

ELECTROMAGNETISMO

El **electromagnetismo** es una rama de la física que estudia y unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos en una sola teoría, cuyos fundamentos fueron presentados por Michael Faraday y formulados por primera vez de modo completo por James Clerk Maxwell. La formulación consiste en cuatro ecuaciones diferenciales vectoriales que relacionan el campo eléctrico, el campo magnético y sus respectivas fuentes materiales (corriente eléctrica, polarización eléctrica y polarización magnética), conocidas como ecuaciones de Maxwell.

El electromagnetismo es una teoría de campos; es decir, las explicaciones y predicciones que provee se basan en magnitudes físicas vectoriales o tensoriales dependientes de la posición en el espacio y del tiempo. El electromagnetismo describe los fenómenos físicos macroscópicos en los cuales intervienen cargas eléctricas en reposo y en movimiento, usando para ello campos eléctricos y magnéticos y sus efectos sobre las sustancias sólidas, líquidas y gaseosas. Por ser una teoría macroscópica, es decir, aplicable solo a un número muy grande de partículas y a distancias grandes respecto de las dimensiones de estas, el electromagnetismo no describe los fenómenos atómicos y moleculares, para los que es necesario usar la mecánica cuántica.

El electromagnetismo es considerado como una de las cuatro fuerzas fundamentales del universo actualmente conocido.

Desde la antigua Grecia se conocían los fenómenos magnéticos y eléctricos pero no es hasta inicios del siglo XVII donde se comienza a realizar experimentos y a llegar a conclusiones científicas de estos fenómenos.¹ Durante estos dos siglos, XVII y XVIII, grandes hombres de ciencia como William Gilbert, Otto von Guericke, Stephen Gray, Benjamin Franklin, Alessandro Volta entre otros estuvieron investigando estos dos fenómenos de manera separada y llegando a conclusiones coherentes con sus experimentos.

A principios del siglo XIX Hans Christian Ørsted encontró evidencia empírica de que los fenómenos magnéticos y eléctricos estaban relacionados. De ahí es que los trabajos de físicos como André-Marie Ampère, William Sturgeon, Joseph Henry, Georg Simon Ohm, Michael Faraday en ese siglo, son unificados por James Clerk Maxwell en 1861 con un conjunto de ecuaciones que describían ambos fenómenos como uno solo, como un fenómeno electromagnético.¹

Las ahora llamadas ecuaciones de Maxwell demostraban que los campos eléctricos y los campos magnéticos eran manifestaciones de un solo campo electromagnético. Además describía la naturaleza ondulatoria de la luz, mostrándola como una onda electromagnética.² Con una sola teoría consistente que describía estos dos fenómenos antes separados, los físicos pudieron realizar varios experimentos prodigiosos e inventos muy útiles como la bombilla eléctrica por Thomas Alva Edison o el generador de corriente alterna por Nikola Tesla.³ El éxito predictivo de la teoría de Maxwell y la búsqueda de una interpretación coherente de sus implicaciones, fue lo que llevó a Albert Einstein a formular su teoría de la relatividad que se apoyaba en algunos resultados previos de Hendrik Antoon Lorentz y Henri Poincaré.

En la primera mitad del siglo XX, con el advenimiento de la mecánica cuántica, el electromagnetismo tenía que mejorar su formulación con el objetivo de que fuera coherente con la

nueva teoría. Esto se logró en la década de 1940 cuando se completó una teoría cuántica electromagnética o mejor conocida como electrodinámica cuántica.

Cuando hablamos de electrostática nos referimos a los fenómenos que ocurren debido a una propiedad intrínseca y discreta de la materia, la carga, cuando es estacionaria o no depende del tiempo. La unidad de carga elemental, es decir, la más pequeña observable, es la carga que tiene el electrón.⁴ Se dice que un cuerpo está cargado eléctricamente cuando tiene exceso o falta de electrones en los átomos que lo componen. Por definición el defecto de electrones se la denomina carga positiva y al exceso carga negativa. La relación entre los dos tipos de carga es de atracción cuando son diferentes y de repulsión cuando son iguales.

