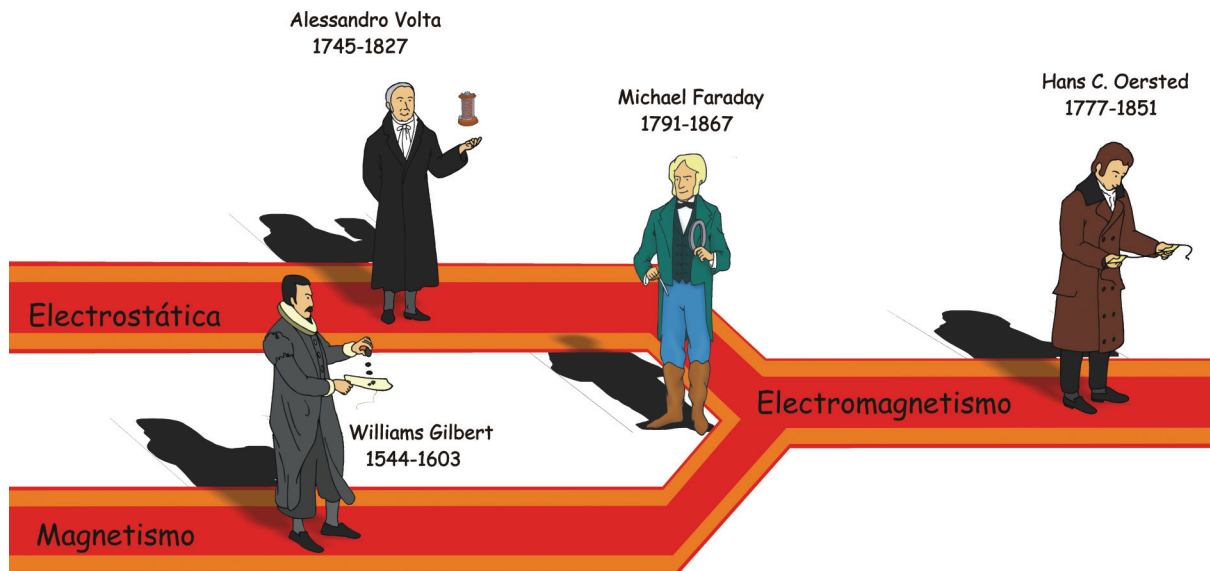
En la actualidad el experimento de Oersted lo pueden realizar los niños. Para ello basta con situar un cable conductor paralelo a la aguja de una brújula y conectar los extremos del cable a los polos de una pila de 1,5 voltios para establecer una corriente eléctrica, durante un instante. Se observa inmediatamente que la aguja se mueve hacia una nueva posición, perpendicular al cable, volviendo a su posición norte-sur cuando deja de pasar la corriente por el hilo conductor. Los alumnos pueden realizarlo en clase de dos en dos, como muestra la ilustración, y el maestro deberá hacerles comprender su trascendencia. A veces lo más difícil, cuando uno está delante de una obra de arte o de un experimento trascendental, es darse cuenta de su importancia y apreciar sus valores. En ciencia es necesario saber muchas cosas pero, sin duda, lo más importante es saber asombrarse. Toda esta obra sobre magnetismo va encaminada a despertar esa capacidad.





El resultado del experimento establece, sin lugar a dudas, la relación entre el magnetismo y la electricidad. Esta relación es la base del funcionamiento de los electroimanes, motores, alternadores y dinamos, que han cambiado el panorama científico y técnico de nuestro tiempo, modificando profundamente nuestra sociedad. Además nos ha permitido entender, final-

mente, la manera en que se genera el campo magnético terrestre, la razón de que se modifique con el tiempo (incluso con variaciones diarias). A partir del experimento de Oersted, los científicos descubrieron fenómenos tan interesantes como la naturaleza electromagnética de la luz, la propagación de ondas y el funcionamiento del sistema nervioso, e inventaron aparatos tan impresionantes como los marcapasos, el escáner y la obtención de imágenes por resonancia magnética nuclear. Pero todo ello pertenece al electromagnetismo, la disciplina que acabamos de ver nacer en la cátedra de Oersted y que será objeto de un próximo libro donde nos esperan nuevos y maravillosos experimentos. De la mano de las tres princesas había nacido el electromagnetismo, una nueva ciencia, y cuatro misteriosos fluidos iban a reducirse al movimiento de una carga.





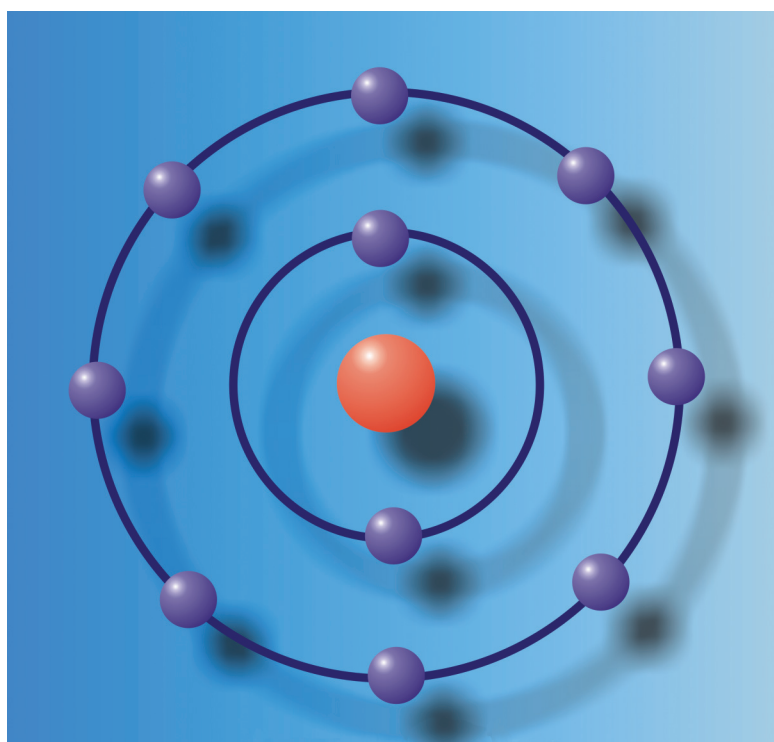
EL MAGNETISMO EN
EL SIGLO XX



LA ESTRUCTURA ATÓMICA
DE LA MATERIA

Bohr, que ha sido el modelo más útil y didáctico para explicar la relación entre la estructura de la materia y sus propiedades químicas, eléctricas ópticas y magnéticas.

