

De la inexistencia de inercia electrónica en los conductores metálicos

por

José Alvarez López y Juan Carlos Chautemps

(Universidad Tecnológica Nacional e Instituto
de Estudios Avanzados).

PRESENTADO POR EL ACADÉMICO NUMERARIO D. JULIO PALACIOS

RESUMEN

Toda la bibliografía física publicada hasta este momento acepta como un hecho general de esta ciencia que las propiedades del electrón observadas en el vacío pueden ser extrapoladas para explicar el comportamiento del electrón en el interior de la materia. Como un hecho concreto, el valor de la masa electrónica en el vacío (8.1083×10^{-28} g) es adscrito a la masa de los electrones de valencia y aun a los electrones nucleares.

La base experimental que fundamenta este hecho generalmente aceptado parece residir en los experimentos efectuados por S. J. Barnett —hacia 1931 en el Instituto Tecnológico de California— de acuerdo con los cuales los efectos de inercia electrónica observados en una bobina de cobre correspondían al valor de la masa electrónica en el vacío. Pero experimentos de laboratorio recientemente efectuados por los autores muestran que no existe la más mínima traza de inercia electrónica en los conductores metálicos. La importancia de esta afirmación reside en la gran sensibilidad de los experimentos aquí descritos, que supera a la de los de Barnett por un factor del orden de 10^6 .

ANTECEDENTES

La primera afirmación científica en relación con las propiedades cinemáticas de la electricidad fue la de Maxwell (12) en su clásico «Tratado de electricidad y magnetismo», donde él establecía (parte IV, cap. VI, 569) que: «La corriente eléctrica puede ser con-

cebida únicamente como un fenómeno cinético.» Por esta razón, decidió Maxwell desarrollar toda la electrodinámica partiendo de esta base conceptual y utilizando las ecuaciones de Lagrange, que por su generalidad la ahorraban hipótesis en cuanto a la exacta naturaleza de los fenómenos eléctricos: «La naturaleza de los vínculos de este sistema nos es desconocida, pero como tenemos métodos mecánicos que no requieren el conocimiento de la naturaleza del sistema, nosotros los aplicaremos a este caso.» El éxito de este programa asoció el nombre de Maxwell al moderno desarrollo de la electrodinámica.

A parte de este «programa general», Maxwell trató de desarrollar uno de extensión más restringida que pudiera partir de experimentos de laboratorio. Maxwell mismo trató de desarrollar dos de estos posibles experimentos, pero, como él mismo comentó, con resultado negativo. Estos experimentos fueron, uno de inercia eléctrica (IV-VI-574): «Tomemos una bobina circular de muchas vueltas y suspendámosla de un fino hilo vertical, de tal manera que las vueltas sean horizontales y la bobina sea capaz de rotar alrededor de un eje vertical, bien en la dirección de la corriente, bien en la dirección opuesta.» Con respecto al funcionamiento de tal dispositivo, éstas fueron las palabras de Maxwell: «Ahora hagamos pasar una corriente a través de la bobina en la dirección N. E. S. O. Si la electricidad fuera un fluido como el agua, flujiendo a lo largo del hilo, entonces, en el momento de conectar la corriente, y por el tiempo en que el flujo eléctrico estuviera creciendo, una fuerza tendría que ser suministrada para producir el momento angular del fluido al pasar por la bobina, y esta fuerza tendría que ser suministrada por la elasticidad del hilo de suspensión, por lo cual la bobina al comienzo tendría que rotar en la dirección opuesta a la del fluido, o sea, O. S. E. N., y esto podría ser detectado por medio de un espejo. Al cortar la corriente se produciría otra rotación del espejo, esta vez en la misma dirección de la corriente.»

En referencia a los resultados de este experimento, Maxwell (574) observaba: «Si alguna acción de esta clase fuera observada, nosotros podríamos considerar una de las así llamadas «clases de electricidad» —ya sea la positiva o la negativa— como una sustancia real y estaríamos en condiciones de describir el movimiento de la electricidad verdaderamente como el movimiento de esta sustan-

cia en una dirección particular.» Con referencia a un posible resultado negativo de este experimento, Maxwell hacía alusión a la hipótesis de Fechner del fluido eléctrico doble, estableciendo que en tal caso «... cada uno de los términos de la corriente positiva estando acompañado por un término igual de signo opuesto perteneciente a la corriente negativa..., el fenómeno dependiente de estos dos términos no tendría existencia».

Maxwell reconoció la enorme importancia de estos experimentos y recomendó su realización desde que «un conocimiento de estas cosas significaría, cuando menos, el comienzo de una completa teoría dinámica de la electricidad, en la cual nosotros podríamos considerar a la acción eléctrica, no como en este tratado, es decir, como un fenómeno debido a causas desconocidas, solamente sujeto a las leyes generales de la dinámica, sino como el resultado de un movimiento perfectamente conocido de porciones conocidas de materia, en el cual no solamente los efectos totales y los resultados finales, sino todo el mecanismo intermedio y los detalles del movimiento constituirían el objeto en estudio». Si un programa tal fuera posible de ser desarrollado, él conduciría a una teoría mecánica del magnetismo al estilo de la recientemente desarrollada por Cullwick (5).

El otro experimento propuesto por Maxwell (575) era uno que hoy designaríamos como un experimento de giromagnetismo.

