

CAPITULO II

TEORÍA DEL MAGNETISMO

I

HIPÓTESIS DE LOS DOS FLUIDOS

Tan luego como se conocieron y analizaron los fenómenos de atracción y repulsión magnéticas que acabamos de describir, procuróse enlazarlos entre sí mediante una hipótesis á propósito para explicar las propiedades de los imanes y de las substancias magnéticas, sus acciones recíprocas, la existencia de los polos y de la línea neutra, etc. Los antiguos, que, según hemos visto, tan sólo conocían la atracción del imán natural sobre el hierro, y cuyas nociones en física eran tan limitadas, no podían emitir sino nociones confusas sobre la causa de este fenómeno (1). Desde Thales, que suponía al imán dotado de un alma capaz de mover el hierro, y Claudiano, que consideraba el hierro como el alimento del imán, hasta Lucrecio, que atribuye la atracción del hierro al vacío producido delante del imán por las emanaciones que este último despidió, no hay nada que merezca llamar la atención. Posteriormente á Gilbert se han presentado y desechado luego dos ó tres teorías del magnetismo: la de Æpinus, que admitía en las substancias magnéticas la existencia de un fluido particular que actuaba en sus moléculas, y la de Euler, basada en los movimientos de una materia sutil, distinta del éter, que circulaba de uno á otro polo del imán, siempre en el mismo sentido, entrando por uno de ellos y saliendo por el otro para volver sobre sí misma: el célebre geómetra explicaba los fenómenos principales del magnetismo por las acciones de dichos torbellinos y sus reacciones mutuas.

La hipótesis de Coulomb, que vamos á explicar ahora, es la que ha prevalecido, si bien debemos advertir al lector que esta teoría no es otra cosa sino un modo cómodo de enlazar un gran número de hechos que, á no ser por ella, quedarían aislados en apariencia. No nos enseña nada acerca de la causa de los fenómenos, causa que probablemente es la misma que la de los fenómenos eléctricos. Si, como todo induce á creer, la electricidad no es otra cosa sino un modo particular de los movimientos del éter, y si se le consigue definir con toda claridad, el magnetismo, conforme más adelante veremos, se hallará enlazado con todas las demás fuerzas físicas, y su teoría no será más que un caso particular de la teoría universal.

Coulomb explicaba todos los fenómenos magnéticos basándolos en la existencia de

(1) "Plutarco dice con referencia á Manethón que los egipcios daban al imán el nombre de *hueso de Horus* y al hierro el de *hueso de Tifón*, para representar la lucha del principio del bien y del mal, en cuya lucha unas veces el bien obliga al mal á ceder, y otras predomina éste. En efecto, añade Plutarco, ora el imán obliga al hierro á acercarse á él y le arrastra tras sí, y ora el hierro se desvía del imán y parece repelido en sentido contrario." (H. Martín.) Según lo prueba este párrafo, los antiguos conocieron ciertos fenómenos de repulsión magnética, pero sin advertir que se producían entre un imán y otro imán, es decir, entre el imán natural y el hierro imanado.

dos fluidos que gozaban de propiedades opuestas. En su concepto, estos fluidos son distintos de la materia ponderable; lo que así lo prueba es que un imán adquiere ó pierde sus propiedades especiales sin que la materia de que está formado sufra ninguna modificación en sus propiedades físicas ó químicas distintas de la propiedad magnética. Así por ejemplo, un pedazo de hierro conserva rigurosamente el mismo peso, la misma constitución química antes que después de su imanación, sucediendo otro tanto respecto de su volumen, siempre que su temperatura no varíe.

Así pues, los fluidos magnéticos son imponderables. Existen en cantidades iguales en todos los cuerpos magnéticos y se neutralizan ó se combinan en ellos cuando la virtud magnética no se hace patente; por el contrario, se separan cuando estos cuerpos se hallan en estado de imanación transitoria ó permanente. Para explicar los fenómenos de atracción y repulsión, la existencia de los polos, etc., se admite que los dos fluidos se atraen mutuamente, al paso que repelen sus propias moléculas. Por esta razón designaremos uno de los fluidos con el nombre de *fluido positivo*, y otro con el de *negativo*.

