

aumentado ni disminuído. Este experimento, que da el mismo resultado en cualquier dirección en que se coloque la aguja, data del tiempo de Gilbert.

Así pues, no se puede asimilar la acción directriz de la Tierra más que á la de dos fuerzas opuestas, paralelas é iguales, ó sea á lo que se llama un *par*. La hipótesis del globo terráqueo identificado con un imán gigantesco cuyos dos polos estuvieran situados en las regiones polares é inmediatos á los polos astronómicos, resulta así justificada. Y en efecto, una aguja imanada suspendida libremente en un punto de la superficie de la Tierra está sujeta en cada uno de sus polos á las acciones opuestas de los polos

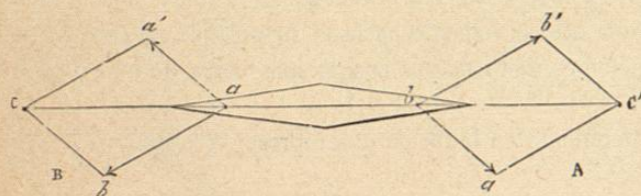


Fig. 22.—Acción de los polos magnéticos terrestres sobre una aguja imanada: par director

del imán terrestre; el polo Sur *b* de la aguja es atraído y el Norte *a* repelido por la fuerza magnética del polo austral terrestre; y como las dimensiones de la aguja son infinitamente pequeñas con relación á la distancia de este polo, las dos fuerzas de sentido contrario *ba*, *aa'*, son iguales. Del propio modo, el polo boreal terrestre *B* atrae el polo Norte *a* de la aguja y repele el Sur por dos fuerzas *ab* y *bb'* iguales y opuestas. Las resultantes *aC* y *bC'* de estos dos pares de fuerzas serán, pues, iguales y opuestas, y propenderán á hacer girar á la aguja alrededor de su centro de gravedad hasta que su eje coincida con su dirección: tal es la posición de equilibrio que representa la figura 22.

El par director varía de intensidad y de dirección, según la posición geográfica del lugar en que está la aguja imanada, es decir, según la dirección que esta aguja ocupa relativamente á los polos del imán terrestre. Así se explican las variaciones de los ángulos de declinación y de inclinación que el observador advierte á medida que cambia de lugar en la superficie de la Tierra.

III

LEY DE LAS ATRACCIONES Y DE LAS REPULSIONES MAGNÉTICAS

Los imanes actúan unos sobre otros, ya por repulsión cuando se ponen en presencia sus polos de igual nombre, ya por atracción cuando estos polos son de nombre contrario. El sentido de los movimientos está, pues, indicado por esta primera ley de las repulsiones y atracciones magnéticas; pero esta ley no dice cómo varían las intensidades de las fuerzas cuando se hace variar la distancia que separa sus puntos de aplicación, es decir, los polos de los imanes que están frente á frente.

Coulomb logró comprobar prácticamente la ley de estas variaciones, la cual fué en un principio formulada por Lambert y que puede enunciarse de este modo:

Las atracciones ó repulsiones que los polos de dos imanes ejercen uno sobre otro están en razón inversa del cuadrado de la distancia que separa dichos polos.

Para comprobar la exactitud de esta fórmula, Coulomb se valió de un aparato análogo á la balanza de torsión que le había servido para medir las fuerzas eléctricas y de la cual nos ocuparemos en su lugar: dicho aparato es la balanza magnética representada en la figura 23.

Consiste en un fanal de vidrio rectangular ó cilíndrico, que lleva en su superficie exterior una cinta con divisiones que representan grados y sirven para medir los ángulos que describiría una línea trazada en su plano y que pasara por su centro. En el plano de estas divisiones hay una barra imanada suspendida de un hilo, de modo que su centro de gravedad coincide con el de la circunferencia. El hilo de suspensión penetra exteriormente en un cilindro de vidrio adaptado á la parte superior de la caja, y se enrolla en un pequeño eje horizontal sostenido en dos pies que forman parte de una placa ó disco movable. Esta placa reposa á frotamiento suave sobre un micrómetro cuyas divisiones sirven para medir el ángulo de torsión del hilo, cuando se le hace girar sobre sí mismo por medio de dicha placa ó disco.