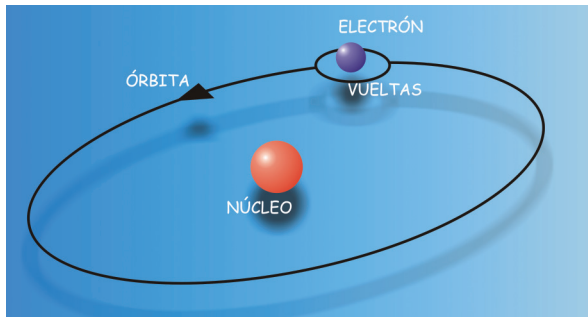
El modelo de Rutherford-Bohr asemeja el átomo a un sistema solar microscópico. Los protones forman un núcleo positivo (después se descubrió que también había partículas neutras, *neutrones*) en el centro del átomo, a semejanza del Sol, mientras que los electrones giran a su alrededor a semejanza de los planetas. Cada órbita admite un número fijo de electrones, de manera que los átomos, que contienen un número creciente de electrones van también llenando un número creciente de capas.



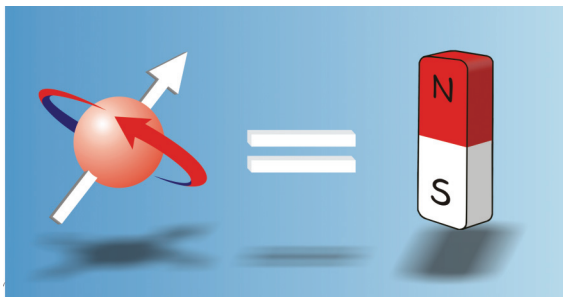


TIPOS DE MATERIALES MAGNÉTICOS

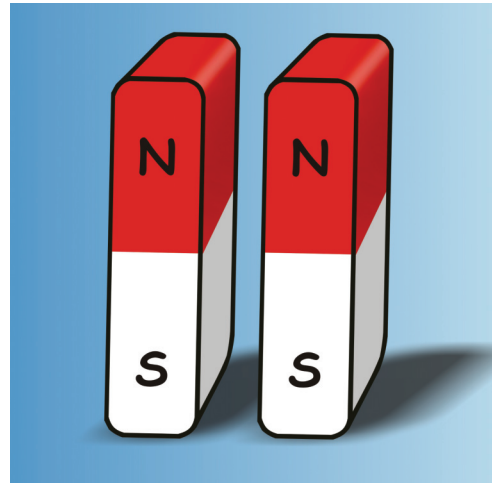
El magnetismo es una propiedad de los electrones. Por ser el electrón una partícula con carga, al girar en torno al núcleo produce un momento magnético llamado momento magnético orbital. Pero cada electrón está animado de un movimiento de giro sobre sí mismo, como puede verse en esta representación de un átomo de hidrógeno.



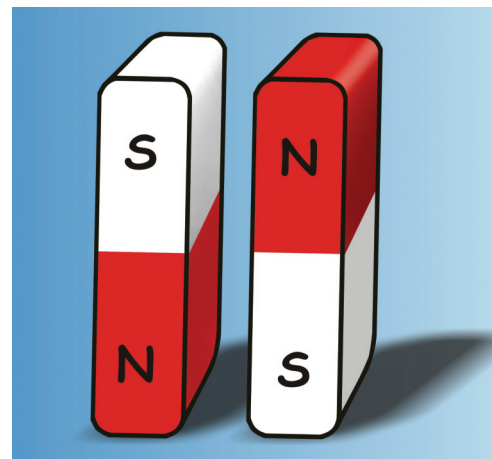
Este giro le confiere un momento magnético o momento bipolar, que recibe el nombre de *spin*.



Por lo tanto, las propiedades magnéticas de los átomos y de los materiales dependen de la forma en que se organicen los momentos magnéticos de sus electrones. Los momentos de dos electrones se dice que son paralelos cuando sus direcciones están alineadas con los polos norte y sur de ambos hacia el mismo lado. Esta configuración no es estable, como sabe todo el que haya intentado mantener dos imanes en esta situación.

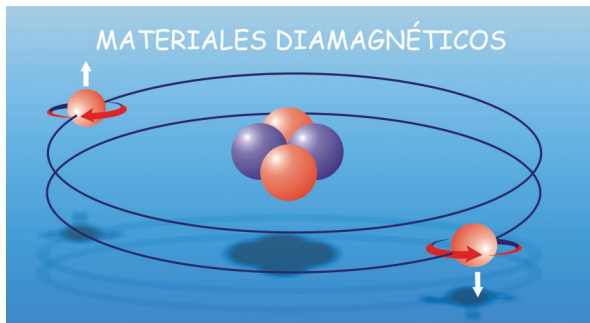


Esta situación evoluciona espontáneamente de forma que los imanes giran para enfrentar sus polos opuestos, lo que indica que esta última configuración es más estable o, lo que es lo mismo, de menor energía. En esta nueva situación los *spines* se dice que son antiparalelos o que están apareados.



Materiales diamagnéticos

En la figura, se ha representado un átomo de helio. Los electrones tienen los *spines* apareados y, por lo tanto, no poseen momento magnético y no generan ningún campo.