Resumiendo las proposiciones experimentales de Maxwell, tenemos cuatro conjuntos de experimentos:

I) En una bobina circular libremente suspendida de una fibra axial con su eje vertical, podemos observar:

a) una rotación de la bobina debida a cualquier cambio en la intensidad de la corriente circulante;

b) la producción de corrientes eléctricas cada vez que la bobina recibe una aceleración rotativa axial.

II) Si el ferromagnetismo es debido a corrientes atómicas, una barra de hierro libremente suspendida y colocada dentro de una bobina nos permitirá observar los siguientes efectos:

c) una rotación de la barra cada vez que la polaridad magnética sea alterada;

d) una magnetización de la barra cada vez que la misma sea sometida a una aceleración mecánica axial.

En este momento todos estos experimentos han sido cuidadosamente desarrollados, y los cuatro efectos obtenidos, ajustados cuantitativa y cualitativamente a las previsiones teóricas.

El primero positivamente efectuado fue el efecto d). El experimento fue realizado por Barnett (1) alrededor de 1915. El segundo que recibió confirmación experimental fue el efecto c), y los experimentos fueron efectuados por Einstein (7) y de Haas (6).

En 1916, Tolman (14, 15) y Stewart tuvieron éxito detectando el efecto b). Más recientemente, Kettering (9) y Scott han confirmado estos resultados de Tolman y Stewart con métodos más avanzados.

En relación al efecto a), el mismo fue buscado por Sir Oliver Lodge (11), pero no fue hasta 1931, que Barnett (3, 4) obtuvo un resultado positivo con el mismo.

El experimento efectuado en 1930 por Barnett fue desarrollado de acuerdo con las citadas proposiciones de Maxwell, utilizando un espejo para indicar el movimiento de la bobina. Barnett introdujo varios perfeccionamientos en el procedimiento, tales como la utilización de una corriente alterna en resonancia con la frecuencia oscilatoria de la bobina, la cual era simplemente obtenida por la elasticidad torsional de un alambre de bronce. La corriente era introducida en la bobina por medio de dos hilos muy finos retorcidos. Cinco pequeños imanes colocados en la parte inferior de la bobina, en combinación con bobinas exteriores convenientemente dispuestas, permitían el frenado de las oscilaciones del aparato con el auxilio de una corriente alterna de la misma frecuencia, pero en fase opuesta a la *corriente de excitación*. La medida de la corriente de frenado (*corriente de neutralización*) le permitía a Barnett medir el par requerido para frenar las oscilaciones de la bobina. Todo el dispositivo estaba suspendido del techo del laboratorio por medio de resortes de acero para prevenir las perturbaciones sísmicas. La acción perturbadora del campo magnético terrestre era eliminada por medio de tres pares de anillos de Helmholtz que constituyan un dispositivo desgaussador. Para evitar las oscilaciones de conjunto del dispositivo, la parte inferior del mismo iba sumergida en un recipiente con mercurio. Un refinamiento final lo era la posibilidad de una rotación completa del dispositivo alrededor de un eje vertical con el objeto de controlar cualquier posible falla en la compensación del campo magnético terrestre.

Estas fueron a grandes rasgos las características generales del experimento de Barnett, que luego consideraremos en mayores detalles.

ANÁLISIS TEÓRICO

a) *La interpretación generalizada.*

De acuerdo con Maxwell (571), podemos representar la energía cinética total de un sistema como

$$T = T_m + T_e + T_{me}, \quad [1]$$

donde T_m representa la energía cinética puramente mecánica; T_e es la energía cinética de las corrientes eléctricas, y T_{me} corresponde a energías cinéticas mixtas, determinadas por ambos factores y su interacción.

Aplicando la convención sumatoria de Einstein podemos escribir cada una de las componentes de la energía cinética en la siguiente forma:

$$T_m = A_{ik} x_i x_k, \quad [2]$$

$$T_e = B_{ik} y_i y_k, \quad [3]$$

$$T_{me} = C_{ik} x_i y_k, \quad [4]$$

donde los coeficientes representan momentos y productos de inercia de acuerdo a que tengamos $i = k$ o $i \neq k$.

Las ecuaciones de Lagrange escritas de la siguiente manera,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} = F = (X + Y + Z) \quad [5]$$

darán origen a nueve diferentes ecuaciones particulares, pues X representa las fuerzas puramente mecánicas; Y, las fuerzas puramente eléctricas (f. e. m.), y Z, fuerzas mixtas (fuerzas electromecánicas).

En relación con los presentes análisis, nosotros estamos particularmente interesados en la situación física descrita por

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{me}}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T_{me}}{\partial x_i} = X_i. \quad [6]$$

Es evidente que el primer término puede ser escrito

$$-\frac{d}{dt} (C_{ik} \dot{y}_k), \quad [7]$$

o sea, que es una función lineal de las corrientes. Este término muestra claramente la existencia de fuerzas mecánicas, que son nulas cuando las corrientes son constantes y que cambian de signo de acuerdo a que las corrientes aumenten o disminuyan de intensidad. Este término corresponde a lo que podemos calificar como un efecto de *inercia electrónica*.

También nos interesa la ecuación

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{me}}{\partial \dot{y}_i} \right) - \frac{\partial T_{me}}{\partial y_i} = Y_i, \quad [8]$$

que se refiere a las fuerzas eléctricas (f. e. m.).

