

atrevo á llamar *magnetismo atmosférico*, podremos hacer ostensibles y mensurables ciertas relaciones y variaciones magnéticas que ni siquiera sospechamos hoy.,,

Faraday dedicó al estudio de tan interesante cuestión dos Memorias en las cuales discute los efectos del calor y del frío en el magnetismo del aire, y la acción que debe resultar sobre la aguja imanada de los cambios de temperatura; dicho físico aplica los resultados de sus indagaciones á la explicación de las variaciones anuas, diurnas é irregulares, tal como las han comprobado las prolifas series de observaciones reunidas en los observatorios magnéticos. Posteriormente se han invocado otras causas, y en especial las cósmicas, como la periodicidad de las manchas del Sol; pero no creemos que sean necesariamente exclusivas de la causa aducida por Faraday, pues se puede suponer que el Sol ejerce ante todo su acción magnética en la atmósfera, y en el oxígeno que es una fracción importante de ella.

## VIII

## ACCIÓN DEL MAGNETISMO SOBRE LA LUZ POLARIZADA

Los primeros trabajos de Faraday sobre el diamagnetismo habían tenido por origen un descubrimiento interesante, del que vamos á decir algunas palabras; nos referimos al poder del magnetismo sobre la luz polarizada. He aquí cómo describe aquel físico el experimento que le reveló esta propiedad. Con objeto de perfeccionar la fabricación del vidrio empleado en óptica, había llegado á producir un vidrio pesado y de gran poder refringente (silico-borato de plomo), del cual se sirvió del modo siguiente: "Coloqué un fragmento de esta especie de vidrio, dice, cuyas caras eran planas y tersas, y de unos 26 centímetros cuadrados de superficie por 13 milímetros de grueso, entre los polos de un electro-imán no excitado por la corriente eléctrica, de suerte que el rayo polarizado pudo atravesarlo en su longitud. El vidrio obraba entonces como el aire, el agua ó cualquier otra substancia inactiva; si se ha vuelto previamente el analizador de modo que produzca la extinción del rayo polarizado ó haga invisible la imagen dada por este rayo, la introducción del vidrio no modifica en nada este estado de cosas. Pero si se excita la actividad del electro-imán, enviando la corriente eléctrica á las bobinas, la imagen de la lámpara de donde emana el rayo de luz *se hace al punto visible* y continúa siéndolo mientras dura la acción magnética. Tan luego como por la rotura del circuito la fuerza magnética cesa de obrar, la luz desaparece. Estos fenómenos podían renovarse á beneplácito, en cualquier momento y circunstancia, demostrando así claramente la dependencia de causa á efecto (1).,"

Estos experimentos se hicieron extensivos á una porción de cuerpos sólidos mono-refringentes, todos los cuales adquieren el poder rotatorio bajo la influencia del magnetismo, siendo muy poco sensibles los cristales dotados de doble refracción. De esta suerte se agregó un nuevo capítulo tanto á la óptica física como al magnetismo y á la electricidad.

Faraday y otros muchos físicos, entre los cuales mencionaremos á Verdet, han estudiado las leyes del movimiento rotatorio de la luz polarizada bajo la influencia de la

(1) En vez de emplear un electro-imán (que en este caso estaba excitado por cinco pares de Grove, y cada uno de cuyos polos sostenía hasta 26 kilogramos), Faraday repitió este mismo experimento con un buen imán permanente de acero de forma de herradura. Los resultados eran más débiles, pero suficientes para demostrar la identidad de acción de los imanes ordinarios y de los electros-imanos sobre la luz.

acción de los imanes. Si las expusiéramos aquí, traspasaríamos los límites del plan que nos hemos propuesto, por lo cual remitimos al lector deseoso de conocerlas al estudio de las Memorias especiales. Limitémonos, pues, á decir que la dirección en que se ejerce la rotación es, en muchas substancias, la misma que la de las corrientes eléctricas del electro-imán; sin embargo, Verdet ha demostrado que esta dirección es de sentido contrario en los compuestos de hierro, titano, lantano, cerio, y unas veces directa y otras inversa, en los de manganeso. Cuando el rayo luminoso, que se supone que penetra siempre perpendicularmente en el prisma, es paralelo á la línea de los polos, el ángulo de rotación es máximo, siendo tanto menor cuanto más se aparta esta dirección del paralelismo, para llegar á ser nulo en la dirección perpendicular. Esto supone que la intensidad magnética subsiste igual; si varía, el ángulo de rotación varía proporcionalmente, en igualdad de circunstancias.