Lo mismo les ocurre a los materiales que tienen un número par de electrones, todos ellos apareados, que reciben el nombre de diamagnéticos. En ausencia de un campo exterior, sus átomos no tienen momento magnético pero bajo la influencia de un campo magnético aplicado, los electrones modifican su movimiento produciendo otro campo magnético débil en la dirección opuesta al aplicado, de manera que aparece una fuerza de repulsión entre la sustancia y el imán causante del campo. Todos los átomos tienen este comportamiento, que es independiente de la temperatura de la muestra, aunque sólo se consideran diamagnéticos aquellos materiales que no presentan características paramagnéticas que los enmascaren.



Los elementos diamagnéticos más conocidos son el bismuto, el mercurio, la plata, el carbón, el plomo y el cobre.

APLICACIÓN EN EL AULA

Experimentemos

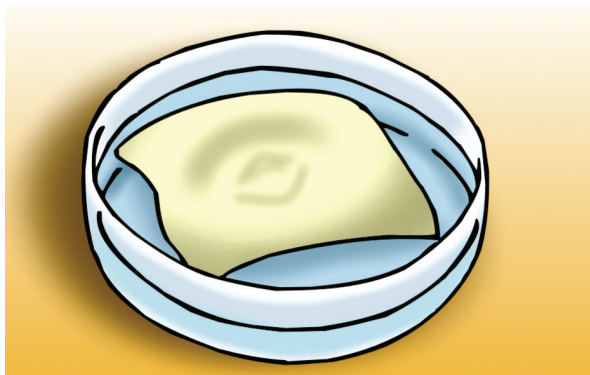
Para fijar ideas podemos realizar algunos experimentos sencillos para que los alumnos conozcan el comportamiento de los materiales diamagnéticos. A continuación presentamos algunos experimentos que pueden realizarse fácilmente en el aula. En todos ellos se emplean imanes de neodimio que producen un elevado campo magnético, por lo que se deben manejar con precaución.



La mesa de trabajo debe ser de madera y sin estructura de hierro, y debe evitarse la presencia de objetos ferromagnéticos dentro del campo de acción de los imanes.

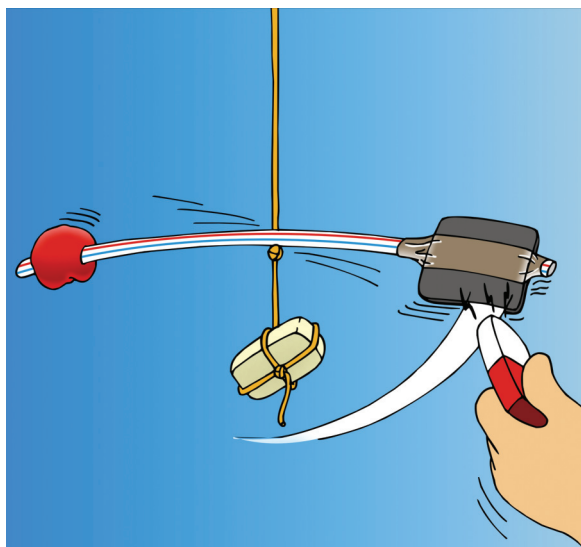
El primero de estos experimentos consiste en observar el diamagnetismo del agua. Para ello se prepara un vaso de plástico transparente de unos dos centímetros de altura, en el que se introduce un imán cúbico de neodimio de unos 15 milímetros de lado. El vaso de plástico se fabrica fácilmente a partir de una botella de plástico de las de refrescos de burbujas, sin más que utilizar una regla graduada y unas tijeras. El imán se puede comprar en Aimangz (<http://www.aimangz.com/>). A continuación colocamos el conjunto sobre una mesa que no vibre ni se mueva y llenamos el recipiente con agua hasta que justamente se cubra el imán. Debido al diamagnetismo del agua el imán lo repele, formándose una concavidad con la forma de la cara del imán en la superficie del agua, que resulta evidente si se observa por reflexión de la luz. El efecto resulta más evidente si cubrimos el imán con un trozo de plástico negro que

podemos obtener a partir de hojas separadoras, aunque no es fundamental utilizarlo.



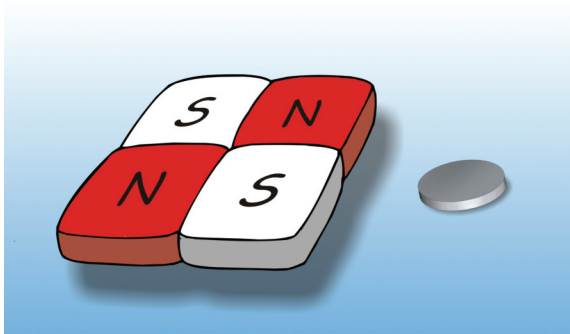
El siguiente experimento requiere una lámina de grafito pirolítico, material que se obtiene industrialmente por técnicas especiales. Puede comprarse por correo en scitoys, (<http://scitoys.com/>) y su precio no es elevado. Presenta una estructura de capas, fácilmente exfoliable, y en la dirección perpendicular al plano de estas capas es más diamagnético que el bismuto.

La primera operación consiste en construir una especie de balanza de torsión con una pajita de refresco, de una manera semejante a la que se empleó para construir el *versorium* de Gilbert. Se atraviesa la pajita con un hilo por su centro y se cuelga de un soporte adecuado. El hilo debe tener un nudo grueso para evitar que la pajita se deslice hacia abajo por él. Finalmente colgaremos del extremo inferior del hilo algún objeto ligero con el fin de mantenerlo vertical y con una cierta tensión. En uno de los extremos de la pajita sujetamos con cinta adhesiva un trozo de grafito pirolítico de manera que sus planos exfoliables se encuentren en la dirección perpendicular al suelo y paralelos a la pajita, y nivelamos nuestra balanza con una cantidad apropiada de plastelina en el otro brazo, como indica la figura.



