<u>Tema 1:</u> Ondas electromagnéticas

La controversia sobre la naturaleza de la luz ha sido una de las más interesantes y prolongadas a lo largo de la Historia de la Ciencia.

Los griegos consideraron la luz como un haz de partículas que partían de los ojos y palpaban los objetos. Pronto se comprobó que no era razonable suponer que las partículas partiesen de los ojos pero la idea básica de que la luz estaba formada por pequeñas partículas que viajaban en línea recta fue admitida sin discusión durante siglos.

Esta teoría fue apoyada por **Newton** (1642 – 1727) y **Descartes** (1596 – 1650). Con ella se podía explicar la propagación rectilínea y la ley de reflexión. La ley de refracción fue explicada satisfactoriamente por Descartes pero dicha explicación necesitaba postular que la luz viajaba más rápido en medios más densos (luego se vería que esta suposición era incorrecta). Newton, con la teoría corpuscular, fue capaz de explicar la dispersión de la luz blanca en un prisma suponiendo que las partículas de la luz de cada color tenían diferentes masas.

Pero hubo fenómenos que no fueron capaces de explicar, como la difracción de la luz o la interferencia. El propio Newton era consciente de que la teoría corpuscular era insuficiente para explicar todos los fenómenos.

A mediados del siglo XVII empezaron a surgir las primeras críticas a la teoría corpuscular. Se había observado que la luz producía fenómenos de interferencia y difracción, hasta entonces sólo observados en las ondas y la idea de que la luz fuese una onda empezó a tomar fuerza. Los defensores de la teoría ondulatoria fueron **Huygens** (1629 – 1695) y **Hook** (1635 – 1703). Huygens explicó las leyes de reflexión y refracción mediante la teoría ondulatoria. Pero el hecho de que el resto de ondas conocidas se expandiesen en todas direcciones en vez de viajar en línea recta como la luz hacia inadmisible la teoría ondulatoria según Newton, contemporáneo de Huygens. A pesar del gran número de experimentos que ponían de manifiesto la naturaleza ondulatoria de la luz, la gran autoridad científica de Newton hizo difícil, incluso después de su muerte, la aceptación de la teoría ondulatoria. Por ejemplo **Young** (1773 – 1829) hizo grandes avances en el estudio de las interferencias, tanto de la luz como del sonido, llegando a medir incluso la longitud de onda de la luz. Pero sus trabajos no tuvieron mucho éxito en su día.

En el siglo XIX, las contribuciones de **Fresnel** (1788 – 1827) fueron decisivas para inclinar la balanza a favor de la teoría ondulatoria. Basándose en las teorías de Huygens, las dotó de un soporte matemático riguroso y llevó a cabo numerosos estudios sobre interferencia y difracción. Consiguió justificar la propagación rectilínea de la luz a causa de su pequeña longitud de onda (previamente medida por Young). El descubrimiento que acabó finalmente con la teoría corpuscular fue la medición de la velocidad de la luz en el agua de Foucault (1850) comprobando que es menor que en el aire, lo que echaba por tierra la suposición de Descartes para explicar la refracción.

Aceptado el carácter ondulatorio de la luz, quedaba por averiguar cuál era la magnitud física que se propaga en esas ondas luminosas

Siempre que una magnitud física verifique la ecuación de onda (conocida desde hacía tiempo por el estudio de ondas en cuerdas) se puede asegurar que sus perturbaciones pueden propagarse en forma de ondas. La ecuación de onda para la magnitud Ψ es:

$$\nabla^2 \vec{\Psi} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{\Psi}}{\partial t^2}$$

donde v es la velocidad de propagación de la onda. El término de la izquierda se denomina Laplaciano y, en coordenadas cartesianas y para una componente de $\vec{\Psi}$, la ecuación se escribe:

$$\frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial t^2}$$

con ecuaciones idénticas para el resto de componentes de la magnitud $\vec{\Psi}$.

En este estado del debate, aparece en escena **James Clerk Maxwell** (1831 – 1879) que fue capaz de agrupar y ampliar todo el conocimiento de Electromagnetismo en sus famosas cuatro ecuaciones integro-diferenciales.

Las ecuaciones de Maxwell en forma integral son las siguientes:

1. $\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{enc}}{\in} = \frac{1}{\in} \int_V \rho dV$ (Ley de Gauss, que indica que la presencia de una carga eléctrica produce un campo eléctrico).

2. $\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$ (Ley de Gauss magnética, que indica que no existe el equivalente magnético de la carga eléctrica, es decir, el monopolo magnético).

3. $\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = \varepsilon = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$ (Ley de Faraday, que indica que un campo magnético variable es capaz de generar un campo eléctrico).

4. $\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu I + \mu \in \frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{E} \cdot d\vec{S} = \mu \int_s (\vec{J} + \in \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \cdot d\vec{S}$ donde $\vec{J}$ es la densidad de la corriente. Esta es la Ley de Ampere – Maxwell que expresa que tanto un campo eléctrico variable como una corriente eléctrica pueden producir un campo magnético.