A nadie le pasará inadvertida la importancia de estos fenómenos. La teoría condujo á Faraday al brillante descubrimiento del poder magnético de los imanes sobre la luz. Por esto creemos deber terminar este artículo reproduciendo el fragmento siguiente de sus deducciones generales, á fin de precisar mejor todo su alcance.

"De este modo quedan establecidas por primera vez, según creo, una relación, una dependencia verdaderamente directas entre la luz y las fuerzas eléctricas y magnéticas; de este modo se agrega un hecho importante á los hechos y á las miras que tienden á demostrar la comunidad de origen y el vínculo de todas las fuerzas naturales. Muy difícil es aún sin duda, dado el estado actual de la ciencia, decir con precisión lo que esperamos. He aseverado que, en virtud de estos experimentos, una de las fuerzas de la Naturaleza resulta directamente enlazada con otras fuerzas; quizás he debido decir que una de las formas del gran poder de la Naturaleza resulta distinta y directamente enlazada con otras formas; ó que este poder, patentizado en fenómenos particulares también, revela una vez más su identidad y se da también á conocer por la relación directa establecida entre su forma luz y sus formas electricidad y magnetismo.,,"

Día llegará, y tal vez no esté lejano, en que lo que pueda parecer vago y oscuro en estas opiniones del ilustre físico sea tan claro como lo es hoy la equivalencia de la fuerza mecánica y del calor, ó la transformación mutua de estas dos fuerzas.

## CAPITULO IX

## LA INDUCCIÓN

## I

## FENÓMENOS DE INDUCCIÓN POR LAS CORRIENTES

También es el nombre de Faraday el que se presenta unido al origen de los nuevos y notables fenómenos que se conocieron por vez primera hace más de cincuenta años, y que vamos á describir en este capítulo.

Faraday descubrió en el mes de noviembre de 1831 un hecho notable, y es que en el momento en que se introduce en un hilo metálico una corriente eléctrica, nace en un hilo inmediato, paralelo al primero y separado de él por un cuerpo aislador, otra corriente, pero de sentido contrario á la primera. La desviación espontánea de la aguja

de un galvanómetro con el cual comunica este hilo hace ostensible la existencia de la corriente desarrollada por influencia ó inducción. Verdad es que la nueva corriente cesa al punto, aunque la primera continúe circulando por el hilo principal; pero si se rompe éste, nace otra corriente instantánea en sentido inverso en el hilo paralelo, para cesar también inmediatamente. Dase á la corriente primitiva el nombre de *corriente inductora*; á la producida cuando ésta empieza, el de *corriente inducida inversa*, y á la que se desarrolla al romperse la corriente inductora, el de *corriente inducida directa* (1).

Los imanes engendran corrientes de inducción, lo propio que las corrientes voltaicas; sucediendo lo mismo, según lo demostró Marson en 1834, con las descargas de electricidad estática. Vamos á reseñar rápidamente los principales experimentos por medio de los cuales se comprueba esta nueva serie de fenómenos, después de lo cual describiremos los notables aparatos cuya construcción está basada en las leyes de la inducción, y que sirven hoy para producir electricidad con extraordinaria potencia.