Esperamos a que nuestro aparato quede en reposo, teniendo cuidado de que no haya corrientes de aire que lo muevan, aproximamos el imán de neodimio al grafito y observamos cómo aparece una fuerza de repulsión entre el imán y el grafito que obliga a girar a la balanza. Esto ocurre sea cual sea la cara del imán que acerquemos al grafito, lo que indica que el campo magnético induce en la parte próxima del grafito un polo magnético del mismo signo que el que se acerca. Si se aproxima un polo norte, aparece un polo norte en la parte del grafito más cercana al imán, y viceversa. Hay que hacer ver a los alumnos que en el caso de los materiales ferromagnéticos el efecto era el contrario. Si se acerca un polo norte del imán, en el material se induce un polo sur que es fuertemente atraído.

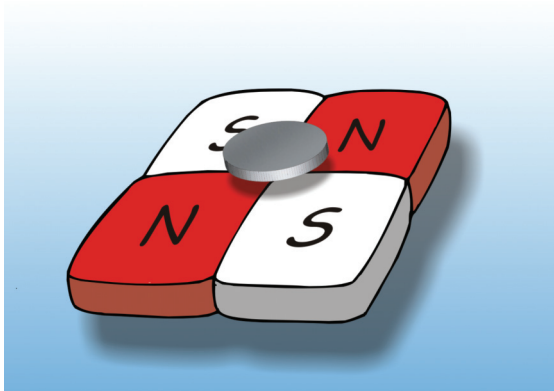
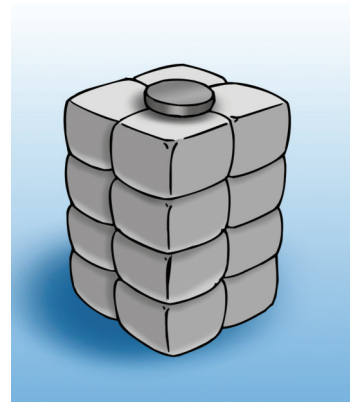
Por último, queremos presentar otro experimento que requiere igualmente un trozo de grafito pirolítico y cuatro imanes de neodimio como los utilizados en los experimentos anteriores. La primera operación consiste en colocar los cuatro imanes en la forma que indica la figura, con sus polos magnéticos alternados.



A continuación, cortamos un trozo cuadrado de grafito de unos diez milímetros de lado y lo exfoliamos o lijamos con mucho cuidado hasta conseguir un espesor aproximado de medio milímetro. Como el peso específico del grafito es muy bajo (unas dos veces el del agua), el trozo que hemos cortado es lo suficientemente ligero para que levite sobre el imán de neodimio, como indica la figura.

En nuestro experimento hemos construido un prisma transparente a partir de una hoja de plástico, para evitar que el grafito se salga del campo magnético del imán.

El resultado se puede ver en la figura adjunta.





Anexo 1
Materiales magnéticos

Materiales paramagnéticos

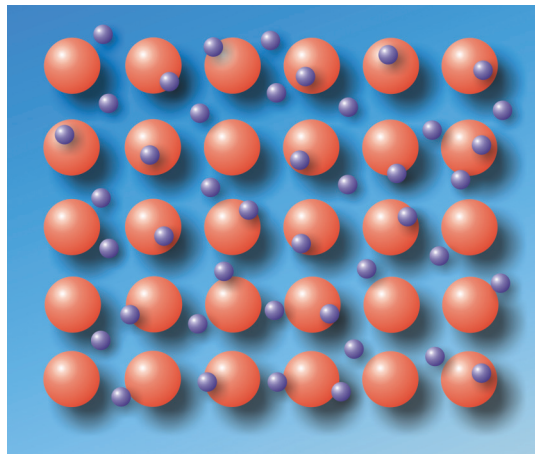
Se presenta en materiales que tienen un número impar de electrones (sin aparear) y que dan, por lo tanto, un momento magnético resultante no nulo. Existen varios modelos que explican los diferentes tipos de paramagnetismo que ocurren en los distintos tipos de materiales. El modelo de Langevin, por ejemplo, se aplica a sustancias con electrones localizados en sus propios átomos con un momento magnético que, debido a la agitación térmica, apunta en direcciones aleatorias dando lugar a un campo nulo en ausencia de campo externo.

Cuando se someten a la acción de un campo externo, los *spines* se orientan débilmente, modificando ligeramente su dirección tendiendo a alinearse con la del campo. El campo creado por el material, o campo inducido, es inversamente proporcional a su magnitud, siguiendo la ley de Curie.

A este tipo de materiales pertenecen las sales de los metales de transición, como el sulfato de cobre hidratado ($\text{SO}_4\text{Cu} + 5\text{H}_2\text{O}$). En este caso los momentos magnéticos de los iones metálicos están rodeados por átomos o iones que impiden que interactúen entre sí, dando como resultado un material en el que los momentos vecinos no interactúan.



Existen otros modelos que contemplan materiales paramagnéticos con electrones itinerantes, como el modelo de Pauli. En este modelo los electrones no están unidos con sus propios átomos sino que pueden saltar de uno a otro formando una molécula colectiva. Esto da lugar a un gas de electrones libres o electrones itinerantes, que no interactúan entre sí y que se mueven en una matriz de iones, como se indica en la figura.



Los *spines* de estos electrones itinerantes interactúan con el campo externo, dando como resultado un desequilibrio energético entre los electrones cuyo *spin* se alinea con él (que tienen menor energía) y los de *spin* contrario (que tienen mayor energía). Como consecuencia, el material disminuye su energía invirtiendo los *spines* antiparalelos al campo, dando como resultado un exceso de los electrones con *spin* paralelo al campo, lo que produce el paramagnetismo.

El uranio, el platino, el aluminio, el sodio y el oxígeno son elementos paramagnéticos.