Los fluidos están separados en un imán natural ó artificial, es decir, en todo cuerpo dotado de magnetismo polar, siendo la acción de cada uno de ellos preponderante en uno ú otro polo, al paso que se va debilitando al alejarse de estos puntos hasta ser nula allí donde existe la línea neutra. Luego veremos cómo se explica esta distribución de la acción de los fluidos. Cuando se acerca á uno de los polos de un imán un pedazo de cualquier substancia magnética, pero no imanada, por ejemplo un pedazo de hierro dulce, el fluido neutro que está diseminado por toda su masa sufre la influencia del fluido del imán acumulado en dicho polo; este fluido repele el del mismo nombre y atrae el de nombre contrario. Hay, pues, descomposición de fluido neutro, y el pedazo de hierro dulce se convierte así en un imán transitorio que tiene un polo negativo en el extremo puesto en contacto con el positivo del imán, y un polo positivo en el extremo opuesto. Lo contrario sucedería si se pusiese el hierro en contacto con el polo negativo del imán. Veamos lo que pasa en el primer caso. El fluido acumulado en el polo positivo del imán repele el fluido semejante del hierro en toda la longitud de éste, al paso que el polo negativo atrae el fluido positivo del hierro; pero la repulsión se ejerce á menor distancia de lo que lo hace la atracción, por cuya razón predomina aquélla, originando la formación de un polo negativo en el extremo del hierro que está en contacto con el polo positivo. Por igual razón se forma un polo positivo en el extremo opuesto.

De aquí resulta que si se imana por influencia un pedazo de hierro dulce, y luego se acerca poco á poco al polo puesto en contacto con él otro imán de la misma fuerza que el primero, pero dispuesto en sentido contrario, la imanación desaparecerá y el hierro se desprenderá del polo que lo sostenía. El sencillo experimento (fig. 13) mediante el cual se comprueba esta consecuencia de la teoría, se llama *paradoja magnética*. Se puede poner en evidencia esta neutralización de un polo positivo por la repul-

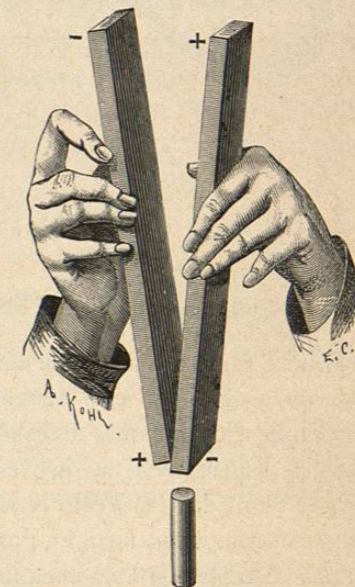


Fig. 13.—Paradoja magnética

sión de otro negativo, con los dos polos de un mismo imán, lo que prueba además que la intensidad magnética es igual en cada uno de los polos. Cógese una cinta de acero, un muelle imanado de reloj, se le dobla hasta juntar los dos polos, y acercándolos simultáneamente á una aguja imanada (fig. 14), se ve que no hay ningún efecto de atracción ni de repulsión.

Dos pedazos de hierro del mismo peso y de igual dimensión, suspendidos paralelamente de modo que se toquen por los lados, se desvían uno de otro así que se acerca

