

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS IX JORNADAS

VOLUMEN 5 (1999), Nº 5

Eduardo Sota

Luis Urtubey

Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



Las contribuciones de H. Hertz al desarrollo y consolidación del concepto de campo electromagnético

*Pedro W. Lamberti**

Introducción

Las ecuaciones de Maxwell son hoy lo que fueron hace 120 años. Ellas han resistido a la erosión del paso del tiempo, y más aún, han sido fortalecidas por las dos grandes revoluciones de la física del siglo XX. La relatividad especial estaba, en cierto sentido, escondida detrás de ellas, y la teoría cuántica tan sólo las perturbó ligeramente. Fueron la vanguardia de la física para muchos de los físicos más influyentes de este siglo. *"Fue un dios quien estos versos escribió, que con impulso misteriosamente oculto, ante mí las fuerzas de la naturaleza revelan y mi corazón con callada alegría llenan"*. Con este fragmento del Fausto de Goethe, L. Boltzmann reaccionó ante el "Tratado de Electricidad y Magnetismo" de Maxwell. No todos los físicos recibieron a la teoría electromagnética de Maxwell con tanto entusiasmo. En Alemania durante gran parte de la segunda mitad del siglo XIX, preveían las teorías de acción a distancia para describir los fenómenos electromagnéticos. Nombres como los de K. Gauss, B. Riemann, F. Neumann, W. Weber, avalaban esa postura. Sin embargo, poco a poco esa situación fue cambiando, fundamentalmente debido a la influencia de H. von Helmholtz. Entre los discípulos de Helmholtz se destaca Heinrich Hertz (1857-1894). Hertz es fundamentalmente conocido por sus experimentos sobre ondas electromagnéticas [1]. Sin embargo, ellos no son más que la culminación de los estudios que sobre electromagnetismo Hertz comenzara con su tesis doctoral hasta el proceso denominado por M.G. Doncel de "conversión de Hertz a las ondas electromagnéticas" [2]. La adscripción o no a la teoría de Maxwell condujo en el mundo de la física del siglo pasado al calificativo de "Maxwelliano". Destacan entre ellos figuras como la G.F. FitzGerald, O. Heaviside y O. Lodge. Hertz tuvo una intensa correspondencia con estos físicos y ciertamente ellos eran conscientes del proceso que lo condujo a una aceptación plena de la teoría de Maxwell. En una carta enviada por Heaviside a FitzGerald (1889) afirmó: "...veo que Hertz no es un Maxwelliano, aunque está aprendiendo a ser uno..." [3].

Existe una rica literatura sobre la historia del electromagnetismo y en particular sobre los trabajos de Hertz [4-6]. En este trabajo realizaremos un breve repaso de los principales aportes realizados por Hertz que contribuyeron a la consolidación del concepto de campo electromagnético. Se analiza el contexto histórico en el que esas contribuciones ocurrieron y se brinda una detallada bibliografía, que creemos, permitirá al lector interesado ampliar algunos de los puntos aquí comentados.

Contexto histórico en el que Hertz comienza su trabajo.

El enunciado, por parte de Newton (1687), de la Ley de Gravitación Universal marca el comienzo de la Física Teórica. Con ella se pudo dar explicación a una gran variedad de fenómenos celestes observados y prever otros. Su expresión matemática es:

* Facultad de Matemática, Astronomía y Física; Universidad Nacional de Córdoba.

$$F_G = \frac{Gm_1m_2}{r_{12}^2} \quad (1)$$

donde m_1 y m_2 son las masas de los cuerpos en interacción, r_{12} la distancia entre ellos y G una constante universal. Otro paso importante en el desarrollo de la Física, lo realiza Coulomb, en el año 1785, con la formulación de la ley de interacción entre partículas cargadas. Como es bien conocido, esta ley da, para la fuerza de atracción o repulsión entre dos partículas cargadas, de cargas q_1 y q_2 y separadas una distancia r_{12} , la expresión:

$$F_E = \frac{kq_1q_2}{r_{12}^2} \quad (2)$$

Hay una diferencia crucial entre las leyes (1) y (2): las "cargas" gravitatorias son siempre positivas ($m_1, m_2 > 0$); mientras que en la ecuación (2), las cargas eléctricas pueden ser de cualquier signo. Entre las semejanzas de ambas leyes es importante destacar:

- Ambas leyes son del "tipo" $1/r^2$;
- Ellas representan acciones a distancia.

La primera de estas semejanzas es obvia. La segunda significa que ambas fuerzas actúan directamente entre cualquier par de partículas puntuales a través del espacio vacío que las separa [7]. Además, ambas leyes describen interacciones instantáneas.