Véase cómo se hace uso del aparato de Coulomb para comprobar la ley de las repulsiones magnéticas.

Empiézase por determinar la posición de equilibrio del hilo, es decir, la posición en la cual no experimenta ningún efecto de torsión. Se obtiene este resultado sustituyendo provisionalmente la barra imanada por otra no imanada del mismo peso, y tomando nota de la división del círculo en la cual se detiene. Entonces se vuelve á poner en su sitio el primer imán, que, por efecto de la fuerza directriz de la Tierra, se sitúa por sí mismo en el meridiano magnético, dirección que forma cierto ángulo con la primera. Claro está que si se corre el micrómetro este mismo ángulo en sentido contrario al del movimiento que ha efectuado el imán, este último queda en el meridiano magnético, pero el hilo ha vuelto á su posición de equilibrio, y en tal momento la torsión es nula.

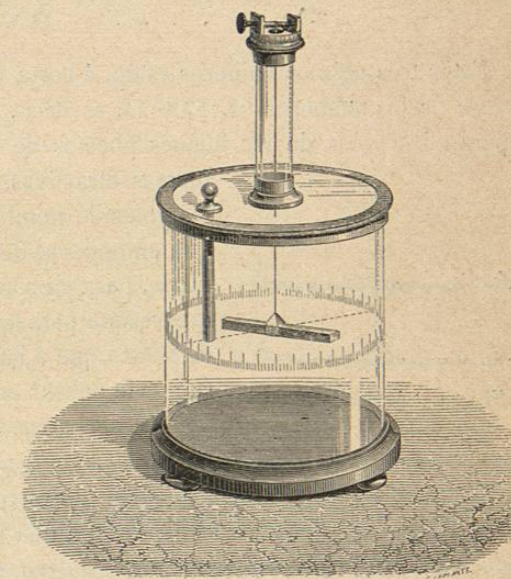


Fig. 23.—Balanza magnética de Coulomb

Hecho esto, se separa el imán de esta posición inicial, es decir, del meridiano magnético, por medio de un movimiento impreso al micrómetro: supongamos que la separación sea de 2° y que el micrómetro haya corrido 72° ; la diferencia 70° representa la fuerza de torsión del hilo, la cual equilibra la fuerza directriz de la Tierra. Para obtener doble desviación, esto es, 4° , sería preciso correr el micrómetro 144° ; la fuerza de torsión sería entonces 140° , es decir, doble de la primera. Por lo general, Coulomb ha averiguado que la fuerza de torsión es proporcional al ángulo de torsión y que la fuerza directriz de la Tierra se mide, en este caso particular, por 35° de torsión del hilo por cada grado de desviación de la barra imanada. Con una barra de diferente potencia sería distinto este último número, sin que dejase de haber proporción entre la fuerza directriz y el ángulo de torsión del hilo.

Después de haber efectuado estos experimentos preliminares, Coulomb pasó á estudiar las influencias recíprocas de los imanes. Colocada en el meridiano magnético la barra imanada suspendida, introdujo por una abertura de la cara superior del fanal otra barra imanada, bajándola verticalmente para poner frente á frente los polos del mismo

nombre de los dos imanes. Al punto se dió á conocer la repulsión magnética; la barra movable se desvió de la primera cierto ángulo, ó sea uno de 24° . Girando el micrómetro dos circunferencias, Coulomb puso la barra en una nueva posición, esto es, á 17° del meridiano magnético, y luego otra vez cinco circunferencias, la llevó á 12° .