Desde que no hay términos de T_{me} asociados a la coordenada y el segundo término es nulo y la ecuación se reduce a

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T_{me}}{\partial \dot{y}_i} \right) = \frac{d}{dt} (C_{ik} \dot{x}_k) = Y_i. \quad [9]$$

Ahora bien, $\frac{\partial T_{me}}{\partial \dot{y}_i}$ es una función lineal de las velocidades del conductor. En consecuencia, de acuerdo con Maxwell, si los términos de T_{me} tienen una existencia real, debería ser posible producir una fuerza electromotriz con independencia de todas las corrientes existentes por simple alteración de las velocidades de los conductores.

A partir de este tratamiento extremadamente generalizado, provisto por las ecuaciones de Lagrange, aparece la posible existencia de fenómenos iniciales asociados al movimiento de la electricidad. Pero esta extrema generalidad nos priva de una aplicación fenomenológica directa de las ecuaciones así obtenidas. En consecuencia, para la interpretación de medidas de laboratorio estamos obligados a un enfoque de la cuestión desde un punto de vista más heurístico.

b) *El análisis mecánico.*

Partiendo de la hipótesis aceptada de la naturaleza electrónica de la corriente eléctrica, la fuerza mecánica producida en la bobina, debida a las variaciones de velocidad de los electrones, puede ser calculada partiendo del teorema de la igualdad del impulso y el ímpetu:

$$\int_0^t F dt = - M_0 \int_0^t dv. \quad [10]$$

La aplicación de esta fórmula a los casos reales se hace posible debido a que las medidas se efectúan en un estado de reposo del sistema, por el cálculo del par necesario para frenar las oscilaciones del dispositivo. A partir de la ecuación [10], obtenemos

$$F = - M_0 \frac{dv}{dt} \quad [11]$$

que es simplemente la ecuación newtoniana del movimiento.

Para aplicar la fórmula necesitamos transformar la masa *electromagnética* M_0 por su equivalencia

$$M_0 = n \lambda s m, \quad [12]$$

donde n es el número de electrones por volumen unitario, λ la longitud del conductor, s su sección y m la masa electrónica. Por medio de la definición de intensidad

$$I = e n s v$$

(donde e es la carga electrónica, n la densidad de los electrones, s la sección del conductor y v la velocidad de las partículas), podemos obtener, a partir de [11]

$$F = - \frac{m}{e} \lambda \frac{dI}{dt}. \quad [13]$$

Fresponiendo el empleo de corriente alternada sinusoidal, su intensidad instantánea puede ser escrita

$$i = I_e \sqrt{2} \sin \omega t, \quad [14]$$

(donde I_e es la corriente efectiva, y $\omega = 2\pi f$), de donde podemos obtener para $\omega = \text{const.}$,

$$\frac{dI}{dt} = (I_e \sqrt{2} \omega) \cos \omega t = I_e k \cos \omega t.$$

La fuerza máxima corresponderá a $\omega t = \pm \frac{\pi}{2}$, o sea

$$F_{\max} = k \frac{m}{e} \lambda I_e. \quad [15]$$

De acuerdo con [15] podemos apreciar que la máxima fuerza de inercia producible por una corriente alterada es proporcional a la relación m/e (un hecho previsible), una constante k dependiente de la frecuencia de la corriente, la longitud del hilo y la intensidad efectiva de la corriente alterada.

Como nuestro dispositivo mide pares, para obtener a partir de su lectura las fuerzas correspondientes que se ejercen en el hilo, debemos escribir

$$F_{\max} = \frac{L_{\max}}{r} = k \frac{m}{e} \lambda I_e. \quad [16]$$

donde L_{\max} es el par de la fuerza conocida, y r el radio de la bobina de excitación (la bobina donde estamos tratando de medir la fuerza electrónica).

Una simple mirada a la fórmula [16] nos muestra el hecho de que la supuesta fuerza de inercia electrónica será una función lineal y positiva de la longitud del hilo.

PARTE EXPERIMENTAL

I) EL EQUIPO EXPERIMENTAL.

a) *El micrómetro electrónico.*

Como observado por Cullwick (5) (18-4) con relación al efecto b), las corrientes producidas en estos procesos son demasiado débiles para permitir experimentos de un aceptable grado de reproductibilidad. Lo mismo puede decirse con relación a los efectos mecánicos producibles por el efecto a). Las oscilaciones de la bobina resultan tan pequeñas que el empleo de espejos es un recurso insuficiente para un análisis detallado de los fenómenos. De este modo resulta fácil confundir oscilaciones debidas a diversas causas con las oscilaciones debidas a la inercia electrónica que estamos tratando de medir. Esta fue la principal razón que indujo a los autores al abandono del tradicional sistema especular de observación con rayo luminoso y pasar a utilizar dispositivos más avanzados, tales como el dispositivo que hemos ampliamente descrito en la publicación titulada «Nuevo micrómetro electrónico». No entraremos aquí en un análisis detallado de este dispositivo, salvo observar la extrema sensibilidad del mismo, que permite medir elongaciones mecánicas por debajo de 10 A° . Esto va mucho más allá que cualquier dispositivo óptico conocido, y tales resultados son sólo obtenibles con el empleo de dispositivos del tipo del microscopio electrónico. Los ensayos experimentales confirmaron que la observación de los movimientos mecánicos por este medio superaba a la observación con espejo, lente y rayo de luz por una cifra representable con un factor de orden de 10^6 . Por añadidura, el nuevo dispositivo permite un control de la frecuencia y de la fase de la oscilación, nada de lo cual es posible con el viejo sistema de observación. Es de hacer notar que las observaciones fueron hechas de preferencia en este laboratorio, utilizando figuras de Lissajoux producidas por la deflexión horizontal de una señal obtenida directamente del oscilador de baja frecuencia.