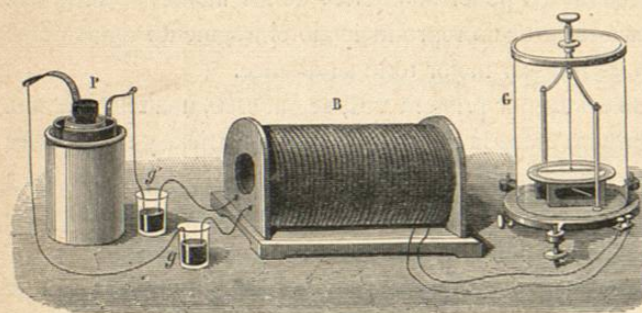


Fig. 222.—Inducción por una corriente

Para obtener corrientes inducidas un poco intensas, hay que dar á los hilos paralelos una longitud considerable. Se evita el inconveniente que de ello resulta, enrollando cada hilo recubierto de seda en un cilindro hueco, de cartón ó de madera. Los dos extremos del hilo van á parar á dos botones metálicos fijos en una de las bases del cilindro y que sirven para poner la hélice formada de este modo en comunicación con los dos reóforos de una pila ó con un galvanómetro.

Tomemos dos bobinas, una de mayor diámetro que otra, de modo que la más pequeña pueda penetrar en la cavidad cilíndrica de la mayor. Esta, que se pone en comunicación con un galvanómetro, será la *bobina inducida*; aquélla, que es la *bobina*

(1) Es interesante saber cómo descubrió Faraday la inducción, que ya habían hecho presuponer los experimentos de Ampère, hechos diez años antes. He aquí cómo refiere Tyndall tan importantísimo hecho:

“Faraday dió principio á sus experimentos sobre la inducción de las corrientes eléctricas haciendo una hélice con dos hilos aislados, los cuales enrolló paralelamente uno sobre otro en un mismo cilindro de madera. En seguida empalmó los extremos de uno de dichos hilos á los dos polos de una pila de diez elementos, y los extremos del otro á un galvanómetro muy sensible. Cuando quedó establecida la comunicación con la pila y circuló la corriente, no se notó efecto alguno en el galvanómetro; pero Faraday no se daba por satisfecho con un resultado hasta haber consumido en él toda su fuerza de voluntad. Aumentó los elementos de 10 hasta 20, pero sin éxito. La corriente circulaba tranquilamente por el hilo del circuito, sin producir á su paso ninguna desviación en la aguja del galvanómetro.

“*A su paso!* Precisamente durante este período esperaba obtener el efecto buscado. Pero la potencia de visión lateral de Faraday, que le permitió observar fuera de la línea de mira, vino en su auxilio, y el ilustre físico notó que la aguja hacía un ligero movimiento siempre que cerraba el circuito, que volvía en seguida á su posición de equilibrio y se mantenía tranquila, sin que influyese en ella la corriente que pasaba. Pero en el momento en que se rompía el circuito, la aguja se movía de nuevo, siquiera fuese entonces en dirección opuesta á la de la desviación observada al cerrar el circuito.

“Estos resultados y otros análogos le indujeron á deducir que al atravesar la corriente de la pila el primer hilo debía engendrar en el segundo una corriente semejante, la cual sólo duraba un momento, pareciéndose más en su naturaleza á la onda eléctrica emanada de una botella de Leyden ordinaria que á la corriente de la pila.” (Tyndall, *Faraday inventor.*)

*inductora*, se empalma, después de introducida en la primera, á los polos de un elemento Bunsen. Al cerrarse el circuito, la aguja del galvanómetro indica con su desviación que una corriente inducida inversa ha atravesado las espiras de la primera bobina; pero la aguja retrograda al punto, vuelve al cero después de oscilar un poco, y en él permanece mientras circula la corriente. Si se rompe entonces el circuito inductor, la

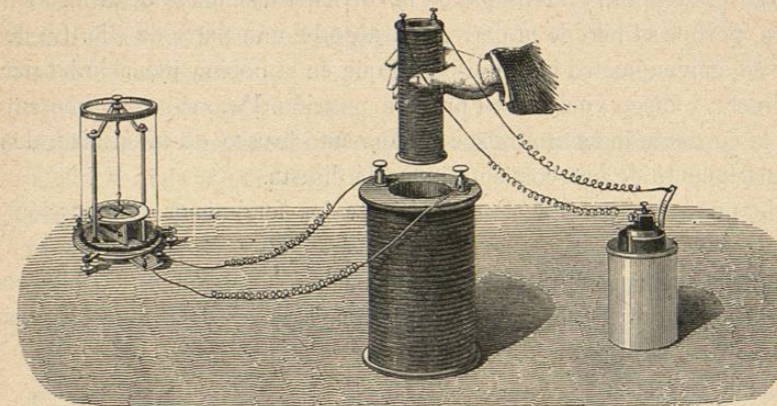


Fig. 223.—Inducción por la aproximación ó desviación de una corriente

aguja se desvía en sentido contrario, indicando por lo tanto el nacimiento de una corriente inducida directa. Luego vuelve otra vez al cero, y subsiste en él mientras el circuito está roto.