Materiales ferromagnéticos

El ferromagnetismo es un fenómeno cooperativo, ya que no se da en átomos aislados. Tiene lugar en los materiales paramagnéticos del tipo anterior, es decir, que siguen el modelo de Pauli con sus átomos formando una red, pero en la que los *spines* de los electrones interactúan de tal manera que se alinean paralela-

mente entre sí. La teoría clásica se debe a Weiss (1907) y postula un campo molecular en el interior de la sustancia como responsable de que los *spines* de los electrones que se hallan dentro de una cierta región, que hemos llamado un dominio, se orienten en la misma dirección, magnetizando el dominio a saturación. En el modelo de Heisenberg se postula una interacción entre los *spines* de los electrones vecinos, llamada interacción de canje, que los orienta paralelamente entre sí.

Estos materiales presentan dominios que, como hemos dicho, son regiones cuyos *spines* se orientan paralelamente entre sí. En el mismo material pueden aparecer dominios con sus *spines* orientados en direcciones diferentes. Estos dominios aparecen espontáneamente cuando la temperatura baja por debajo del punto de Curie, de la misma manera que un líquido se solidifica cuando su temperatura baja por debajo del punto de solidificación. Si se eleva la temperatura de la muestra, los momentos magnéticos de los electrones van sufriendo el efecto de la agitación térmica, disminuyendo el grado de alineamiento de los mismos. Cuando la temperatura alcanza un valor crítico, la temperatura de Curie, la ordenación de los momentos magnéticos desaparece y el material deja de ser ferromagnético para convertirse en paramagnético. La transición de uno a otro estado es brusca, como lo es la del paso del hielo al agua o la del agua al vapor.

Elementos ferromagnéticos son los metales hierro, níquel y cobalto, así como las tierras raras gadolinio y disprosio.



Materiales antiferromagnéticos

Se presenta en sustancias semejantes a las ferromagnéticas, pero en las que la interacción de canje tiene un valor negativo, produciendo un alineamiento antiparalelo entre los *spines* de electrones vecinos, lo que da como resultado que sus efectos se cancelen, comportándose el material como si fuese paramagnético. La temperatura de transición entre el estado antiferromagnético y el paramagnético se conoce como temperatura de Néel, en honor a su descubridor.

El único elemento antiferromagnético es el cromo.



Materiales ferrimagnéticos

Los materiales ferrimagnéticos tienen estructuras cristalinan muy complejas, y en ellas la interacción de canje produce alineamiento paralelo de *spines* entre algunos de los átomos del cristal y antiparalelo entre otros.

En el material aparecen dominios magnéticos y se comporta de forma semejante a como lo hacen las sustancias ferromagnéticas, pero como resultado de la aparición de momentos contrarios estos materiales presentan valores de saturación más bajos. La ferrita, como es evidente, pertenece a este tipo de materiales.

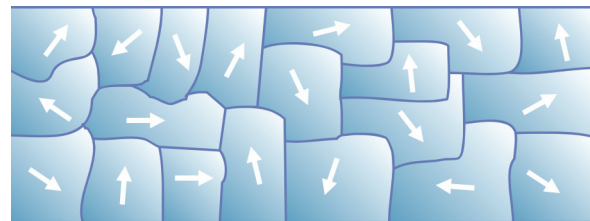


1 H	FERROMAGNÉTICO																ANTIFERROMAGNÉTICO																2 He														
PARAMAGNÉTICO																	DIAMAGNÉTICO																														
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar												
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe												
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	87 Fr	88 Ra	89 Ac																											
																	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																	

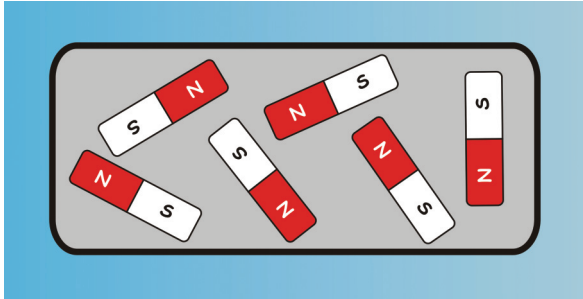
Fundamentos físicos del comportamiento ferromagnético

Llegados a este punto, disponemos de los datos necesarios para profundizar en los fundamentos del ferromagnetismo y los procesos que tienen lugar en estos materiales.

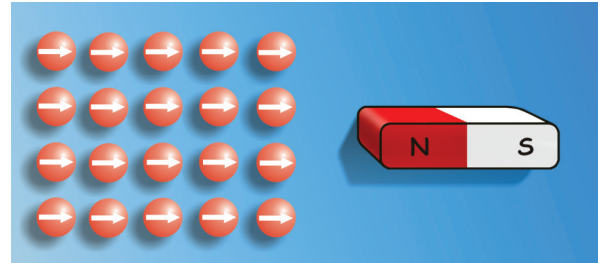
Hemos visto que si dividimos un imán en trozos, obtenemos siempre imanes más pequeños. Por pequeños que sean los trozos, todos poseen un polo norte y un polo sur. Por ello es lógico suponer que un imán está constituido por millones de imanes microscópicos (en realidad es un número mucho más elevado), que reciben el nombre de *dominios magnéticos*, cuyo tamaño es del orden de una décima a una centésima de milímetro.



Con este modelo podemos tratar de estudiar algunos fenómenos que no habíamos explicado, como la razón por la que el hierro y el acero se comportan diferentemente después de ser sometidos a un campo magnético, conservando la imanación el acero y perdiéndola el hierro cuando desaparece el campo magnético exterior. Para ver cómo se orientan estos dominios, podemos jugar con dos imanes bipolares, de los del tipo de barra. Veremos rápidamente que se colocan espontáneamente de manera que el polo norte de uno se una al polo sur del otro, y viceversa, indicando que es ésta la distribución de menor energía. Para colocarlos de manera que tengan los polos del mismo signo unidos, situación en la que el campo magnético de ambos se refuerza, debemos realizar un cierto trabajo para situarlos de esa forma y una fuerza considerable para mantenerlos así. En el caso de los dominios, la situación es la misma; éstos tienden a colocarse de manera que su energía sea mínima, lo que produce una distribución desordenada que da como resultado un campo magnético exterior nulo.