En cada una de estas tres posiciones, la fuerza repulsiva de los dos imanes equilibraba dos fuerzas, la directriz de la Tierra, que se obtiene multiplicando 35° por la desviación de la barra, y la de torsión indicada por la rotación micrométrica, aumentada con la desviación de la barra. Así pues, para medir esta fuerza repulsiva en las tres posiciones del experimento, tenemos:

1. ^a posición.	$24 \times 35^\circ + 24^\circ$	ú 864°
2. ^a "	$17 \times 35^\circ + 17^\circ + 1080^\circ$	ó 1692°
3. ^a "	$12 \times 35^\circ + 12^\circ + 2880^\circ$	ó 3312°

Estos tres últimos números están, á corta diferencia, en razón inversa de los cuadrados de los números 12, 17 y 24, es decir, de los cuadrados de las distancias que separan los polos de los imanes puestos de frente. Del mismo modo se miden las

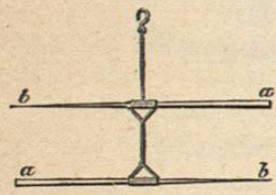


Fig. 24.—Agujas astáticas

fuerzas atractivas, poniendo el imán vertical de modo que los polos de nombre contrario estén frente á frente. Sólo que entonces se debe correr el micrómetro en sentido contrario, para desviar los polos á varias distancias. La ley que resulta para las fuerzas atractivas es también la misma, de suerte que á las dos leyes que acabamos de comprobar se puede aplicar este enunciado común:

Las atracciones y repulsiones de los polos de dos imanes están en razón inversa de los cuadrados de las distancias que los separan.

Coulomb ha comprobado también por otro método la ley que dejamos enunciada: este método es el de las oscilaciones. Si á una aguja imanada libremente suspendida se la desvía de su posición de equilibrio, es decir, del plano del meridiano magnético, y en seguida se la abandona á sí misma, oscila como un péndulo. Supongamos que se cuenta el número de oscilaciones efectuadas por segundo. Si colocamos ahora verticalmente en el meridiano magnético un imán con uno de sus polos inmediato al polo de la aguja, y cuya longitud sea la suficiente para que se pueda considerar que el polo opuesto no influye de modo alguno en la aguja, las oscilaciones de ésta aumentarán en número. Comparando los cuadrados de los números de oscilaciones en ambos experimentos, se tendrá la relación de las fuerzas magnéticas que actúan sobre la aguja imanada. Se repetirá el experimento poniendo sucesivamente el imán á distancias dobles, triples, etc., y se contarán de nuevo los números de oscilaciones. Eliminando la fuerza magnética terrestre, quedará la relación entre las fuerzas magnéticas del imán en las distancias experimentadas, con lo cual se vuelve á deducir la misma ley de la razón inversa del cuadrado de la distancia.

Más sencillamente se obtiene el mismo resultado con una aguja imanada llamada *astática*. Dase este nombre á un sistema de dos agujas iguales, de la misma intensidad magnética, fijas paralelamente en una misma montura, y enfrente uno de otro los polos contrarios. Este sistema se halla libre de la acción directa de la Tierra, que actúa en sentidos opuestos sobre los polos que están de frente, y por consiguiente los cuadros de sus oscilaciones en presencia de un imán representan las fuerzas magnéticas de éste, sin que sea menester eliminar la acción de la Tierra.

IV

DISTRIBUCIÓN DEL MAGNETISMO EN LOS IMANES

Los dos métodos que sirvieron á Coulomb para formular la ley general de las atracciones y repulsiones magnéticas le permitieron estudiar la distribución de la fuerza magnética de un imán, es decir, la variación de esta fuerza de una punta á otra de la barra imanada.

Sea AO una de las mitades de un imán prismático que tenga reducidas dimensiones transversales comparativamente á su longitud; O es su mitad ó su línea neutra, y A la