¿Qué demuestra este experimento? Que toda corriente voltaica desarrolla en un hilo conductor inmediato, en el instante en que comienza, una corriente inversa; en el momento en que termina, una directa; y por último, que su acción inductora es nula mientras dura la corriente inductora.

Supongamos ahora que la bobina inductora está en comunicación con la pila, y el circuito cerrado antes de acercar las dos bobinas una á otra, como lo muestra la figura 223. Si acercamos brusca-

mente la bobina inductora á la inducida, nace en ésta una corriente inversa, y así lo indica la desviación de la aguja del galvanómetro. Dicha corriente cesa al punto; pero si se retira entonces la bobina inductora, desarróllase una

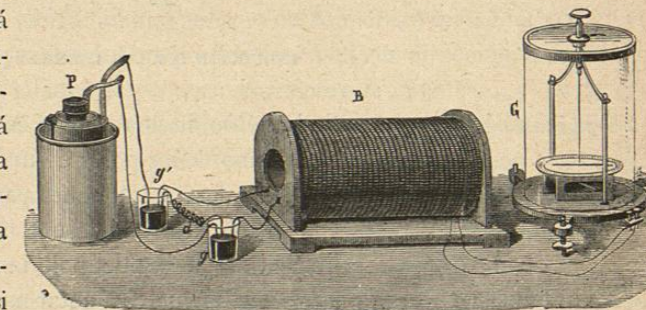


Fig. 224.—Inducción por la variación de intensidad de una corriente

corriente inducida directa, la cual cesa inmediatamente como la primera. En una palabra, todo ocurre como en el primer experimento, siendo aquí la inducción consecuencia del movimiento relativo del conductor y de la corriente.

Supongamos, por último, que se repiten los dos experimentos anteriores, pero que, en el intervalo que media entre el desarrollo de las dos corrientes inducidas opuestas, se aumenta la intensidad de la inductora; en el mismo instante en que tiene efecto este aumento, se desvía la aguja del galvanómetro que había vuelto al cero, indicando así el nacimiento de una corriente inducida inversa. Si por el contrario dis-

minuye la intensidad de la inductora, se produce una corriente directa en la bobina inducida.

Para efectuar este último experimento, se ponen en mutua comunicación dos puntos intermedios del circuito inductor, mediante un hilo de desviación  $d$  (fig. 224), cuyos extremos se introducen en el mercurio de los vasitos  $g$  y  $g'$ . En el momento en que se establece esta derivación, la intensidad de la corriente disminuye de pronto en la bobina inductora, porque el hilo de la derivación absorbe una parte de ella. La desviación de la aguja del galvanómetro indica al punto que en la bobina inducida ha nacido una corriente directa, y luego vuelve á su primera posición. Pero si se suprime entonces la derivación, la corriente inductora recibe un aumento brusco de intensidad, demostrándose así el nacimiento de una corriente inducida directa.

Se puede, pues, resumir del modo siguiente los fenómenos de inducción por una corriente:

Una corriente voltaica desarrolla por influencia ó inducción, en un hilo conductor inmediato, otra corriente de dirección opuesta á la suya, es decir, una *corriente inducida inversa*:

- 1.º Cuando empieza;
- 2.º Cuando se acerca;
- 3.º Cuando aumenta en intensidad.

La misma corriente produce otra *inducida directa*, ó de igual dirección á la suya:

- 1.º Cuando acaba;
- 2.º Cuando se aleja;
- 3.º Cuando disminuye de intensidad.