En el año 1827 Ampere publica su libro "*Teoría matemática de los fenómenos electrodinámicos, deducida exclusivamente de la experiencia*" [8]. Allí, él presenta lo que hoy llamaríamos una teoría "puramente electrodinámica". En su concepción, un imán es un conjunto de corrientes circulares, de dimensiones moleculares. Todos los fenómenos eléctricos y magnéticos pueden explicarse mediante la ley de fuerzas entre dos elementos de corriente. Cuatro años después que Ampere publicara su libro, Faraday descubre las *corrientes inducidas* producidas en un conductor cerrado por la proximidad de una corriente (o campo magnético) variable. A pesar de la gran importancia de este descubrimiento, Faraday da un paso aun mayor al introducir la noción de campo. Con una concepción puramente intuitiva (no matemática), es capaz de estimar la intensidad de la corriente inducida por el número de líneas de fuerza (líneas de campo) que atraviesan al conductor. Sugiere también que las acciones a distancia pueden resultar inadecuadas para una correcta descripción de las interacciones eléctricas y magnéticas. Sin embargo y a pesar de la potencialidad que ofrecía la noción de campo introducida por Faraday, rápidamente surgieron descripciones alternativas del fenómeno de corrientes inducidas. F. Neumann (1845) logra describirlo como una "acción inductiva" de la corriente de un circuito primario sobre uno secundario.

En el año 1845, W. Weber deduce, a partir de la ley de Ampere, una ley de acción entre partículas cargadas. Según su modelo, la corriente es producida por pares de partículas de cargas opuestas que avanzan a lo largo del conductor en sentidos opuestos con una misma velocidad. Llega con este supuesto a una ley básica de interacción eléctrica entre dos partículas cargadas en movimiento [9]. Esta expresión permite determinar la intensidad de la corriente inducida en el fenómeno descubierto por Faraday.

Herman von Helmholtz, en 1847, cuestiona la expresión de Weber, pues, según él observa, es violatoria del principio de conservación de la energía y conduce a velocidades infinitas entre partículas. Esto lo lleva a reformular los principios sobre los que debería asentarse una teoría electrodinámica. Sus postulados básicos son: i) la fuerza de Coulomb se obtiene como *gradiente de un potencial U*; ii) los circuitos que portan corriente interactúan entre sí por medio de una fuerza material (o mecánica). La misma se obtiene como el *gradiente de un potencial V*; iii) los circuitos que portan corriente interactúan entre sí a través de una fuerza electromotriz. La misma se obtiene como la *derivada temporal de V*; iv) la corriente en un circuito es proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él; v) se cumple la ley de conservación de la carga. De esto resulta una teoría de compromiso, la cual intenta reconciliar las teorías de acción a distancia de F. Neumann y W. Weber con la de Maxwell. Acepta como válidas las teorías de acción a distancia para el espacio libre, pero adopta la misma para los dieléctricos.

Los aportes conceptuales de Hertz.

Hertz aprende la teoría electromagnética de Helmholtz. En su primer trabajo sobre electromagnetismo demuestra que la electricidad se mueve con masa inerte en los cuerpos conductores (en lenguaje actual, significa que la relación carga/masa es no nula).

En el año 1884 H. Hertz publica un trabajo teórico en el cual compara la entonces nueva teoría de Maxwell con las viejas teorías electrodinámicas de acción a distancia [10]. Este trabajo aparece cuatro años antes de que Hertz realizara sus famosos experimentos sobre ondas electromagnéticas. Sin lugar a dudas, los resultados de sus investigaciones teóricas lo condujeron a la búsqueda de una verificación experimental de la teoría de Maxwell. En el párrafo final del mencionado trabajo, Hertz expresa: "En lo que precede he intentado demostrar la validez de las ecuaciones de Maxwell partiendo de premisas que son generalmente aceptadas en el sistema opuesto de electromagnetismo, y usando proposiciones que son familiares en él. Consecuentemente, he hecho uso de conceptos del último sistema; pero excepto por esta conexión, la deducción dada no debe ser vista, bajo ningún sentido, como una prueba rigurosa de que el sistema de Maxwell es el único posible. No parece posible deducir tal prueba a partir de nuestras premisas..... Pienso, sin embargo, que de lo precedente podemos inferir sin error, que si la elección está entre el sistema usual del electromagnetismo y el de Maxwell, ciertamente el último debe ser preferido".