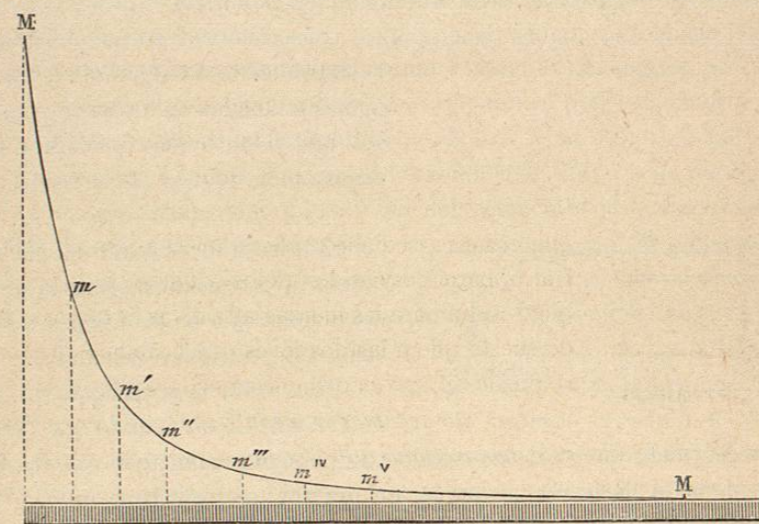


Fig. 25.—Distribución del magnetismo en un imán

extremidad inmediata á uno de los polos. Coulomb ha reconocido que la fuerza magnética, nula en la parte media, va creciendo, al principio muy despacio, pero en seguida con tanta mayor rapidez cuanto más se acerca al polo. Representando las fuerzas magnéticas por ordenadas perpendiculares al eje de la barra, se obtiene para figurar la ley de la distribución una curva como $M m M$ cuya ordenada mayor corresponde al extremo de la barra.

En un imán entero, la curva se compondrá de dos brazos con frecuencia iguales, uno de los cuales se deberá trazar en sentido inverso al otro (fig. 26), para expresar la oposición de las acciones ejercidas á una y otra parte de la línea neutra, ó si se quiere la diferencia específica de los dos fluidos libres en cada mitad del imán (1).

No siendo los polos otra cosa sino los puntos de aplicación de las resultantes de las

(1) Merced á los espectros magnéticos obtenidos con partículas de limaduras de hierro que se agrupan alrededor de los polos de una barra imanada, se puede formar una idea de la distribución magnética en los diferentes puntos de la misma; la convergencia de las curvas indica claramente la posición de los polos ó de los puntos de aplicación de las resultantes de las fuerzas magnéticas; las longitudes de las filas en los varios puntos de la longitud de la barra están en razón inversa de la intensidad de estas fuerzas. Pero ninguna de estas indicaciones tiene la precisión que resulta de las mediciones directas efectuadas por el método de Coulomb ó por otros más recientes.

fuerzas magnéticas en cada mitad de la barra, se averigua su posición proyectando sobre el eje el centro de gravedad del área de cada una de las curvas. Coulomb ha deducido que la curva de distribución del magnetismo es la misma en imanes de longitud diferente, con tal que esta longitud exceda de 20 centímetros; pero el espacio neutro en que la intensidad magnética es perceptiblemente nula, y que forma la parte media de la barra entre las dos curvas, es mayor ó menor; siéndolo tanto más cuanto más excede á su vez de 20 centímetros la longitud del imán. Ha averiguado también que los polos de los imanes que pasan de esta dimensión están siempre á igual distancia de los extremos, la cual es de unos 4 centímetros. Las curvas de los imanes más pequeños se reducen á líneas rectas inclinadas sobre el eje y atravesando la parte media, en cuyo caso los polos se hallan situados casi en el tercio de la longitud de la barra.

Todas estas investigaciones se refieren á imanes cilíndricos ó prismáticos imanados regularmente; cuando los imanes tienen puntos consecuentes ó son de distintas formas,

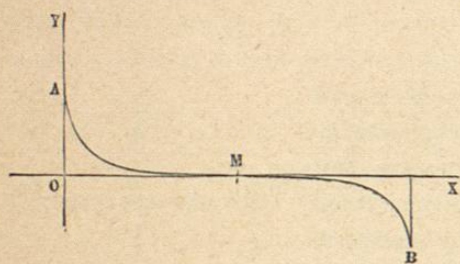


Fig. 26.—Curva completa de la distribución magnética

la distribución no sigue la misma ley. Las agujas imanadas en forma de rombo tienen sus polos tanto más próximos al centro cuanto menos largo es el rombo.

El físico francés Jamín ha hecho importantes investigaciones sobre la distribución del magnetismo en los imanes: vamos á resumir sus principales resultados.