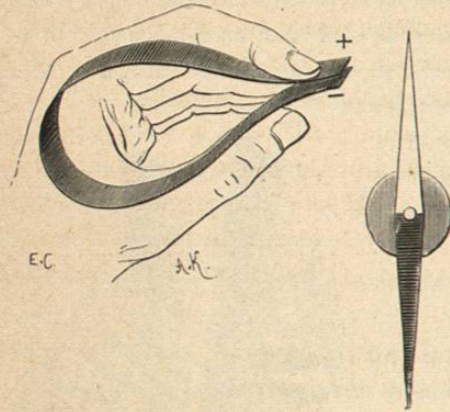


Fig. 14.—Igual intensidad magnética de los polos

á uno de sus extremos comunes el polo de una barra imanada. Ambos se imanán á la vez por influencia, pero como sus polos del mismo nombre están frente á frente, hay en ellos repulsión de los fluidos del mismo nombre, y por lo tanto desviación de las partes vecinas de las láminas metálicas. Admitida la hipótesis de los dos fluidos dotados de propiedades opuestas, falta saber cómo se efectúa su distribución en las substancias magnéticas. Cuando está constituido un imán con sus dos polos y su línea neutra, se pueden hacer dos suposiciones sobre el modo cómo están repartidos en la masa los dos fluidos separados. Antes de la teoría de Coulomb, admitíase que cada fluido está acumulado en una y otra mitad del imán, con una tensión tanto mayor cuanto más inmediata á cada polo está la región que se considera. Si así fuese, al separar una de otra estas mitades, cada parte no contendría más que una especie de fluido. Pero esto es incompatible con el hecho, descubierto por Gilbert, de que si se rompe un imán en dos pedazos, cada uno de éstos se convierte á su vez en un imán completo con su línea neutra y sus dos polos, y conteniendo por consiguiente en igual cantidad los fluidos positivo y negativo. Tomemos un alambre de hierro im-

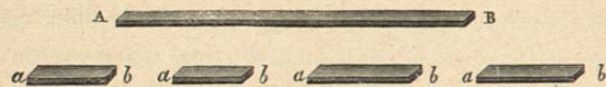


Fig. 15.—División de una barra imanada: disposición de los polos en los fragmentos

nado, y con unas mordazas cortémoslo en los pedazos que queramos; cada uno de ellos será un imán distinto, cuyos polos tendrán la misma intensidad que los polos del imán primitivo.

Además, si se examina cómo están dispuestos los polos en los fragmentos, se ve que los de nombre contrario se hallan de frente, es decir, en los extremos que antes de la rotura estaban en contacto, de suerte que todos los polos positivos a, a, \dots y todos los negativos b, b, \dots se hallan situados en el mismo lado que los polos semejantes del imán primitivo.

Hay, pues, que admitir con Coulomb que los dos fluidos están distribuídos con igualdad en un imán hasta en las partes más pequeñas de la substancia que lo forma. Estos últimos elementos, cada uno de los cuales contiene en cantidad igual uno ú otro fluido, son lo que se llama *elementos magnéticos*. Fáltanos explicar en qué difieren los imanes

de las substancias magnéticas no imanadas, y también demostrar cómo se forman los polos, la línea neutra y los puntos consecuentes.

Para explicar mediante la existencia de los elementos magnéticos en qué pueden diferir los imanes de las substancias puramente magnéticas, es preciso admitir que, en el primer caso, los fluidos opuestos de cada elemento quedan separados por efecto de una fuerza particular á la que se ha dado el nombre de *fuerza coercitiva*. En las substancias no dotadas de magnetismo polar, como el hierro dulce, no existe esta fuerza; así es que la imanación por influencia tan sólo subsiste mientras el imán está próximo al hierro ó en contacto con él; entonces la separación de los fluidos ó su descomposición en cada elemento magnético se debe únicamente á la acción de los polos del imán. Tan luego como á éste se le aparta, dichos fluidos se recomponen.

Acabamos de decir que la fuerza coercitiva se opone á la reunión de los fluidos; por lo regular se opone á su movimiento, y por consiguiente lo mismo á su separación que á su reunión. En efecto, los cuerpos susceptibles de adquirir el magnetismo polar *permanente*, como el acero templado, son á la vez los que se imanán más difícilmente y los que, después de imanados, conservan más tiempo su imanación. Así es que un pe-

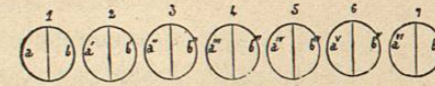


Fig. 16.—Acciones recíprocas de los elementos magnéticos

dazo de acero templado apenas sufre la acción atractiva de un imán; la fuerza coercitiva que une los elementos magnéticos se opone á su separación.

Veamos ahora cómo da cuenta la teoría de la constitución de un imán, es decir, de un cuerpo magnético cuyas moléculas todas están polarizadas, como el imán entero, y cuyos dos fluidos están separados en las extremidades opuestas de cada molécula por la fuerza coercitiva.