Fue debido al empleo de este nuevo instrumento el que pudiésemos detectar la presencia de dos fuentes de error hasta ahora no descritas en la literatura correspondiente a estos fenómenos, es decir, un efecto de oscilación termo-motriz y un efecto giromagnético trans-

versal. El segundo efecto estuvo presumiblemente presente en los experimentos de Barnett, introduciendo así un factor de error en las medidas.

Por otra parte, tratar de frenar las oscilaciones de la bobina por medio de un par opuesto en fase y de igual intensidad, requiere un exacto control de la fase de la corriente y la oscilación mecánica.

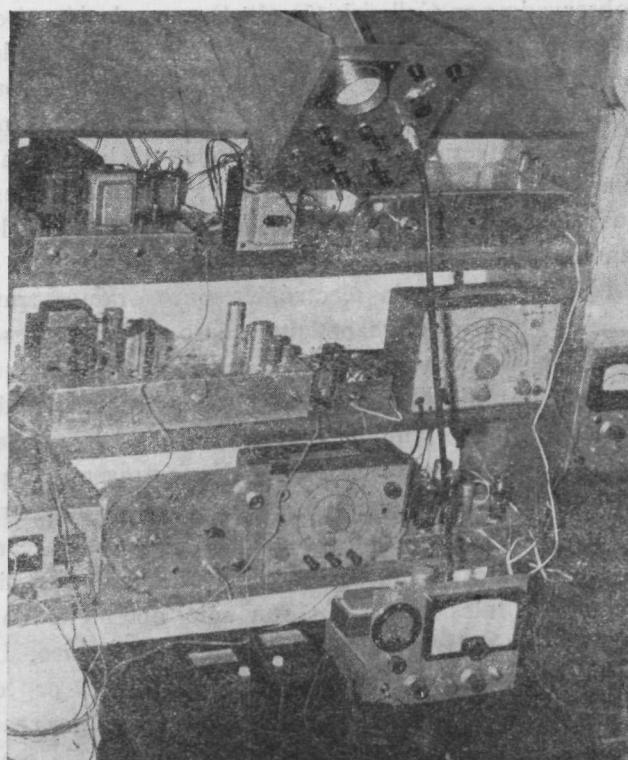


Fig. 1.

ca, pues de otro modo, podemos llegar a resultados falsos atribuyendo el frenado a una acción puramente cuantitativa de los pares opuestos; no tomando en consideración el hecho de que pequeñas diferencias en la frecuencia de la resonancia pueden conducir a diferencias de fase entre las oscilaciones mecánicas y las oscilaciones eléctricas.

Con referencia al efecto termo-motriz, las oscilaciones producidas por él son fácilmente detectadas, pues se hallan 90° fuera de

fase con relación a las oscilaciones de origen electromagnético y, en consecuencia, de posibles efectos de inercia electrónica; ellas aparecen como líneas rectas con una inclinación de 45°.

Otra ventaja de la inspección osciloscópica es permitir diferenciar movimientos debidos a influencias sísmicas de las oscilaciones torsionales de la bobina. En efecto, con este dispositivo podemos fácilmente distinguir entre un lento movimiento de arriba abajo de toda la imagen, debido a las oscilaciones del marco en la suspensión antisísmica, las perturbaciones sísmicas de diversas frecuencias y las oscilaciones torsionales de la bobina que aparecen como los círculos de las figuras de Lissajoux.

Pero aparte de estos factores, la más importante característica que conviene destacar es la posibilidad de un control de la fase que permite eliminar la perturbadora influencia del magnetismo remanente debido a imperfecciones de la degaussación. En efecto, únicamente si estamos en condiciones de controlar la fase de las oscilaciones, podemos obtener un grado de degaussación acorde con el requerido por estos experimentos de tanta sensibilidad.

Nosotros no concebimos la posibilidad de que estos experimentos se efectúen sin dispositivos de este tipo u otros equivalentes; por ello queremos manifestar nuestra admiración hacia los técnicos que en el pasado fueron capaces de desarrollar operaciones que exigían tanta paciencia y habilidad.

b) *El dispositivo antisísmico.*

El equipo experimental aquí descrito sigue, en líneas generales, el dispositivo empleado por Barnett. Sin embargo, algunos pequeños perfeccionamientos han sido introducidos. En referencia a la suspensión antisísmica, por ejemplo, nosotros hemos preferido el empleo de cuerdas de caucho de dos metros de largo. La ventaja del empleo de la goma es una mayor absorción de las vibraciones y una más rápida amortiguación de las oscilaciones del marco. Los conductores de la electricidad fueron hechos tan livianos como fue posible y dispuestos en espiral para prevenir la introducción de vibraciones parasitarias desde el exterior del sistema.

De las cuerdas de caucho un marco de madera dura (1,50 m. x 0,40 m.) quedaba suspendido. En el centro del marco, en posición

vertical, un listón de madera ($1,40\text{ m.} \times 0,20\text{ m.}$), capaz de rotación axial sobre dos pivotes en los extremos, servía de soporte para la bobina, el dispositivo de detección electrónica y el dispositivo de frenado. De este modo era posible hacer girar el dispositivo completo en torno a un eje vertical, con el objeto de controlar posibles fallas en la neutralización del campo magnético terrestre. Los cuatro canales para las conexiones eléctricas eran conectados a través de enchufes convenientemente dispuestos.