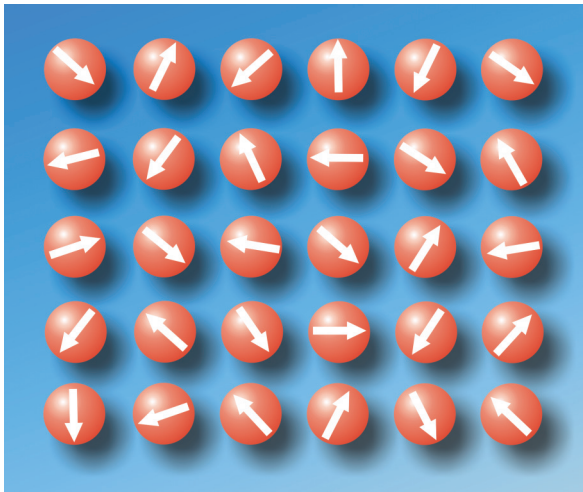


También podemos materializar el modelo de dominios de un material ferromagnético blando sin imanar, como el hierro dulce, colocando unas cuantas brújulas pequeñas en el fondo de una caja de cartón, en la forma representada en la figura. Como el campo magnético terrestre es mucho más débil que el creado por una brújula sobre las que se encuentran a su lado, éstas se colocarán de manera que su energía sea mínima, produciendo una distribución desordenada cuyo campo total sea nulo fuera de la caja.

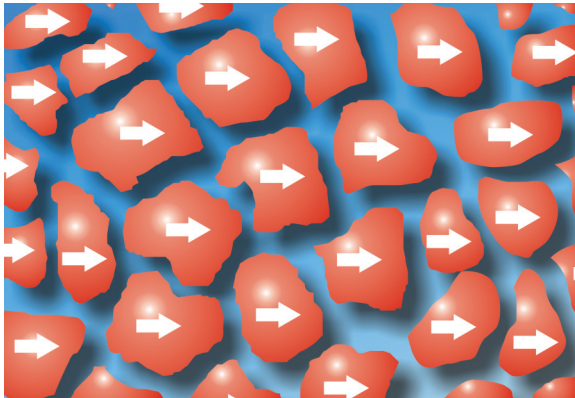


Pero en el momento que alejemos el imán volveremos a tener la misma distribución original en las brújulas, como ocurre cuando se queda sin campo magnético un trozo de hierro dulce. Las agujas de las brújulas han jugado el papel de dominios magnéticos, explicando por analogía lo que ocurre en la realidad. Nuestro modelo de dominios magnéticos funciona.

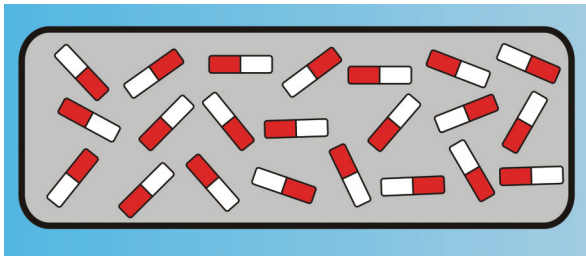
El comportamiento de los materiales magnéticamente duros, como el acero, sabemos que es distinto, ya que cuando se retira el imán permanente quedan imanados conservando un campo remanente. La razón para este comportamiento del material es fácilmente explicable con nuestro modelo. Como el lector habrá adivinado, la aparición del magnetismo remanente tiene que ser el resultado de que los dominios, por alguna razón, no vuelven a su situación inicial desordenada, produciendo un campo magnético exterior. Este nuevo fenómeno se puede introducir en nuestro modelo añadiendo un nuevo ingrediente. En el caso del hierro dulce los dominios presentan formas esféricas de paredes lisas, de manera que pueden girar sobre sí mismos sin que aparezcan fuerzas de rozamiento con los dominios con los que están en contacto. En cambio, en el caso de materiales duros, los dominios pueden presentar formas irregulares y paredes rugosas, de manera que sea difícil que pierdan la ordenación producida por la presencia del campo magnético exterior. Como es lógico, la presencia de impurezas en una sustancia magnética o de defectos cristalinos en la red, así como cualquier tipo de heterogeneidad debe dificultar la rotación de los dominios y por lo tanto producir el endurecimiento magnético del material.



Si acercamos ahora un imán potente a la caja, observaremos que las brújulas se orientan de manera que siguen las líneas del campo creado por el imán, ordenándose de acuerdo con ellas. El campo total fuera de la caja será el resultado de sumar el campo del imán permanente y el producido por las agujas imantadas de las brújulas.

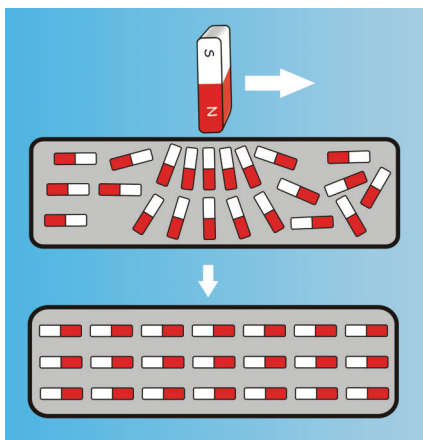


Es fácil imaginarse el proceso de imanación por frotamiento de una muestra ferromagnética. En su estado inicial los dominios se encuentran desordenados, como se muestra en la figura.