Ahora veremos que con las corrientes magnéticas, es decir, con los imanes se producen los mismos fenómenos, con lo cual la teoría de Ampère quedará confirmada de nuevo por los experimentos del ilustre Faraday.

## II

### INDUCCIÓN POR LOS IMANES

Pongamos los extremos de la hélice de una bobina en comunicación con un galvanómetro, y acerquemos de pronto uno de los polos de un imán al eje del cilindro de la bobina; la aguja del galvanómetro se desviará al punto para volver en seguida al cero. La dirección de la desviación indica el desarrollo de una corriente opuesta á la que, según la teoría de Ampère, representa la acción del polo inmediato á la bobina. Pero la corriente inducida cesa al punto, y no se vuelve á notar nada mientras continúa el imán cerca de aquella (fig. 225). Si de pronto se quita éste, la aguja del galvanómetro se desvía en sentido contrario, y después de oscilar un poco vuelve al cero, marcando por consiguiente el nacimiento de una corriente inducida directa.

Supongamos que antes de acercar el imán se ha introducido en la bobina un cilindro de hierro dulce (fig. 226). Si se aproxima uno de los polos del imán moviéndolo en la dirección del eje del cilindro, habrá inducción y nacimiento de una corriente inversa por dos razones: primera, porque la presencia del imán basta para producir la corriente inducida; y segunda, porque el hierro dulce se imana á su vez por influencia y ejerce cierta reacción sobre la hélice de la bobina. Lo que así lo prueba es que la desviación de la aguja del galvanómetro es mayor en este experimento que en el anterior.

La misma observación es aplicable á la corriente inducida directa, desarrollada en la bobina por la separación rápida del imán. Por último, si se varía la distancia del imán al hierro dulce, la imanación de éste aumenta ó disminuye, y se comprueba tanto en una como en otra circunstancia el nacimiento de corrientes inducidas opuestas.

En resumen, hay inducción de un hilo conductor por un imán y producción de una corriente inducida inversa:

- 1.º Cuando se acerca el polo magnético;
- 2.º Cuando se establece;
- 3.º Cuando su intensidad aumenta;

Por el contrario, hay producción de una corriente inducida directa:

- 1.º Cuando se aleja el polo magnético;
- 2.º Cuando se le destruye;
- 3.º Cuando su intensidad disminuye.