Sea (fig. 16) una serie de partículas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7..... que presentan una á otra sus polos opuestos, es decir, orientados en el sentido de la línea de los polos del imán.

La fuerza coercitiva propende á separar los fluidos en cada elemento. Pero cada partícula ejerce además sobre la que la precede y la que la sigue una acción que vamos á analizar.

Consideremos el elemento 1. El polo a' de 2 repele á a y atrae á b ; luego actúa en el mismo sentido que la fuerza coercitiva; b' actúa evidentemente en sentido contrario, pero á mayor distancia, y por lo tanto prepondera la primera acción. El elemento 3 influye también en 1, pero con menor intensidad que 2, y así sucesivamente; la acción de un elemento sobre cualquiera de los que le preceden produce el mismo efecto que si aumentara la fuerza coercitiva de estos últimos. Claro está que se obtendría el mismo resultado si se analizara la influencia de cada elemento sobre los que le siguen. En ambos casos, esta influencia tiende á aumentar la fuerza coercitiva de cada elemento, pero es tanto menor cuanto más considerable la distancia á que se ejerce.

Réstanos ahora comparar los elementos de una misma fila ó serie por lo que respecta á la intensidad total que para cada una de ellas resulta de estas influencias mutuas. Supongamos que la serie 1, 2....., 7 se extiende del polo positivo á su polo negativo, ó más bien, de un extremo á otro de la barra. El elemento 1 sufre la acción de los seis elementos situados á distancias crecientes: llamemos $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6$, á las fuerzas de valores decrecientes que miden las influencias de estos seis elementos. Su resultante

F será $F = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6$. Pasemos al elemento 2 y sea F' la resultante correspondiente, tendremos $F' = 2f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5$; para el elemento 3, tendremos $F'' = 2f_1 + 2f_2 + f_3 + f_4$, y por último, el elemento de en medio ó 4 dará $F''' = 2f_1 + 2f_2 + 2f_3$. Por el otro lado, las resultantes tendrían los mismos valores en sentido inverso. Luego la simple comparación de estas varias resultantes prueba que crecen hasta la mitad de la serie.

Así pues, la imanación de los elementos de una barra imanada es más enérgica en su parte media, y esta imanación va disminuyendo progresivamente del medio á cada extremo. Esta consecuencia de la teoría parece á primera vista singular, paradójica, toda vez que la experiencia prueba que la acción de un imán es más fuerte en los extremos. Pero fácilmente veremos que la contradicción es tan sólo aparente.

Para ello procuraremos comprender la acción de una fila de elementos magnéticos

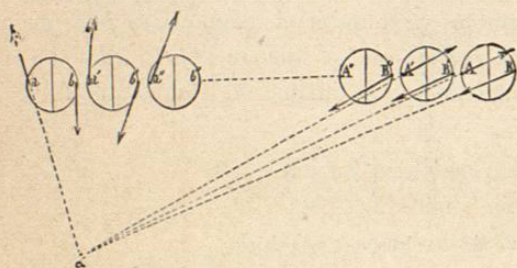


Fig. 17.—Acción de una fila de elementos magnéticos sobre un punto exterior

sobre un punto exterior *alfa*, que suponemos que contiene un fluido magnético del mismo nombre que el de los polos *a, a', a''* de los elementos: *a* y *alfa* se repelen, *b* y *a'* actúan sobre *alfa* en sentido contrario; pero, según lo que hemos visto, *a'* es mayor que *b*, luego la fuerza repulsiva prevalecerá; otro tanto sucederá con *b'* y *a''* de los dos elementos siguientes. Sólo que, como la diferencia de un elemento á

otro va disminuyendo hasta el medio, la fuerza repulsiva irá disminuyendo á su vez hasta este punto, y por consiguiente la resultante de todas estas fuerzas repulsivas decrecientes tendrá su punto de aplicación inmediato al extremo de la serie. Este punto será el polo de la barra imanada relativamente al punto exterior.

Del propio modo se vería que los elementos de la segunda mitad ejercen en *alfa* acciones atractivas tanto mayores cuanto se consideren elementos más cercanos al extremo opuesto de la barra, que tendrá un polo de nombre contrario al primero en un punto inmediato á este extremo.