La carga elemental es una unidad muy pequeña para cálculos prácticos, por eso en el Sistema Internacional la unidad de carga eléctrica, el culombio, se define como la cantidad de carga transportada en un segundo por una corriente de un amperio de intensidad de corriente eléctrica,

que equivale a la carga de $6,25 \times 10^{18}$ electrones. El movimiento de electrones por un conductor se denomina corriente eléctrica y la cantidad de carga eléctrica que pasa por unidad de tiempo se define como la intensidad de corriente. Se pueden introducir más conceptos como el de diferencia de potencial o el de resistencia, que nos conducirían ineludiblemente al área de circuitos eléctricos, y todo eso se puede ver con más detalle en el artículo principal.

El nombre de la unidad de carga se debe a Coulomb quien en 1785 llegó a una relación matemática de la fuerza eléctrica entre cargas puntuales, que ahora se la conoce como ley de Coulomb.

No fue sino hasta el año de 1820, cuando Hans Christian Ørsted descubrió que el fenómeno magnético estaba ligado al eléctrico, que se obtuvo una teoría científica para el magnetismo.⁷ La presencia de una corriente eléctrica, o sea, de un flujo de carga debido a una diferencia de potencial, genera una fuerza magnética que no varía en el tiempo. Si tenemos una carga q a una velocidad v , en un campo magnético B aparecerá una fuerza magnética inducida por el movimiento en esta carga, así:

$$F = q \cdot v \cdot B$$

En las secciones anteriores se han descrito campos eléctricos y magnéticos que no variaban con el tiempo. Pero los físicos a finales del siglo XIX descubrieron que ambos campos estaban ligados y así un campo eléctrico en movimiento, una corriente eléctrica que varíe, genera un campo magnético y un campo magnético de por sí implica la presencia de un campo eléctrico. Entonces, lo primero que debemos definir es la fuerza que tendría una partícula cargada que se mueva en un campo magnético y así llegamos a la unión de las dos fuerzas anteriores, lo que hoy conocemos como la fuerza de Lorentz:

$$F = q \cdot (E + v \cdot B)$$

La genialidad del trabajo de Maxwell es que sus ecuaciones describen un campo eléctrico que va ligado inequívocamente a un campo magnético perpendicular a este y a la dirección de su propagación, este campo es ahora llamado campo electromagnético.¹⁰ Además la solución de estas ecuaciones permitía la existencia de una onda que se propagaba a la velocidad de la luz, con lo que

además de unificar los fenómenos eléctricos y magnéticos la teoría formulada por Maxwell predecía con absoluta certeza los fenómenos ópticos.

Así la teoría predecía a una onda que, contraria a las ideas de la época, no necesitaba un medio de propagación; la onda electromagnética se podía propagar en el vacío debido a la generación mutua de los campos magnéticos y eléctricos. Esta onda a pesar de tener una velocidad constante, la velocidad de la luz c , puede tener diferente longitud de onda y consecuentemente dicha onda transporta energía. La radiación electromagnética recibe diferentes nombres al variar su longitud de onda, como rayos gamma, rayos X, espectro visible, etc.; pero en su conjunto recibe el nombre de espectro electromagnético.

Clásicamente, al fijar un sistema de referencia, se puede descomponer los campos eléctricos y magnéticos del campo electromagnético. Pero al tener a un observador con movimiento relativo respecto al sistema de referencia, este medirá efectos eléctricos y magnéticos diferentes de un mismo fenómeno electromagnético. El campo eléctrico y la inducción magnética a pesar de ser elementos vectoriales no se comportan como magnitudes físicas vectoriales, por el contrario la unión de ambos constituye otro ente físico llamado tensor y en este caso el tensor de campo electromagnético.