Con el objeto de reducir al máximo las oscilaciones de origen sísmico, se aplicaron en los extremos del marco dos cilindros de plomo de dos kilogramos cada uno. Otra precaución útil fue el aumento de la frecuencia de las oscilaciones de la bobina.

c) *El dispositivo degaussador.*

Dos pares de marcos rectangulares ($2,50\text{ m.} \times 2,00\text{ m.}$) (cada marco separado de su paralelo por una distancia de $0,40\text{ m.}$) servían de soporte para las bobinas degaussadoras. Una canaleta en la parte exterior de cada marco servía para mantener el hilo en posición. Las dos componentes horizontales del campo magnético terrestre eran neutralizadas por medio de estos dos pares de anillos degaussadores. Como puede apreciarse en la fotografía, la componente vertical era neutralizada por medio de un par de anillos circulares en posición horizontal. La regulación del voltaje era automática, pero el ajuste era manual.

d) *El oscilador mecánico.*

Como puede apreciarse en el dibujo, un trozo de alambre de bronce sirve de soporte para el dispositivo oscilante, al mismo tiempo que de resorte para las oscilaciones de la bobina. La conexión entre el alambre de bronce y la bobina se establece por medio de una pieza hueca de duraluminio provista de tres tornillos de bronce. De este modo, cambiar la bobina resultaba una operación sencilla.

En la extremidad inferior del alambre de bronce, una pieza liviana hecha de chapa de duraluminio servía de soporte para un pequeño cilindro de ferrita y un pequeño peso de plomo destinado

a compensar el momento angular de la ferrita. La pieza de ferrita se movía en la proximidad de una bobina de alta frecuencia.

Una varilla de aluminio (0,50 m. de largo) conecta la bobina con el dispositivo de frenado constituido por una corta barra de acero imantado que se mueve en la proximidad de un solenoide.

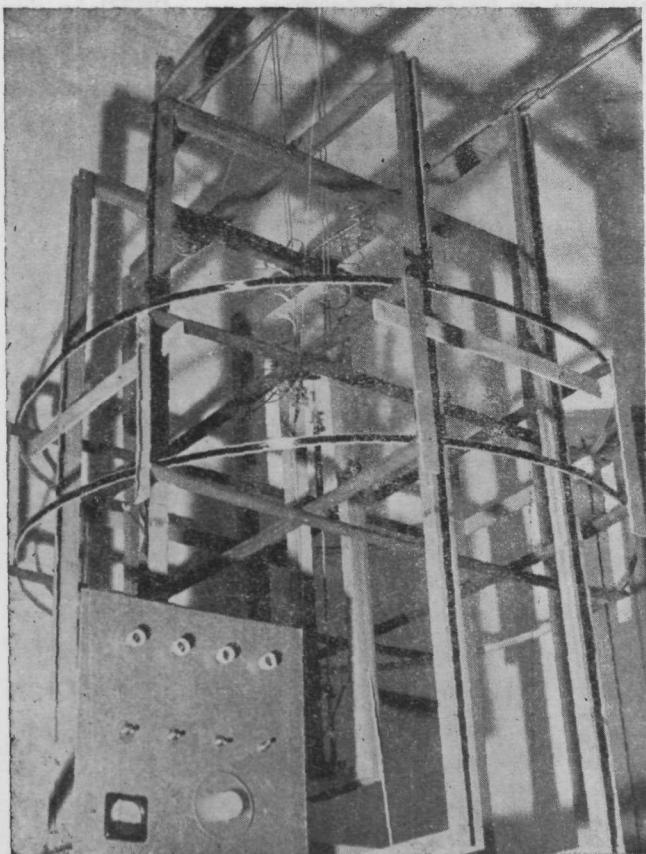


Fig. 2.

En la parte inferior un resorte de acero, una de cuyas extremidades se inserta en la barrita de aluminio fijada a la madera, sirve para tensar todo el dispositivo.

Las dos barritas de aluminio en los extremos del soporte de madera se proyectan hacia afuera (véase el esquema) para servir de

pivotes al dispositivo, que de este modo puede girar libremente en el marco de madera.

c) *La corriente alternada.*

La corriente alternada era producida por un dispositivo electrónico, consistente en un puente de Wien que controlaba dos válvulas

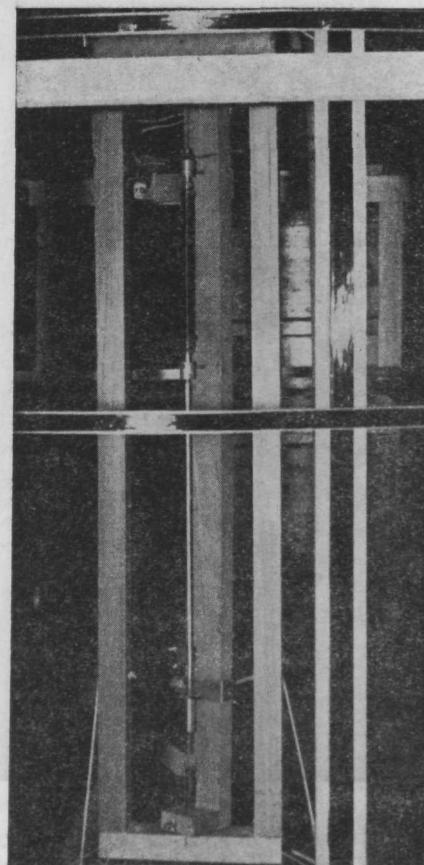


Fig. 3.

de alto poder montadas en *push-pull*. De este modo era posible obtener corrientes alternas de diversas frecuencias y voltajes.