La primera parte de la ecuación es la Ley de Ampere, pero Maxwell se dio cuenta de que mientras se está descargando o cargando un condensador se puede medir un campo magnético en la región entre sus placas. Sin embargo, ninguna corriente atraviesa el condensador. El campo eléctrico en el interior es:

$$E = \frac{\sigma}{\in} = \frac{Q}{S \cdot \in}$$

En el proceso de carga, la carga varía y el campo eléctrico cambia:

$$\frac{dQ}{dt} = S\cdot \in \cdot \frac{dE}{dt} \Rightarrow \frac{i}{S} = \in \cdot \frac{dE}{dt} \quad \text{donde} \quad {}^{i}\!/_{s} = J$$

Maxwell comprobó que el mismo efecto que una corriente eléctrica (o densidad) lo provocaba un campo eléctrico variable en el tiempo por lo que incluyó también este segundo término en la ecuación fuente para el campo magnético.

A partir de las ecuaciones de Maxwell en forma integral (que ofrecen una visión global, conjunta) se puede pasar a las ecuaciones en forma diferencial (descripción punto a punto) por medio de los teoremas integrales:

- <u>Teorema de la divergencia o de Green – Ostrogradski:</u>

$$\oint_s \vec{E}\cdot d\vec{S} = \int_V (\nabla\cdot\vec{E})dV$$

- <u>Teorema del rotacional o de Stokes:</u>

$$\oint_c \vec{E}\cdot d\vec{l} = \int_s (\nabla\wedge\vec{E})\cdot d\vec{S}$$

Por ejemplo, transformemos las integrales:

$$\oint_s \vec{E}\cdot d\vec{S} = \int_V (\nabla\cdot\vec{E})dV = \int_v \frac{\rho}{\in}dV \Rightarrow \nabla\cdot\vec{E} = \frac{\rho}{\in}$$

$$\oint_s \vec{B}\cdot d\vec{S} = \int_V (\nabla\cdot\vec{B})dV = 0 \Rightarrow \nabla\cdot\vec{B} = 0$$

$$\oint_c \vec{E}\cdot d\vec{l} = \int_s (\nabla\wedge\vec{E})\cdot d\vec{S} = \int_s (-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t})\cdot d\vec{S} \Rightarrow \nabla\wedge\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

$$\int_c \vec{B}\cdot d\vec{l} = \int_s (\nabla\wedge\vec{B})\cdot d\vec{S} = \int_s \mu(\vec{J} + \in\frac{\partial\vec{E}}{\partial t})\cdot d\vec{S} \Rightarrow \nabla\wedge\vec{B} = \mu\vec{J} + \mu\in\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$$

Particularicemos ahora estas ecuaciones para el vacío en ausencia de cargas y corrientes ($\vec{J} = 0, \in = \in_0, \mu = \mu_0, \rho = 0$):

$$\nabla\cdot\vec{E} = \frac{\rho}{\in_0} = 0, \nabla\cdot\vec{B} = 0, \nabla\wedge\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}, \nabla\wedge\vec{B} = \mu_0 \in_0 \frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$$

Y realicemos las siguientes manipulaciones:

$$\nabla\wedge(\nabla\wedge\vec{B}) = \mu_0\cdot\in_0 \nabla\wedge\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \in_0 \cdot\frac{\partial}{\partial t}(\nabla\wedge\vec{E}) = -\mu_0\cdot\in_0 \frac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2}$$

Pero $\nabla\wedge(\nabla\wedge\vec{B}) = \nabla\underbrace{(\nabla\cdot\vec{B})}_{0} - \nabla^2\vec{B}$. Por lo que:

$$\boxed{\nabla^2\vec{B} = \mu_0 \in_0 \frac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2}}$$

Procediendo de igual forma con el campo eléctrico se obtiene:

$$\nabla \wedge (\nabla \wedge \vec{E}) = -\nabla \wedge \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \wedge \vec{B}) = -\mu_0 \cdot \in_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Pero $\nabla \wedge (\nabla \wedge \vec{E}) = \nabla(\underbrace{\nabla \cdot \vec{E}}_{0}) - \nabla^2 \vec{E} \Rightarrow$ $\boxed{\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \cdot \in_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}}$

que son las ecuaciones de onda para el campo eléctrico y magnético. Dicha onda se propaga a la velocidad dada por:

$$\frac{1}{v^2} = \mu_0 \cdot \in_0 \Rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{8'85 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} \approx 3 \cdot 10^8 \, m/s$$

¡¡la velocidad de la luz en el vacío!!

Es decir, la luz es definitivamente una perturbación electromagnética que se propaga a través de ondas. Como se tenía la creencia de que las ondas necesitaban un medio material para propagarse se postuló que dicho medio era el éter.

Estas predicciones teóricas fueron confirmadas experimentalmente por **Hertz** en 1887 cuando, por medio de circuitos oscilantes, produjo y detectó ondas electromagnéticas. Asimismo, **Kirchoff** y otros utilizaron las ecuaciones de Maxwell para explicar los fenómenos de interferencia y difracción con lo que, además de la naturaleza ondulatoria de la luz, se confirmaba su naturaleza electromagnética.

Esto parecía poner punto y final a la controversia entre teoría ondulatoria y corpuscular, pero nada más lejos de la realidad. En los mismos experimentos de Hertz que confirmaban la teoría ondulatoria, Hertz descubrió el efecto fotoeléctrico (objeto de estudio en el tema 3), para el que la teoría ondulatoria no tenía una respuesta definitiva.