Posteriormente a la revolución cuántica de inicios del siglo XX, los físicos se vieron forzados a buscar una teoría cuántica de la interacción electromagnética. El trabajo de Einstein con el efecto fotoeléctrico y la posterior formulación de la mecánica cuántica sugerían que la interacción electromagnética se producía mediante el intercambio de partículas elementales llamadas fotones. La nueva formulación cuántica lograda en la década de los años 40 del siglo XX describía la interacción de este fotón portador de fuerza y las otras partículas portadoras de materia.¹²

La electrodinámica cuántica es principalmente una teoría cuántica de campos renormalizada. Su desarrollo fue obra de Sinitiro Tomonaga, Julian Schwinger, Richard Feynman y Freeman Dyson alrededor de los años 1947 a 1949.¹³ En la electrodinámica cuántica, la interacción entre partículas viene descrita por un lagrangiano que posee simetría local, concretamente simetría de gauge. Para la electrodinámica cuántica, el campo de gauge donde las partículas interactúan es el campo electromagnético y esas partículas son los fotones.

La **interacción electromagnética** es la interacción que ocurre entre las partículas con carga eléctrica. Desde un punto de vista macroscópico y fijado un observador, suele separarse en dos tipos de interacción, la interacción electrostática, que actúa sobre cuerpos cargados en reposo respecto al observador, y la interacción magnética, que actúa solamente sobre cargas en movimiento respecto al observador.

Las partículas fundamentales interactúan electromagnéticamente mediante el intercambio de fotones entre partículas cargadas. La electrodinámica cuántica proporciona la descripción cuántica de esta interacción, que puede ser unificada con la interacción nuclear débil según el modelo electrodébil.

El tratamiento que la física cuántica hace del electromagnetismo se conoce con el nombre de electrodinámica cuántica o QED. En esta teoría el campo está asociado a una partícula sin masa

denominada fotón, cuyas interacciones con las partículas cargadas son las causantes de todos los fenómenos del electromagnetismo.

Cuando en esta teoría se introduce la interpretación de partículas, mediante el formalismo del espacio de Fock, la materia es interpretada por estados fermiónicos, mientras que el propio campo electromagnético queda descrito por estados de bosones gauge "portadores de la interacción", llamados fotones.

Albert Einstein desarrolló la teoría de la relatividad especial merced a un análisis de la electrodinámica. Durante finales del siglo XIX los físicos se percataron de una contradicción entre las leyes aceptadas de la electrodinámica y la mecánica clásica. En particular, las ecuaciones de Maxwell predecían resultados no intuitivos como que la velocidad de la luz es la misma para cualquier observador y que no obedece a la invariancia galileana. Se creía, pues, que las ecuaciones de Maxwell no eran correctas y que las verdaderas ecuaciones del electromagnetismo contenían un término que se correspondería con la influencia del éter lumínico.

Después de que los experimentos no arrojasen ninguna evidencia sobre la existencia del éter, Einstein propuso la revolucionaria idea de que las ecuaciones de la electrodinámica eran correctas y que algunos principios de la mecánica clásica eran inexactos, lo que le llevó a la formulación de la teoría de la relatividad especial.

Unos quince años antes del trabajo de Einstein, Emil Wiechert y, más tarde, Alfred-Marie Liénard buscaron las expresiones de los campos electromagnéticos de cargas en movimiento. Esas expresiones, que incluían el efecto del retardo de la propagación de la luz, se conocen ahora como potenciales de Liénard-Wiechert. Un hecho importante que se desprende del retardo es que un conjunto de cargas eléctricas en movimiento ya no puede ser descrito de manera exacta mediante ecuaciones que sólo dependa de las velocidades y posiciones de las partículas. En otras palabras, eso implica que el lagrangiano debe contener dependencias de los "grados de libertad" internos del campo.

La electrodinámica cuántica (ó QED, *Quantum ElectroDynamics*), como sugiere su nombre, es la versión cuántica de la electrodinámica. Esta teoría cuántica se describe el campo electromagnético en términos de fotones intercambiados entre partículas cargadas, al estilo de la teoría cuántica de campos. Por tanto, la electrodinámica cuántica se centra en la descripción cuántica del fotón y su interacción/intercambio de energía y momento lineal con las partículas cargadas.