Así se explica la existencia de los polos de los imanes, cada uno de los cuales es el punto de aplicación de fuerzas opuestas, polos que son relativos al punto exterior que se considera, y que cambian cuando el punto se acerca ó se aleja. Cuando la distancia de éste es infinita ó se la puede considerar como tal, las resultantes de las fuerzas magnéticas son paralelas, y á los polos correspondientes se les puede dar con propiedad el nombre de *polos* del imán. Vamos ahora á ver que se realiza este caso con un imán libre abandonado á sí mismo, es decir, influido solamente por el magnetismo de la Tierra.

II

LA ACCIÓN DE LA TIERRA SOBRE LA AGUJA IMANADA SE PUEDE CONSIDERAR COMO LA DE UN IMÁN

La teoría de los dos fluidos magnéticos de Coulomb explica los fenómenos de atracción de los imanes, sus acciones recíprocas y la imanación por influencia á cierta distancia ó por contacto; mejor dicho, es la traducción fiel de estos fenómenos y de las

circunstancias en que se hacen patentes. Resta decir cómo explica la dirección magnética.

Hemos visto que una barra imanada suspendida libremente, ó que una aguja imanada que puede moverse alrededor de su centro de gravedad, queda después de un corto número de oscilaciones en una dirección fija, constante para un mismo lugar, ó por lo menos sólo experimenta lentas variaciones seculares ó leves variaciones periódicas. Prescindamos por el momento de estas variaciones, y veamos cuál puede ser la explicación de la dirección constante de los imanes.

Pero antes recordemos los hechos para precisarlos.

Consideremos una *aguja imanada* ó un rombo de acero dotado de la propiedad común á los imanes, es decir con un polo en cada extremo y la línea neutra en el centro. Un imán de esta clase suspendido horizontalmente de un hilo sin torcer, ó centrado sobre un eje mediante una chapita de ágata (fig. 18), de modo que pueda girar libremente en todas direcciones, acaba siempre, después de oscilar un poco, por tomar en el plano horizontal una dirección determinada, casi invariable, ó á lo sumo sujeta á variaciones de escasa amplitud.

Los navegantes han aprovechado hace ya siglos esta propiedad de la aguja imanada de dirigir uno de sus polos hacia el horizonte septentrional. Sin embargo, no mira precisamente al mismo Norte, y por esto el plano vertical que pasa por sus polos no coincide con el plano meridiano del lugar. El ángulo de estos dos planos es lo que se llama *declinación de la aguja imanada* ó simplemente *declinación*. En el capítulo consagrado al *Magnetismo terrestre* veremos que la declinación no es la misma en todos los lugares de la Tierra, que en ciertas regiones es nula, que en algunas es oriental y en otras occidental, y además, que en el mismo lugar varía con el curso de los siglos. Hoy en París la declinación es occidental y viene á ser igual á unos $16^{\circ} 56'$, es decir, que el plano vertical que pasa por los polos de la aguja imanada—plano que se llama *meridiano magnético*—forma con el plano meridiano geográfico ó meridiano un ángulo de 17° próximamente. Uno de los polos de la aguja está casi dirigido al NNO.

Es muy fácil comprobar con una aguja de coser imanada esta constancia en la dirección de los imanes suspendidos libremente en un plano horizontal. Colocándola sobre un pequeño flotador de corcho puesto en un agua perfectamente tranquila, la aguja, sin desviarse horizontalmente, gira sobre sí misma y toma la dirección que acabamos de indicar. Recordemos que, por otra parte, hay entre los dos polos de la aguja una diferencia muy caracterizada; porque, si cuando está en equilibrio se la vuelve de modo que sus extremos ocupen puntos diametralmente opuestos, no conserva esta nueva posición, aun cuando la dirección que se le haya dado sea idéntica á la primera; en este caso se la ve girar sobre sí misma, describir una semicircunferencia y recobrar su posición anterior, de suerte que siempre vuelve al Norte el mismo polo.