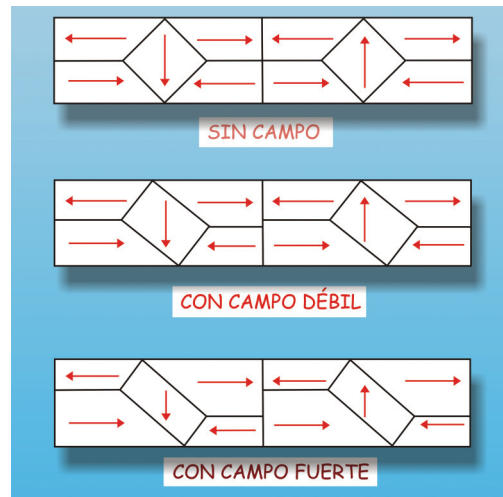


Al ir desplazando un polo del imán permanente a lo largo de la pieza que queremos magnetizar, sus dominios van rotando para ordenarse siguiendo el campo.

Esta operación repetida puede llevar a la ordenación total de los dominios.



En realidad, en los procesos de magnetización tiene lugar, además de la rotación de los dominios, el crecimiento de los que están orientados en el sentido del campo exterior, a costa del tamaño de los demás, mediante el desplazamiento de las paredes que separan los dominios. Este proceso se ha representado en estas figuras.



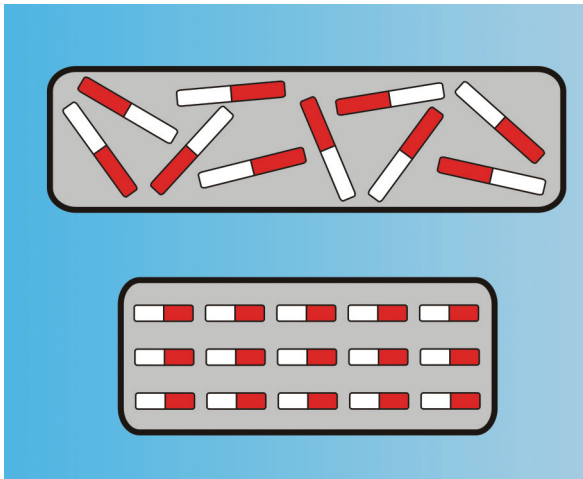
El modelo de dominios de tamaño fijo es el modelo de Preisach, y es cuantitativamente equivalente al de desplazamiento de las paredes.

En algunos materiales la rotación de los dominios o la reducción de su número que acompaña a la magnetización producen una disminución de su volumen, fenómeno que recibe el nombre de *magnetostricción*.

De todo ese tratamiento teórico se deduce fácilmente que el campo máximo que un material imanado puede producir corresponde al que se obtiene con todos los dominios orientados en la misma dirección. Cuando un material alcanza esta situación decimos que está saturado.

En el caso de los materiales duros, la mayoría de los dominios conservan su orientación cuando desaparece el campo exterior, pero algunos de esos dominios pueden perder su orientación y producir una disminución del campo magnético total. El número de los dominios

que se muevan es lo que determina la dureza del material. Como resultado de esta pérdida, el magnetismo remanente suele ser menor que el que correspondería a la saturación.



Tanto los materiales duros como los blandos son importantes en las aplicaciones tecnológicas. Unos, en la fabricación de imanes, y otros, en hierros del transformador. En el caso de los materiales que se emplean para almacenar información, como en los discos duros, será necesario que conserven las orientaciones de los dominios, pero que no requieran una energía muy elevada para reescribirlos. Son, pues, materiales intermedios.

Empleando este modelo podemos explicar fácilmente la transición de Curie, en la que el material pierde bruscamente su característica de ferromagnético al alcanzarse una temperatura crítica. Es fácil imaginarse cómo al elevarse la temperatura los *spines* electrónicos van adquiriendo mayor energía, que tiende a que sus ejes oscilen con amplitud creciente en torno a su posición de equilibrio. Si la agitación térmica aumenta por encima de un valor crítico, la tendencia al desorden vence a la fuerza ordenadora de la interacción de canje, perdiéndose la organización interna que hace que dentro de un dominio todos los *spines* sean paralelos, convirtiéndose en un material paramagnético al desaparecer la ordenación en dominios.

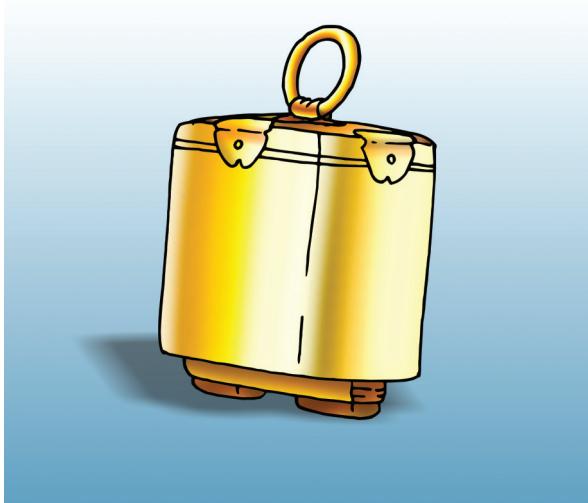


Anexo 2
Tipos de imanes

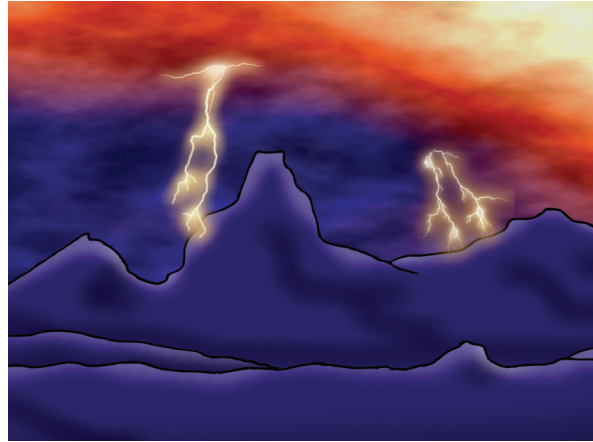
Imán natural o piedra imán

Fue el primer imán permanente que se conoció y utilizó. Produce campos magnéticos bajos, pero su resistencia a la desmagnetización es razonable, sin ser muy alta. Su composición química es Fe_3O_4 , magnetita, un óxido de hierro ferromagnético.