Se puede señalar que la formulación de la teoría de la relatividad restringida se compone de dos partes, una de ellas «cinemática», descrita anteriormente, y que establece las bases de la teoría del movimiento – y, por consiguiente, del conjunto de la teoría– dándoles su expresión matemática, y una parte «electrodinámica» que, combinando las propuestas de la primera parte con la teoría electromagnética de Maxwell, Hertz y Lorentz , establece deductivamente un cierto número de teoremas sobre las propiedades de la luz y, en general de las ondas electromagnéticas como, asimismo, la dinámica del electrón.

La **electrostática** es la rama de la Física que analiza los efectos mutuos que se producen entre los cuerpos como consecuencia de su carga eléctrica, es decir, el estudio de las cargas eléctricas en

equilibrio. La carga eléctrica es la propiedad de la materia responsable de los fenómenos electrostáticos, cuyos efectos aparecen en forma de atracciones y repulsiones entre los cuerpos que la poseen.

Históricamente, la electrostática fue la rama del electromagnetismo que primero se desarrolló. Con la postulación de la ley de Coulomb fue descrita y utilizada en experimentos de laboratorio a partir del siglo XVII, y ya en la segunda mitad del siglo XIX las leyes de Maxwell concluyeron definitivamente su estudio y explicación, y permitieron demostrar cómo las leyes de la electrostática y las leyes que gobiernan los fenómenos magnéticos pueden ser analizadas en el mismo marco teórico denominado electromagnetismo.

Alrededor del año 600 a. C., el filósofo griego Tales de Mileto descubrió que si frotaba un trozo de la resina vegetal fósil llamada ámbar, en griego *élektron*, este cuerpo adquiriría la propiedad de atraer pequeños objetos. Algo más tarde, otro griego, Teofrasto (310 a. C.), realizó un estudio de los diferentes materiales que eran capaces de producir fenómenos eléctricos y escribió el primer tratado sobre la electricidad.

A principios del siglo XVII comienzan los primeros estudios sobre la electricidad y el magnetismo orientados a mejorar la precisión de la navegación con brújulas magnéticas. El físico real británico William Gilbert utiliza por primera vez la palabra electricidad, creada a partir del término griego *elektron* (ámbar). El jesuita italiano Niccolo Cabeo analizó sus experimentos y fue el primero en comentar que había fuerzas de atracción entre ciertos cuerpos y de repulsión entre otros.

Alrededor de 1672 el físico alemán Otto von Guericke construye la primera máquina electrostática capaz de producir y almacenar energía eléctrica estática por rozamiento. Esta máquina consistía en una bola de azufre atravesada por una varilla que servía para hacer girar la bola. Las manos aplicadas sobre la bola producían una carga mayor que la conseguida hasta entonces. Francis Hawksbee perfeccionó hacia 1707 la máquina de fricción usando una esfera de vidrio.

En 1733 el francés Francois de Cisternay du Fay propuso la existencia de dos tipos de carga eléctrica, positiva y negativa, constatando que:

- Los objetos frotados contra el ámbar se repelen.
- También se repelen los objetos frotados contra una barra de vidrio.
- Sin embargo, los objetos frotados con el ámbar atraen los objetos frotados con el vidrio.

Du Fay y Stephen Gray fueron dos de los primeros "físicos eléctricos" en frecuentar plazas y salones para popularizar y entretener con la electricidad. Por ejemplo, se electriza a las personas y se producen descargas eléctricas desde ellas, como en el llamado *beso eléctrico*: se electrificaba a una dama y luego ella daba un beso a una persona no electrificada.¹

En 1745 se construyeron los primeros elementos de acumulación de cargas, los condensadores, llamados incorrectamente por anglicismo *capacitores*, desarrollados en la Universidad de Leyden (hoy Leiden) por Ewald Jürgen Von Kleist y Pieter Van Musschenbroeck. Estos instrumentos, inicialmente denominados *botellas de Leyden*, fueron utilizados como curiosidad científica durante gran parte del siglo XVIII.