Si en vez de poner la aguja imanada de modo que pueda girar libremente en un plano horizontal, se la suspende por su centro de gravedad alrededor de un eje horizontal, también podrá girar libremente en un plano vertical. Supongamos que este plano sea el meridiano magnético; entonces el polo que miraba al Norte se inclina y baja

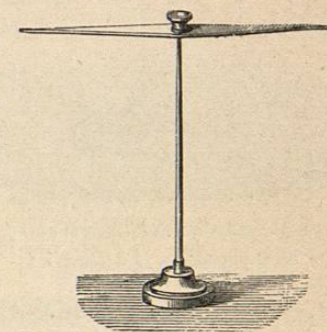


Fig. 18.—Aguja imanada

más que la línea del horizonte, formando con este plano un ángulo que se llama *inclinación magnética*. En ciertas regiones de la Tierra inmediatas al Ecuador la inclinación es nula; por lo regular aumenta con la latitud, habiendo en las regiones polares puntos en que este ángulo es recto, por mantenerse allí la aguja imanada en posición vertical. Si pasamos al hemisferio Sur, reconócese también que á partir de los puntos en que la

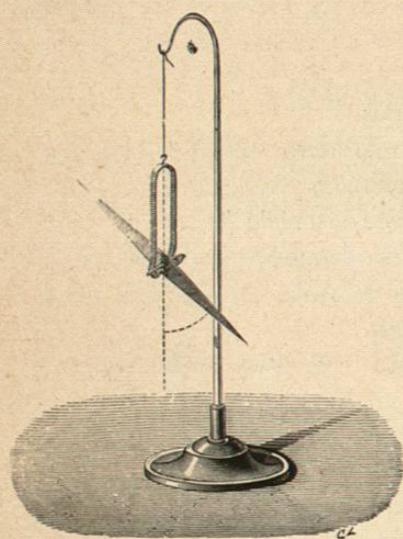


Fig. 19.—Aguja imanada marcando á la vez la inclinación y la declinación

inclinación es nula va creciendo con la latitud; pero entonces no es ya la misma punta de la aguja la que se inclina hacia el suelo, sino que es el extremo Sur el que baja á medida que nos acercamos al polo austral de la Tierra.

Puédese arreglar una aguja imanada de modo que se coloque por sí misma en el meridiano magnético, y se incline hacia el horizonte como acabamos de decir. La figura 19 representa esta disposición: como se ve, la aguja puede girar alrededor de un eje horizontal que pasa por su centro, cuyo eje está apoyado en una horquilla suspendida de un hilo sin torcer. El conjunto empieza por oscilar hasta que la aguja está en el plano magnético, y allí queda inclinada en una posición constante, formando con la vertical un ángulo igual á la inclinación del lugar. Pronto tendremos ocasión de describir los instrumentos

con los cuales se puede medir con precisión la inclinación y declinación de la aguja imanada.

Vese por lo que precede que un imán suspendido libremente por su centro de gravedad, es decir, sustraído á la influencia de la gravedad, toma en el espacio una dirección fija, particular á cada lugar, dirección que, según hemos dicho, puede variar con el tiempo.

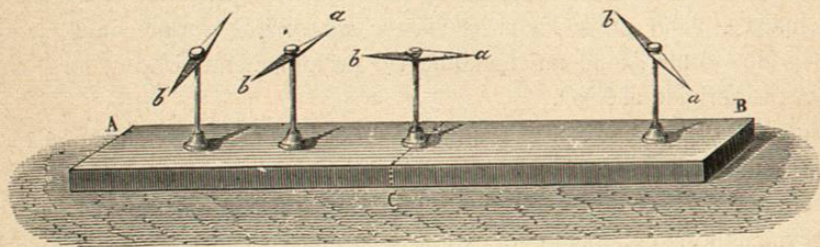


Fig. 20.—Acción de un imán sobre la aguja imanada

¿Cuál es la causa de esta fijeza en la dirección de la aguja imanada? En un principio se creyó que estaba fuera de la Tierra, y Cardán supuso que la fuerza directriz residía en una estrella de la Osa mayor; pero en su tiempo se conocían imperfectamente los fenómenos magnéticos. Gilbert fué el primero que formuló la hipótesis, admitida aún en la actualidad, que asimila el globo terráqueo entero á un imán cuya línea neutra está en los puntos en que la inclinación es nula, y sus polos situados en una y otra de las regiones polares de la Tierra.