Para medir la potencia de un imán, Jamín se vale de un método que "consiste en

colocar sobre el punto que se desea estudiar un pequeño contacto de prueba, de hierro dulce, y en medir la fuerza de arranque, en gramos, merced á un muelle graduado que se distiende poco á poco. Pero como esta fuerza depende del grueso y de la forma de dicho contacto, es necesario fijar sus dimensiones, si se quiere referir todas las medidas á una unidad determinada y que se pueda reproducir fácilmente. M. Jamín toma por unidad la fuerza correspondiente á un alambre de un milímetro cuadrado de sección y de longitud indefinida. En la práctica, se sirve de una esferilla de hierro dulce suspendida de la cruz de una balanza y puesta en contacto con la superficie del imán. En el otro brazo de la balanza funciona el muelle que se va distiendiendo y enrollando á un eje que lleva un círculo graduado, hasta que sobreviene el arranque. De este modo se puede medir en cada punto de la superficie del imán la fuerza necesaria para el arranque de la esferilla de hierro dulce. Este procedimiento es el que se conoce con el nombre de *clavo de prueba*, y gracias á él se pueden trazar las curvas de distribución del magnetismo en un imán (1). Formando haces de un número creciente de placas (2), Jamín ha comprobado que las curvas se elevan á medida que el número de aquéllas aumenta; pero sus dos partes se acercan una á otra y á la parte media del imán. En cierto momento se reúnen en el medio. "A partir de este momento, dice, el haz ha llegado á su máximo, y aunque se añadan placas no varía su intensidad en cada

(1) Siendo la fuerza de arranque proporcional al cuadrado de la intensidad magnética, se pasa fácilmente de una á otra.

(2) Coulomb y Nobili habían estudiado ya el estado magnético de los haces formados de láminas superpuestas, y averiguado que reaccionan unas sobre otras, de suerte que su fuerza magnética dista mucho de crecer con el número de láminas.

punto: si se le deshace para estudiar separadamente cada una de las filas que lo componían, se ve que han perdido una parte tanto mayor de su imanación primera cuanto más placas se habían colocado. En resumen, cualquier aumento en el número limitado de placas es enteramente inútil, y no se hace más que gastar infructuosamente el acero. M. Jamín da el nombre de *imán normal* al haz formado de este modo, el cual posee la notable propiedad de que la curva de las intensidades magnéticas se reduce á una recta, y sus polos están en el tercio de la semilongitud. Este es el caso, reconocido por Coulomb, en que los imanes de 2 líneas ($4^m,5$) de diámetro no tienen más que 5 á 6 pulgadas (135 á 162^m) de longitud.

El número de placas del imán normal va creciendo con su longitud; es de 3 ó 4 por 100 milímetros, de 6 á 8 por 200, de 9 á 14 por 300. Es difícil precisar más, porque la fuerza, que al principio crece rápidamente con el número de láminas, en seguida pasa muy despacio al máximo.

¿Cómo se distribuye la fuerza magnética por el interior de un imán, por ejemplo de una barra magnética? De los experimentos de Coulomb se podía inferir que la intensidad de dicha fuerza va disminuyendo de fuera adentro, y en efecto, M. Jamín ha probado que la imanación penetra en el acero á profundidad finita, y ha averiguado además el límite de esta profundidad y la ley del decrecimiento de la intensidad desde la superficie hasta este límite. Considera una barra imanada como si estuviera compuesta de filetes ó cadenas elementales, formadas de pequeños imanes que se siguen y se unen por sus polos contrarios. Estos filetes son inactivos en toda su longitud, excepto en cada extremo, donde hay un solo polo libre. En las barras prismáticas se extienden paralelamente al eje hasta los extremos en los cuales se desparraman divergiendo. Los experimentos hechos en series de láminas de acero de espesor creciente le demostraron que los filetes elementales penetran á 3 ó 4 milímetros de profundidad, de lo cual dedujo que no hay imanación en el centro de una barra gruesa de acero; los filetes elementales no empiezan á aparecer hasta unos 3 ó 4 milímetros de distancia de su superficie, pero se multiplican y oprimen cada vez más contra su superficie libre.