Hertz parte de la premisa de que hay un solo tipo de fuerza eléctrica, "... de modo que la fuerza con la cual un trozo de goma atrae o repele pedazos de papel es la misma fuerza por la cual un imán variable induce una corriente eléctrica en un conductor. Luego un cuerpo cargado eléctricamente debería producir una fuerza ponderomotriz sobre un imán móvil, y finalmente, muy distante de la interacción magnética usual, un imán móvil debe actuar por una acción ponderomotriz, con una fuerza eléctrica que depende del movimiento relativo de los imanes. En las teorías de acción a distancia, suponen que tal acción ponderomotriz depende sólo de su magnetización y no de su variación temporal, consecuentemente a partir de este punto de vista tal electrodinámica no puede ser completa....". Dicho trabajo indica claramente dos direcciones en el pensamiento de Hertz: 1) su valoración pero a la vez su independencia de las ideas de Helmholtz, y 2) el comienzo del proceso de "conversión" hacia las ondas electromagnéticas. Este ocurre a lo largo de 1887. En marzo de ese año publica el trabajo "Sobre oscilaciones eléctricas muy rápidas" [11]. Este es de carácter

“netamente Helmholtziano”. En él logra demostrar fenómenos de inducción debidos a corrientes de desplazamiento en dieléctricos. De acuerdo al pensamiento expresado en el trabajo de 1884, tales resultados permitían una corroboración de la reinterpretación electrodinámica de la teoría de Maxwell frente a la de Weber. Un año después (abril de 1888) presenta el trabajo “Sobre ondas eléctricas en el aire”, en el cual acepta la concepción Maxwelliana de campos electromagnéticos y ondas en el espacio. A lo largo de ese proceso de conversión logra sacar los fenómenos eléctricos de los materiales conductores al espacio vacío, el que es considerado, finalmente como un dieléctrico más.

En 1890, cuando ya sus experimentos sobre radiación electromagnética le habían dado prestigio internacional, Hertz escribió dos importantes trabajos teóricos. Esos trabajos ayudaron a la aceptación definitiva en Alemania de la teoría de Maxwell y fueron alagados por eminentes físicos como Planck y Sommerfeld. A fines del siglo pasado, las ecuaciones de Maxwell, tal cual son escritas en la actualidad eran conocidas como las ecuaciones de Maxwell en la forma de Hertz-Heaviside.

A modo de conclusión, puede ser interesante repasar una de las afirmaciones más categóricas realizada por Hertz sobre la teoría de Maxwell. A la pregunta ¿Qué es la teoría de maxwelliana?, no sabría dar una respuesta más breve y precisa que ésta: la teoría maxwelliana es el sistema de ecuaciones de Maxwell. A toda teoría que conduzca a estas ecuaciones, y por consiguiente abarque los mismos posibles fenómenos, la designaría como una forma, o un caso especial de la teoría maxwelliana.¹

Nota

¹ Abraham Pais, en la referencia [12] hace el siguiente comentario sobre esta afirmación de Hertz, que creemos interesante reproducir aquí: “En sí mismo, esto es un comentario brillante, eminentemente citable y carente de sentido, sobre lo mejor que la física de aquel período tenía para ofrecer. La actitud post-maxwelliana, pre-einsteiniana que con el tiempo llegó a preponderar, era que la electrodinámica son las ecuaciones de Maxwell, más la especificación de las densidades de carga y corriente, más una conjetura sobre la naturaleza del éter”. Entre todos los posible, Hertz seleccionó un éter que era arrastrado por la Tierra.

Bibliografía

1. P.W. Lamberti, *Revista de Enseñanza de la Física*, 10, (2) (1997).
2. M.G. Doncel, *Archive for History of Exact Sciences*, 41 (1991).
3. J.G. O'Hara y W. Pritchard, *Hertz and the Maxwellians*, The Institution of Electrical Engineers, Londres.
4. E. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Dover Publications, New York, 1989.
5. J. Z. Buchwald, *The Creation of Scientific Effects*, The University of Chicago Press, 1994
6. W. Scott, *Am. J. Phys.*, 31, 11 (1963).
7. M.B. Hesse, *Forces and Fields*, Philosophical Library, New York.
8. M. Ampere, *Théorie Mathématique des Phenomenes Electro-Dynamiques Uniquement Deducit de L'experience*, Editions Jacques Gabay, 1990.
9. J.C. Maxwell, *Treatise on Electricity and Magnetism*, Dover Publications, Inc., New York, 1962.
10. H. Zatzkis, *Am. J. Phys.* 33, 898 (1965).
11. H. Hertz, *Electric Waves*, Dover Publications, Inc. New York, 1962.
12. A. Pais, *El Señor es sutil... La Vida y la Obra de A. Einstein*, Editorial Ariel, Barcelona 1984.