Directamente desde el oscilador se tomaba la corriente destina-

da a producir la desflexión horizontal del haz del osciloscopio y la corriente para el frenado de las oscilaciones del dispositivo. En los experimentos se empleó, de preferencia, corriente alterna sinusoidal.

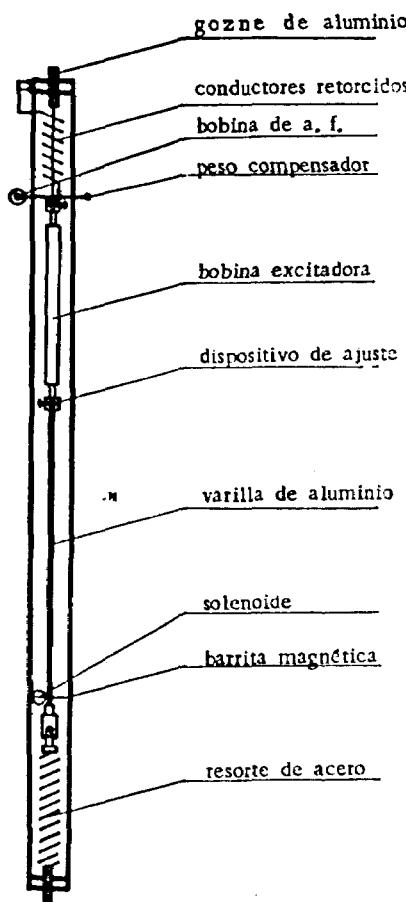


Fig. 4.

f) *El freno electromagnético.*

Un procedimiento usualmente empleado en el estudio de los fenómenos giromagnéticos y de inercia electrónica es frenar las oscilaciones de los dispositivos por medio de un par antagonista de valor conocido. Barnett (3) declara que él empleaba para este fin cinco

pequeñas barras magnéticas colocadas en la parte inferior de la bobina de excitación. Estos imanes se movían en el campo creado por varios solenoides convenientemente dispuestos y alimentados por una corriente de frecuencia y fase convenientemente elegida.

Nosotros no pudimos emplear este procedimiento, pues nos fue dable observar que la sola presencia de las barras producía la oscilación de la bobina —a despecho de estar las barras sólidamente unidas a la bobina de excitación— por un efecto giromagnético no descrito todavía en la literatura científica y que hemos bautizado como «efecto giromagnético trasversal» para distinguirlo del efecto Einstein-De Haas, que es un efecto giromagnético longitudinal. La única manera de evitar esta perturbación es colocar las barras magnéticas a suficiente distancia de la bobina de excitación. Es, por este motivo, por lo que pusimos el freno electromagnético a 0,50 metros de la bobina de excitación. Para la construcción del freno —como puede verse en el esquema— usamos una barrita imantada de 0,2 cm. de diámetro y 4 cm. de longitud, suspendida por el centro en la barra de aluminio. Un único solenoide colocado a una distancia regulable de la barra magnética servía para inducir las fuerzas magnetomotrices.

Una cuestión importante en relación con la operación de frenando es el ajuste de la fase de las corrientes. Aparte del hecho de que estas dos corrientes deben estar defasadas 180°, existe la necesidad de que la oscilación mecánica del dispositivo se mantenga en un ángulo de 90° en relación con dichas corrientes.

II. CONTROLES

En una de sus publicaciones, Barnett da una lista de los controles requeridos en el desarrollo de las medidas de inercia electrónica. La necesidad de estos minuciosos y aún tediosos procesos de control, se origina en la extrema debilidad de los efectos a observar. Es lógico entonces que cualquier perturbación en el laboratorio pueda hacerse presente y alterar los fenómenos. Para dar una idea de la magnitud microscópica de las fuerzas presentes en estos experimentos, podemos calcular con la fórmula [13] la

fuerza electromotriz generada por el efecto b), simplemente reemplazando la aceleración de la corriente por la aceleración del alambre:

$$E = \frac{e}{m} \lambda \frac{dv}{dt}; \quad [17]$$

calculando para una aceleración de 1 cm/seg² y una longitud de la bobina de 100 m., obtenemos una f. e. m.

$$E = 5.7 \times 10^{-12} \text{ volts.}$$

Se ve, pues, la necesidad de un detenido contralor de todos los procesos, dada la extrema pequeñez del fenómeno en observación.

a) *Control de la neutralización del campo magnético terrestre.*

Esta es la fuente más importante de perturbaciones en estos experimentos. Por esta razón, se hace necesaria una minuciosa compensación del campo magnético terrestre. Para este fin disponíamos de magnetómetros rotatorios de alta sensibilidad que permitían establecer el correcto ajuste de los pares de anillos de Helmholtz.

Siendo el dispositivo un magnetómetro muy sensible, por sí mismo, para este ajuste de la degaussación se requería ante todo una acertada elección del emplazamiento del dispositivo degausador en el laboratorio, pues, de otra manera, no podríamos tener la correcta linealidad del campo requerido para una exacta degaussación.