He aquí en qué serie de experimentos está basada esta analogía.

Coloquemos sucesivamente una aguja imanada en los varios puntos del eje ó de la línea de los polos de una gruesa barra imanada (fig. 20): en todas estas posiciones, el eje de la aguja y el del imán fijo se hallarán en el mismo plano, y los polos de nombre contrario vueltos hacia el mismo lado. Si la aguja estuviese sola, se volvería en el sentido del meridiano magnético. La acción directriz de la barra prevalece, pues, en este caso sobre la acción directriz de la Tierra, en razón de la escasa distancia de los polos del imán fijo comparada con la del imán terrestre.

Compruébase además que si la aguja puede moverse alrededor de un eje horizontal, queda paralela al eje de la barra cuando su centro está sobre la línea neutra; que se inclina hacia el polo al cual se la acerca, bajando hacia él su polo de nombre contrario, y que el ángulo de inclinación es tanto mayor cuanto más cerca de uno ú otro polo está la aguja.

Se puede hacer el mismo experimento en la forma que representa la figura 21. Colócase una brújulita en los diversos puntos de una circunferencia que simula un meridiano terrestre, y un imán AB puesto en el diámetro de esta circunferencia figura el imán terrestre. En estas posiciones sucesivas, la aguja inclina siempre uno de sus extremos hacia el polo contrario más próximo, y la inclinación va creciendo desde el punto medio, es decir, desde el ecuador E, en que es nula, hasta las extremidades boreal y austral P y P' del meridiano, esto es, en puntos inmediatos á los polos de la Tierra. Los experimentos que acabamos de describir demuestran que la aguja imanada se conduce relativamente al globo terráqueo considerado como un imán del mismo modo que en presencia de un imán bastante poderoso é inmediato para contrabalancear la acción de la Tierra.

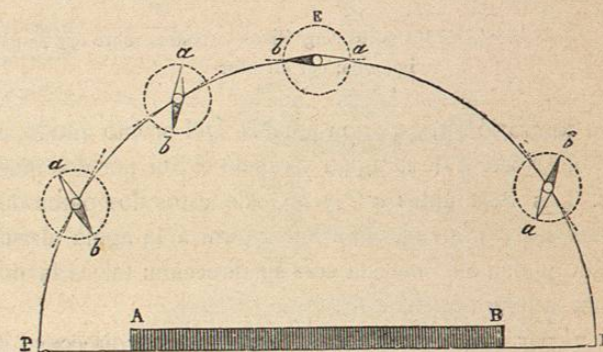


Fig. 21.—Asimilación del globo terráqueo á un imán

He aquí otros hechos que militan también en favor de esta teoría. Un imán actúa sobre el hierro dulce descomponiendo por influencia el fluido que contiene. El imán terrestre ejerce una acción semejante en las barras de hierro que se colocan verticalmente, y esta imanación pasajera es la más fuerte, si la barra, en lugar de estar vertical, se coloca en el meridiano magnético paralelamente á la aguja de inclinación. Más adelante veremos cómo se puede hacer permanente el magnetismo transitorio que desarrolla esta influencia del imán terrestre sobre una substancia magnética.

La acción de la Tierra sobre los imanes es simplemente *directriz*; no puede imprimirles, y no les imprime en efecto, ningún movimiento de traslación, lo cual es fácil de comprobar poniendo una aguja imanada en un corcho flotante. Hemos visto ya que la aguja se vuelve entonces en la dirección constante del meridiano magnético del lugar, pero sin cambiar de lugar en ningún sentido. Si la acción de la Tierra fuese una fuerza sola, este experimento probaría ya que dicha fuerza no tiene componente *horizontal*: tampoco la tiene *vertical*, porque entonces esta componente obraría en el sentido de la gravedad y por consiguiente alteraría el peso. Pero si se pesa con cuidado una barra de acero y se la imana en seguida, se verá después de la imanación que el peso no ha