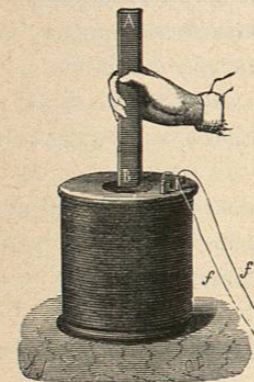


Fig. 225.—Inducción por un imán

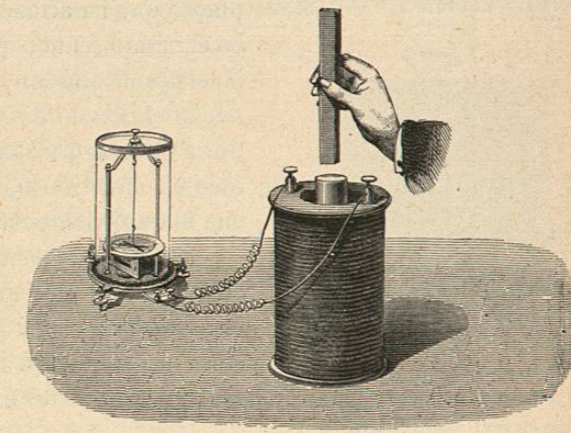


Fig. 226.—Inducción por el nacimiento ó desaparición de un polo magnético

Asimilada la Tierra, en la teoría del magnetismo de Ampère, á un gigantesco imán, ó más bien á un solenoide cuyas corrientes particulares van en dirección Este-Oeste, debe ser susceptible como los imanes de producir corrientes de inducción; y así sucede en efecto, habiendo confirmado los experimentos de Faraday esta previsión de la teoría. Cogiendo una hélice AB (fig. 227), cuyos extremos E y O formaban un eje alrededor del cual podía girar el sistema, colocaba este eje horizontalmente en dirección perpendicular al plano del meridiano magnético, y daba á la hélice una posición paralela á la aguja de inclinación. Entonces la imprimía un brusco movimiento de rotación alrededor de EO; un galvanómetro que comunicaba con los hilos de la hélice indicaba la generación instantánea de una corriente, cuya dirección cambiaba á cada semirrotación. Faraday había empezado por poner en la hélice una barra de hierro dulce que se imanaba por influencia de la Tierra, de suerte que ésta ejercía su acción inductora por intermedio de la barra. Pero como el movimiento de rotación y el cambio de dirección que de ello resultaban hacían variar la imanación de la barra, estas mismas variaciones engendraban corrientes inducidas de la misma dirección que las de la bobina, y al agregarse á éstas sus efectos se confundían.

Dase el nombre de *extracorriente* á una corriente inducida que se desarrolla por la acción de otra corriente sobre sí misma, es decir, sobre una parte de su propio circuito. Véase cómo aquel ilustre físico ha hecho evidente la extracorriente. Una pila P

envía una corriente á un circuito ACBD (fig. 228), empalmado con un hilo de derivación CD á un galvanómetro G. Por la influencia de esta corriente continua, la aguja del galvanómetro se desvía y toma una posición de equilibrio  $xy$ . Rómpele entonces el circuito en A, lo cual interrumpe la corriente; pero con una cala se conserva á  $xy$  en su posición para impedir que retroceda  $ab$ , posición que ocupaba antes de dar

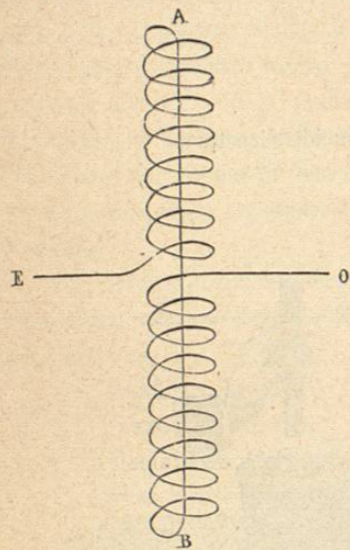


Fig. 227.—Acción inductora de la Tierra

paso á la corriente. Restablécese el circuito en A, y en seguida experimenta la aguja un exceso de desviación, para retroceder de nuevo á  $xy$ . Así pues, en el momento de restablecer el circuito, se ha formado en él una corriente más intensa que la ordinaria, lo cual no puede explicarse sino por la inducción de unas espiras de la hélice B sobre otras. La corriente inducida comprobada de tal modo circula, pues, en dirección CD, puesto que ha actuado sobre el hilo del galvanómetro en el mismo sentido que la corriente primaria; luego es inversa con relación á esta última. Si se rompiera de nuevo el circuito en A, resultaría una desviación contraria de la aguja, mantenida en  $ab$  por una cala colocada en dirección opuesta, indicando así el origen de una extracorrente directa.

Todos los fenómenos de inducción que acabamos de describir, y en general todos los que se han comprobado, cualquiera que sea su origen, están sujetos á leyes que se pueden refundir en un solo enunciado, el

cual se conoce con el nombre de *ley de Lenz*, del del físico ruso que ha dado su fórmula. He aquí este enunciado:

*Cuando cerca de una corriente ó de un imán se acerca ó aleja rápidamente un circuito ó conductor cerrado, se desarrolla en éste una corriente de tal sentido, que por la reacción de la corriente inducida sobre la corriente ó sobre el imán inductor, tiende á oponerse al movimiento. Lo propio sucede si se acerca ó aleja la corriente ó el imán, siendo el conductor el que permanece inmóvil.*

Terminemos este artículo explicando lo que se entiende por *corrientes inducidas de orden superior*. Estas son las engendradas por la acción inductora de las corrientes, inducidas á su vez por una de las causas anteriormente enumeradas. La experiencia demuestra que ciertas corrientes inducidas de esta primera categoría ó de *primer orden* pueden inducir en circuitos inmediatos corrientes de *segundo orden*, y así sucesivamente. Una corriente inducida de segundo orden, desarrollada por otras dos, una de las cuales por ejemplo acaba mientras la otra empieza casi en el mismo instante, está constituida por dos corrientes de opuestas direcciones, de suerte que sus efectos en la aguja del galvanómetro son nulos; pero no sucede así si se las hace actuar convenientemente sobre un voltámetro, pues en este caso una y otra producen desprendimientos de gas en los dos polos; pudiéndose también comprobar su influencia fisiológica, y observar por ejemplo las contracciones que producen en los músculos de una rana.