La imanación de estos minerales se produce por inducción, al ser sometidos al campo magnético generado por la corriente eléctrica de un rayo que caiga en sus proximidades. Es un fenómeno parecido al que se produce en el experimento de Oersted que hemos realizado. La corriente que pasa por el cable paralelo a la brújula, del orden de 2 a 3 amperios, genera un campo magnético perpendicular al campo terrestre, por lo cual la brújula cambia de orientación.



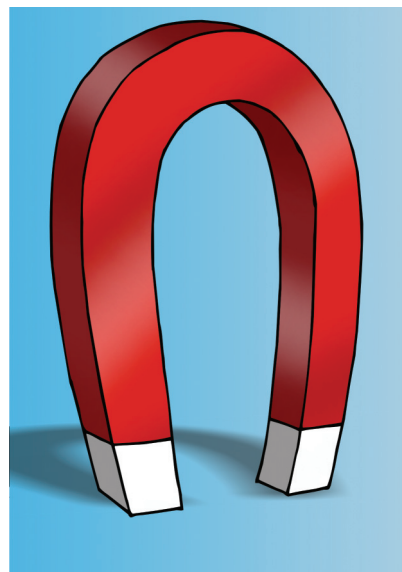
En el caso del rayo la corriente oscila entre 20.000 y 30.000 amperios, produciendo un campo magnético suficiente para saturar las piezas de magnetita que se encuentren en las proximidades.



Imanes de aceros al carbón

Estos materiales se desarrollaron en el siglo XIX. Producen campos más elevados que los imanes naturales, pero presentan menor resistencia a la desmagnetización por lo que es necesario darles formas alargadas, entre las cuales la más conocida es la de herradura.

Suelen tener trazas de otros metales con las que se forman carburos que precipitan en forma de impurezas. Estas impurezas obstruyen el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos.



Imanes de ALNICO

Se desarrollaron hacia 1930 y presentan unas características magnéticas muy superiores a las del acero. Se llaman así porque están compuestos por aluminio, níquel y cobalto. Se fabrican por sinterización o por vaciado en molde de una mezcla formada por un 3 % de cobre, un 8 % de aluminio, un 14 % de níquel, un 24 % de cobalto y un 51 % de hierro. Tienen la ventaja de poseer buen precio, aunque no tienen mucha fuerza

El material presenta dos fases bien diferenciadas a las que debe sus características: agujas microscópicas de una aleación de hierro y cobalto, que es ferromagnética, en una matriz no magnética de aluminio y níquel. Son los que presentan mejor comportamiento a temperaturas elevadas, con un punto de Curie del orden de los 800 grados centígrados.

Imanes de tierras raras

Son imanes pequeños, unas diez veces más potentes que los de ALNICO. Los más modernos están fabricados a base de neodimio, hierro y boro, que están sustituyendo al sumerio y al cobalto, más frágiles, de precio más elevado y de mayor densidad, aunque con mayor resistencia a la oxidación. Son bastante frágiles y tienen poca resistencia a la corrosión por lo que van recubiertos con un baño de níquel o zinc, que les da una apariencia metálica.

Presentan alta resistencia a la desmagnetización y son los imanes más potentes del que puede disponerse a un precio asequible y se pueden fabricar con cualquier forma, pero no pueden trabajar a temperaturas por encima de los 200 grados centígrados.

Deben manejarse con precaución para evitar daños corporales, sobre todo cuando se están manipulando dos o más imanes ya que pueden pellizcar la mano y producir heridas.



Imanes cerámicos

Se llaman así por su apariencia y sus propiedades físicas. Están compuestos por bario y estroncio, y suelen ser grises, de superficie lisa y de color gris oscuro. Se fabrican dándoles cualquier forma, aunque los más comunes tienen forma cilíndrica con una figurita de plástico unida, empleándose para sujetar notas en las neveras. Son frágiles, pueden romperse si se caen o se acercan a otro imán sin el debido cuidado. Son conocidos bajo el nombre de ferritas, presentan alta resistencia a la corrosión y pueden utilizarse en un rango de temperaturas comprendido entre los 40 grados bajo cero y los doscientos cincuenta grados centígrados.

Imanes flexibles

Se fabrican por inclusión de partículas magnéticas en un elastómero, como caucho o PVC. Son muy flexibles y se utilizan en publicidad, cierres para nevera, tiras para sujetar notas, etc. La superficie que está en contacto con la superficie a la que se adhiere está formada por una serie de bandas estrechas que alternan los polos norte y sur. De esta manera se consigue una región de campo relativamente intenso muy cerca de la superficie, pero que se anula a una distancia muy corta de ella, del orden de los cinco milímetros (más o menos el grosor de la piel de las carteras). De esta forma se evita que se borren las bandas magnéticas de los billetes de transporte y de las tarjetas de crédito.

Los seres humanos somos ciegos al campo magnético: se trata de un fenómeno que no percibimos con nuestros sentidos. El profesor puede sin embargo transformar esta limitación en un estímulo para la imaginación, la experimentación y la elaboración posterior de conceptos sólidamente asentados.

Este libro, escrito por científicos del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y profesores de la Comunidad de Madrid, es fruto de un acuerdo de colaboración entre este organismo y la Dirección General de Ordenación Académica, con el propósito de formar científicamente al profesorado de las primeras etapas educativas. En el libro se realiza un breve recorrido por los hitos que jalonaron el descubrimiento del campo magnético, y se proponen sencillos experimentos para estimular en los escolares el razonamiento lógico y la comprensión de lo que observan.



Comunidad de Madrid

CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN
Dirección General de Ordenación Académica