Resulta de aquí que, después de una imanación determinada, los filetes magnéticos cuyo conjunto constituye el imán son en número proporcional á la profundidad en que la imanación ha penetrado y al perímetro de la sección media. "Si el perímetro aumenta ó disminuye, dice Jamín, este número crece ó decrece proporcionalmente; por consiguiente, la cantidad de magnetismo del imán está regulada exclusivamente por la sección media y no depende en modo alguno de la forma y de la extensión en longitud de los aceros. Hay sin embargo una condición, y es que estos filetes hallan hacia los extremos superficies polares suficientemente extensas para dilatarse por ellas. Si el acero es muy largo, los polos elementales se relegan á los extremos, y las dos curvas de intensidad magnética distan mucho entre sí. Si la longitud disminuye, estas curvas se acercan sin modificarse y sin que la cantidad de magnetismo cambie, y si el acero disminuye sin cesar, acaban por encontrarse. A partir de este momento, se penetran, se transforman en dos rectas opuestas, y su área, que expresa la cantidad de magnetismo, disminuye.

„Explico estos hechos diciendo que, en el primer caso, los filetes magnéticos disponen de más sitio del que necesitan para extenderse. Cuando las curvas se tocan, tienen justamente el sitio que les es menester, y recíprocamente, el número de los polos elementales de los filetes que pueden recibir las superficies polares es precisamente igual al que puede caber en el perímetro medio. En este caso el imán es perfecto, está lleno;

en el anterior, la superficie lo estaba imperfectamente. Ahora, si se reduce todavía la longitud, los filetes más cortos desaparecen, porque sus dos polos se reúnen y la cantidad de magnetismo decrece por insuficiencia de sitio para la distribución de los polos elementales. En el primer caso el perímetro medio era muy pequeño, en el segundo es sobrado grande, y el caso intermedio ofrece precisamente la superficie polar que conviene á la dilatación ó extensión de los polos.

„Por lo común la barra se imana sólo superficialmente; si se imanara por igual en toda su masa hasta su eje, el número de los filetes magnéticos sería proporcional á la superficie de la sección media. Se llega aproximadamente á esta proporción dividiendo el acero en láminas tenues que se imanan por separado superponiéndolas en seguida; el número de filetes aumenta entonces proporcionalmente al de láminas, y como las superficies no cambian sino por aumento de espesor, en breve se llenan de magnetismo; las curvas de intensidad se reúnen en medio, y el imán queda lleno en todas sus dimensiones, puesto que, por un lado, la sección media está imanada profundamente, y por otro, las curvas de intensidad llenan las superficies exteriores. Vese también por qué los haces magnéticos son superiores á los imanes formados de una sola pieza cuyo espesor fuese igual á la suma de los espesores de las láminas.,

Estas deducciones están basadas en numerosísimos experimentos, y si las consignamos aquí detalladamente, no es tan sólo por el interés que tienen para la teoría del magnetismo, sino también porque han inducido á su autor á dar reglas nuevas para la construcción de sus *contactos* y *armaduras*. En el capítulo siguiente volveremos á ocuparnos de ellas; pero antes terminaremos este artículo con una cita de Jamín en la que este físico trata de la fuerza coercitiva.

Para él, la definición habitual de la fuerza coercitiva es vaga y no descansa en ningún experimento definido. Discurrida para expresar, bajo el punto de vista magnético, la diferencia entre el hierro y el acero, la dificultad que presenta el metal para la imanación y la resistencia que opone á las causas de desimanación, júzgase que dicha fuerza debe servir de explicación á propiedades que, según Jamín, “se pueden resumir de una manera tan sencilla como clara, diciendo que el hierro dulce es buen conductor de las tensiones magnéticas y que el acero lo es tanto menos cuanto mayor dureza tiene.” “Propongo, pues, dice, desechar la frase fuerza coercitiva sustituyéndola por la palabra conductibilidad, que, grande ó escasa, constituye la propiedad esencial del hierro y del acero y explica todos sus efectos. Por su cualidad de conductor, el hierro adquiere y pierde el magnetismo tan luego como interviene ó cesa una causa exterior; por la misma razón transporta á través de un contacto las tensiones opuestas de dos polos y hace que el imán vuelva á neutralizarse; y por igual motivo sirve también, cuando se le añaden armaduras cuidadosamente aplicadas, para reunir y transportar á masas polares inmediatas el magnetismo diseminado por las superficies de los imanes naturales. Por el contrario, á causa de su poca conductibilidad, retiene el acero separadas en los extremos de una barra las tensiones contrarias que son tanto más poderosas cuanto más larga es aquélla. Del propio modo se explica la necesidad de las fricciones para la imanación á fin de actuar en cada punto y suplir la conductibilidad que falta, la imposibilidad de hacer contactos con el acero, y por último la diferencia de tensión que subsiste entre este metal y el imán puesto en contacto con él.,