Los mejores resultados para este control de los remanentes del campo magnético los obtuvimos utilizando una bobina auxiliar que envolvía a la bobina de excitación (22 cm. de largo por 1 cm. de ancho) y cuyas espiras verticales permitían obtener un máximo de flujo magnético con relación a las componentes horizontales del campo terrestre. Para este fin bobinamos hasta 250 ohms de alambre esmaltado de 0,01 cm. de diámetro y lo colocamos en el circuito de la corriente alterna con una densidad hasta de 300 amp/cm². Se pudo así observar que hasta en circunstancias en que los magnetómetros habían indicado campo nulo, era posible registrar oscilacio-

nes en el osciloscopio. Se procedía, en consecuencia, a un nuevo ajuste de la degaussación hasta completa compensación. Pudimos así descubrir que éste era el mejor de todos los procedimientos para un exacto control de la degaussación en el recinto no-magnético.

Fara poder tener un control permanente de la neutralización magnética dispusimos un conductor adicional que podía ser controlado desde fuera. De esta manera, posibles variaciones del campo magnético terrestre —durante el curso de las operaciones—, pudieron ser perfectamente controladas. Consideramos de importancia esta posibilidad, especialmente con las bobinas de gran diámetro en donde la influencia de pequeños remanentes del campo terrestre se hace sentir intensamente. Pero aun este agudo control se mostró insuficiente.

Un control adicional requerido fue la rotación de 180° de todo el dispositivo electromagnético.

En este sentido queremos dejar sentado que únicamente la posibilidad de un control de la fase de la oscilación puede prestar utilidad a este control de la degaussación por rotación. En efecto, la amplitud total de la oscilación viene determinada por factores intrínsecos —inercia electrónica, efectos giromagnéticos, movimiento electrotérmico, etc, que representaremos con la letra h , y el factor extrínseco determinado por la intensidad del campo magnético terrestre, todo lo cual, para dos posiciones del dispositivo desviadas en 180° , puede ser representada como

$$A = I \phi \cos \alpha + h,$$

$$A' = -I \phi \cos \alpha + h.$$

Si aceptamos *a priori* que $h \neq 0$, está claro que el valor absoluto de A será diferente del de A' . Pero para el caso $h = 0$, tendremos

$$|A| = |A'|;$$

Así, pues, el simple contralor de la amplitud de las oscilaciones no nos dará la menor indicación en relación a la eficiencia de la degaussación en el último caso. Unicamente la posibilidad de un control de la fase podrá dar información sobre la eficacia del pro-

res de degaussificación al nivel requerido para estos experimentos.

Esta es otra de las importantes razones que exigen el empleo de dispositivos electrónicos para estos experimentos.

b) *Control de la influencia de los electrodos.*

Se efectuaron ensayos en blanco con bobina excitadora sustituida por una resistencia no inductiva del mismo valor, con el fin de determinar la influencia perturbadora de los electrodos. Se pudo así descubrir la presencia —especialmente con corrientes de alta intensidad— de oscilaciones producidas por la dilatación térmica de los electrodos. Algunas configuraciones críticas determinadas por valores de la longitud y diámetro de los conductores, eran especialmente afectadas. La única manera de eliminar esta perturbación es reducir al mínimo la intensidad de las corrientes. Pero para grandes intensidades —en este laboratorio se hicieron ensayos hasta con cuatro amperes— es muy difícil erradicar esta influencia perturbadora.

Otra influencia de los conductores —también observada en este laboratorio— es la interacción inductiva entre ellos y la bobina excitadora; este efecto se puede evitar, simplemente distanciando los electrodos en espiral de la bobina por medio de una sección de conductores fijos en el cuerpo móvil con la bobina.

c) *Control de la influencia de los imanes permanentes.*

Es de esperar *a priori* que pequeños imanes colocados en una posición horizontal y solidarios con la bobina, no tengan una influencia en las oscilaciones de ésta. Nuestra experiencia se opone a esta creencia y hemos podido observar un efecto giromagnético producido por la bobina excitadora en imanes ajustados sólidamente a ella y colocados en posición normal al eje de la bobina. Hemos llamado a este efecto «Efecto giromagnético transversal» y su consideración teórica es equivalente a la del efecto giromagnético, bien conocido; una publicación sobre este tópico está actualmente en preparación en este laboratorio.

Creemos poder responsabilizar en parte a este efecto en el resultado positivo obtenido por el profesor Barnett en sus experimen-

tos de inercia electrónica. Por otra parte, la única manera de eliminarlo es colocar los imanes del freno a suficiente distancia de la bobina excitadora.

III. EXPERIMENTOS EFECTUADOS

Nuestros experimentos en inercia electrónica fueron efectuados con el auxilio de tres bobinas de una longitud standard de 22 centímetros. La bobina N. 1 era de madera de cedro con un diámetro de 0,5 cm., con cuatro capas de alambre de cobre esmaltado de 0,01 cm. de diámetro perfectamente enrollado. La bobina N. 2 era de plástico vinílico de 1,2 cm. de diámetro regularmente bobinada con cuatro capas de alambre esmaltado de 0,02 cm. de diámetro. La bobina N. 3 estaba constituida por cuatro capas regularmente bobinadas de alambre esmaltado de 0,03 cm. de diámetro en un tubo de «pertinax» de 3 cm. de diámetro.