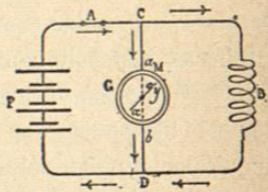


Fig. 228.—Experimento para demostrar la existencia de la extracorrente.

## III

## MAGNETISMO DE ROTACIÓN

Arago hizo en 1824 el siguiente experimento. Con objeto de averiguar la intensidad magnética de una aguja imanada, la hizo oscilar horizontalmente sobre un disco de madera que llevaba un círculo graduado. Habiendo repetido el mismo experimento valiéndose de un limbo de cobre, vió que la disminución de amplitud era mucho más rápida en este caso que en el primero; la duración de las oscilaciones no había variado, pero se necesitaba menos número de ellas para tener la misma reducción de amplitud. Con un disco macizo de cobre el efecto fué aún más marcado; cuando la aguja estaba suspendida á muy corta distancia de la superficie metálica, bastaban tres ó cuatro oscilaciones para que se parase, al paso que se las contaba por centenares cuando no había disco.

Arago reemplazó el disco de cobre con otros de varias substancias, y vió que la energía del fenómeno dependía de la naturaleza de éstas, siendo por lo común mayor con los cuerpos conductores, como los metales. Sin embargo, el agua, el hielo y hasta el vidrio amortiguaban las oscilaciones de la aguja.

En lugar de hacer mover la aguja, ocurriósele á Arago poner en movimiento el disco sobre la que estaba suspendida. Su previsión quedó confirmada, pues la aguja se desvió en el sentido de la rotación. Conforme crecía la velocidad del platillo, aumentaba la desviación; y cuando llegaba á los  $90^\circ$ , la aguja adquiría un movimiento continuo de rotación, menos rápido que el del disco, pero de igual dirección. Arago puso una hoja de papel entre la aguja y el disco giratorio, para impedir el movimiento de la capa de aire contigua que hubiera podido perturbar el fenómeno. El aparato de relojería que producía la rotación era enteramente de cobre, con lo cual se evitaba toda acción magnética ordinaria.

Se puede hacer el experimento con el aparato representado en la figura 229:  $aa$  es la aguja suspendida sobre un eje vertical;  $bb$  el disco giratorio que recibe su movimiento de rotación de una rueda de ángulo movida por un manubrio.

Los numerosos experimentos hechos han demostrado que la acción del disco en movimiento es tanto más enérgica cuanto mejor conductora la substancia de que está formado (siendo el efecto máximo con el hierro, es mínimo con el bismuto); que se debilita notablemente si el disco está calado, si tiene muchas soluciones de continuidad, como hendeduras en la dirección de los radios; y por último, que si se ponen los hilos de un galvanómetro en contacto con dos puntos del disco móvil, se nota el desarrollo de una corriente.

Dase el nombre de *magnetismo de rotación* al conjunto de estos fenómenos, cuya causa no se pudo comprender hasta que se descubrió la inducción. Faraday probó entonces que dimanaban de corrientes inducidas en el disco en movimiento, las cuales, por su reacción sobre la aguja, tienden á hacerla marchar en sentido de la rotación.

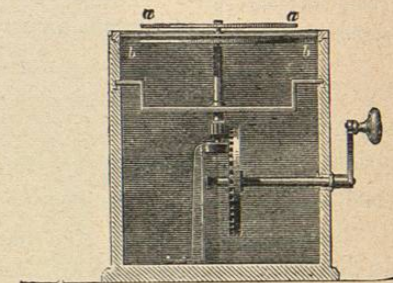


Fig. 229.—Aparato para desarrollar el magnetismo de rotación