La teoría de los dos fluidos, que acabamos de exponer de un modo elemental en este capítulo, fué concebida antes del descubrimiento de los hechos que han enlazado definitivamente los fenómenos del Magnetismo con los de la Electricidad. Basta para ex-

plicar las principales propiedades de los imanes, sus atracciones y repulsiones mutuas, su acción sobre las substancias simplemente magnéticas, como el hierro dulce; y también para dar cuenta de lo que ocurre cuando se ponen en práctica los procedimientos de imanación artificial cuya descripción será objeto del siguiente capítulo; en una palabra, basta para coordinar todos los casos descritos, demostrando que todos ellos pueden derivarse de un mismo principio.

Pero conviene insistir en un punto, á saber, que la teoría de los dos fluidos, de los elementos magnéticos y de la fuerza coercitiva, no es en realidad más que una hipótesis provisional que será preciso modificar y completar para explicar los efectos recíprocos de las corrientes eléctricas y de los imanes. Cuando hayamos descrito estos efectos en los capítulos consagrados al Electro-magnetismo, será la ocasión oportuna de decir qué hipótesis han sugerido.

CAPITULO III

PROCEDIMIENTOS DE IMANACIÓN

I

IMANACIÓN POR LOS IMANES NATURALES Ó ARTIFICIALES

Las substancias magnéticas puestas delante de los imanes ó en contacto con ellos adquieren por influencia las propiedades del magnetismo polar. Ya hemos descrito los experimentos que así lo prueban. ¿En virtud de qué procedimientos se consigue que estas propiedades sean permanentes, siendo así que por lo regular no subsisten sino mientras dura el contacto ó la presencia del imán? Vamos á decirlo.

En la teoría de los dos fluidos se admite que la separación de éstos exige la acción de una fuerza especial, la *fuerza coercitiva*, que, por lo demás, así se opone á su reunión cuando se los ha separado, como á su separación cuando se hallan en estado neutro. Pero ¿cómo nace ó se desarrolla la fuerza coercitiva? Entre las substancias magnéticas, es el acero muy templado el que más dotado está de ella; el acero recocado pierde su fuerza coercitiva (1). El hierro dulce carece de ella ó la tiene en cantidad muy escasa; pero si se cambia su estructura mediante una acción mecánica, como la percusión, la torsión, el temple, la fuerza coercitiva se desarrolla en él, y puede adquirir un magnetismo polar perceptible. Es por tanto probable que esta propiedad dependa más bien de la estructura del cuerpo, de su disposición molecular, que de su composición química.

Resulta de aquí que para obtener imanes artificiales se debe emplear con preferen-

(1) Si se aceptan las deducciones de M. Jamín, expuestas al final del capítulo anterior, se debe reemplazar siempre la expresión *fuerza coercitiva* por la de *conductibilidad magnética*. Por ejemplo, el hierro dulce, que no tiene fuerza coercitiva, está en cambio dotado de gran conductibilidad; el acero templado, que es el metal de fuerza coercitiva más enérgica, es poco ó nada conductor del fluido magnético. Cualquiera que sea la frase que se adopte, no se deberá ver en una ú otra expresión otra cosa sino un modo de representarse los hechos. Toda la ventaja de la sustitución propuesta por Jamín consiste en que de este modo aparecen más relacionados los efectos magnéticos con los eléctricos, con los cuales tienen aquéllos la mayor analogía, según veremos más adelante.