Cada bobina fue ajustada, durante los experimentos, a dos diferentes frecuencias de oscilación. Por ejemplo, la bobina N. 1 estaba sintonizada a una frecuencia 10,4 ciclos/segundo en una serie de operaciones, y a 24,6 ciclos/segundo en otra de las series.

Las experiencias se efectuaron en cada serie a tres distintas densidades de corriente: 100 amp/cm²; 300 amp/cm²; 600 amp/cm². La última densidad de corriente se dejaba para el final de la serie por la alteración producida por el calentamiento en la estructura de la bobina.

Un cuidadoso contralor de la degaussación presidía cada uno de los experimentos —cada una de las medidas de cada serie—. Con el objeto de prevenir cualquier alteración producida por las variaciones naturales del campo magnético terrestre disponíamos —como observado anteriormente— de un dispositivo para conectar desde afuera la bobina de control de degaussación. Especialmente con la bobina N. 3 fue dable observar que aun en casos en que la bobina de control indicaba correcta degaussación, al conectar la bobina excitadora podían aparecer trazas de oscilación en el osciloscopio. Para eliminar este efecto fue necesario, en algunos casos, recurrir a nuevas correcciones en la compensación del campo terrestre. Se pudo constar en todos los casos —por el procedimiento de inversión en 180° del dispositivo— que tales pequeñas oscilaciones eran debidas a remanentes en escala microscópica del campo magnético ter-

rrestre, pues era dable observar que la inversión del dispositivo producía la inversión de la fase en 180° . Un ajuste final de la compensación magnética hasta la obtención de un resultado nulo producía en la posición opuesta asimismo un resultado nulo, en cualquiera de las dos posiciones en que se efectuara la compensación del campo.

En ningún caso en el curso de nuestros experimentos nos fue dable observar la presencia de oscilaciones que no fueran debidas a imperfecta degaussación.

Conclusiones experimentales

Para juzgar el alcance de las experiencias efectuadas debemos tomar en consideración la fórmula [16]. De acuerdo con esta fórmula, en la serie final de los experimentos (bobina N. 3-600 amp/cm²) la fuerza máxima obtenible debió ser del orden de 10^{-2} cgs.

Ahora bien, el freno magnético del dispositivo era capaz de producir en la pantalla del osciloscopio elongaciones de 10 cm. por aplicación de un par correspondiente en la bobina a una fuerza del orden de 10^{-8} cgs. No habiéndose obtenido la menor traza de oscilación, podemos concluir que con seguridad la masa electrónica —de existir alguna— estaría por debajo de los 10^{-34} g., lo que significa la total ausencia de masa electrónica durante el movimiento del fluido eléctrico.

A una conclusión equivalente llevan los experimentos efectuados con el juego completo de bobinas. Aunque de significación menor, debemos tomar en consideración los resultados obtenidos con las otras dos bobinas. Cada conjunto de experimentos estuvo constituido de diez medidas efectuadas con cada una de las dos frecuencias y tres intensidades cuyos promedios dan valores para la fuerza electrónica por debajo del orden de 10^{-7} cgs., como puede apreciarse en la siguiente tabla:

Bobina	N. 1	N. 2	N. 3
Diámetro bobina (cm.)	0.5	1.2	3.0
Diámetro hilo (cm.)	0.01	0.02	0.03
λI (amp. cm.)...	5.8×10^2	2.9×10^3	1.3×10^4
Fuerza esperada (cgs.)...	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
Fuerza encontrada (cgs.)...	$< 10^{-7}$	$< 10^{-8}$	$< 10^{-8}$

IV. CONCLUSIÓN

La total ausencia de efectos inerciales durante el movimiento de la electricidad nos envía a la alternativa ya planteada por Maxwell: o bien el fluido eléctrico está formado de dos clases de partículas (positrones más electrones), o bien el electrón no tiene masa.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) BARNETT, S. J.: «Phys. Rev.», 6, p. 239, 1915.
- (2) — — «Phil. Mag.», 44, p. 1121, 1922.
- (3) — — «Phil. Mag.», 12, p. 349, 1931.
- (4) — — «Rev. Mod. Phys.», 7, p. 129, 1935.
- (5) CULLWICK, E. G.: *Electromagnetism and Relativity* (Longmans). London 1957.
- (6) DE HAAS, W. J.: «Ver. d. Deutschen Phys. Gessellschaft», 18, p. 423, 1916.
- (7) EINSTEIN, A. and DE HAAS, W. J.: «Verh. d. Deutschen Phys. Gessells.», 17, p. 152, 1915.
- (8) EINSTEIN, A.: «Verh. d. Deutschen Phys. Gess.», 18, p. 173, 1916.
- (9) KETTERING, C. F. and SCOTT, G. G.: «Phys. Rev.», 66, p. 257, 1944.
- (10) KIKOIN, I. and GUBAR, S.: «Journ. Phys. URSS», 3, p. 333, 1940.
- (11) LODGE, O.: *Modern Vistas of Electricity*, p. 97. London 1892.
- (12) MAXWELL, J. C.: *Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford 1873.
- (13) ROSENFIELD, L.: *Theorie des Electrons* (Hermann). Paris 1951.
- (14) TOLMAN, R. C. and STEWART, T. D.: «Phys. Rev.», 8, p. 97, 1916.
- (15) — — — «Phys. Rev.», 9, p. 164, 1917.