Sintesis de Maxwell. Unificación de los fenómenos eléctricos magnéticos y ópticos.

Corriente de Desplazamiento de Maxwell.

Al estudiar el campo magnético se explica la ley de Ampère, que relaciona la circulación del campo magnético sobre una curva cerrada C, con la intensidad que atraviesa cualquier superficie que se apoyara en la curva C. En la figura las superficies S_1 y S_2.

$$\oint \vec{B} \cdot \overrightarrow{dS} = \mu_0 I$$

siendo $d\vec{s}$ un elemento de longitud sobre la curva C. Maxwell se dio cuenta que en determinadas circunstancias la ecuación anterior daba resultados inconsistentes. Por ejemplo supongamos una situación física como la de la fig.1. Una corriente de intensidad I está cargando un condensador plano, verificándose

$$I = \frac{dQ}{dt} \ ,$$

y estableciendo un campo eléctrico $\vec{E}$ entre sus armaduras.

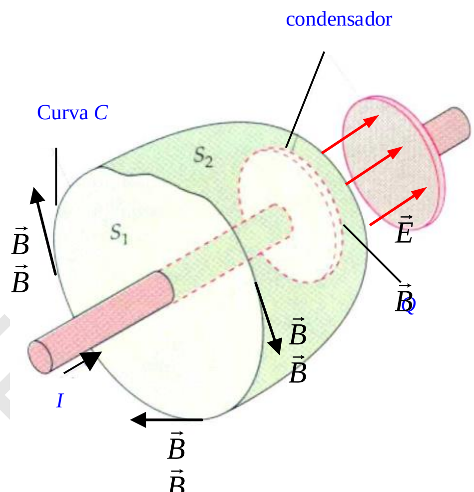


Fig.1 Condensador, una de cuyas armaduras está rodeada por la superficie S_2 .

La aplicación de la ley de Ampère tomando S_1 como la superficie que se apoya en C nos dice que la circulación de $\vec{B}$ es igual a $\mu_0 I$. Sin embargo, si tomáramos la superficie S_2, la cual no es atravesada por el cable conductor, la ley de Ampère nos diría que la circulación de $\vec{B}$ es nula. ¡No hay carga eléctrica saltando de una armadura a otra!. La intensidad a lo largo de un cable conductor es discontinua siempre que tengamos condensadores distribuidos en partes de un circuito. Sabemos que el resultado correcto es el primero, pues conociendo el campo magnético que crea un hilo infinito por la ley de Biot-Savart, deducimos que su circulación es $\mu_0 I$. ¿Qué es lo que le falta entonces a la ley de Ampère para que se siga cumpliendo incluso cuando escogemos la S_2, como superficie que se apoya en C ?.

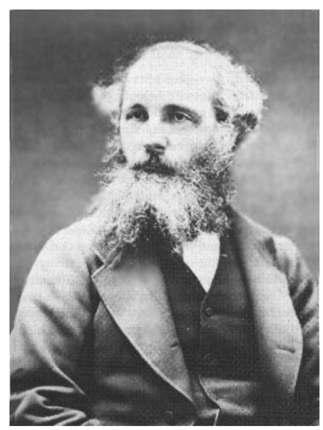
Maxwell mostró que la ley de Ampère puede ser generalizada para incluir todo tipo de situaciones si la corriente I en la ecuación es sustituida por la suma de la corriente de conducción I más otro término I_d, llamado **corriente de desplazamiento de Maxwell,** definido como

$$I_d = \varepsilon_0 \frac{d\phi_e}{dt} \ ,$$

donde ϕ_e es el flujo del campo eléctrico a través de la misma superficie que se apoya en C. Efectivamente podemos ahora comprobar que el resultado que nos da la ley de Ampère cuando escogemos la superficie S_2, es el correcto si incluimos la corriente de desplazamiento de Maxwell. Recordando la ley de Gauss para el flujo del campo eléctrico.

$$\phi_e \approx E \times (area\ cond.) \approx \frac{Q}{\varepsilon_0} \ , \quad \Rightarrow \ \varepsilon_0 \frac{d\phi_e}{dt} = \varepsilon_0 \frac{d}{dt}\left(\frac{Q}{\varepsilon_0}\right) = \frac{dQ}{dt} = I \ .$$

Es decir, $I_d \equiv I$ en este caso, y no hay inconsistencia alguna en la ley de Ampère. La ley de Ampère generalizada se escribirá por lo tanto.



James Clerk Maxwell. Físico escocés(1831-1879) que unifico la electricidad y el magnetismo y predijo la existencia de ondas electromagnéticas.

$$\oint \vec{B} \cdot \overrightarrow{dS} = \mu_o (I + I_d) = \mu_o I + \mu_o \, \varepsilon_o \frac{d\Phi_e}{dt} = \mu_o I + \mu_o \, \varepsilon_o \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot \overrightarrow{dA}$$

En la situación física más general que uno pudiera imaginarse los dos términos de la ecuación, intensidad I y corriente de desplazamiento I_d contribuyen ambos a la circulación de $\vec{B}$. En el ejemplo mostrado en la fig.1 tenemos los dos casos extremos. Si tomamos la superficie S_1 el efecto de la corriente de desplazamiento será despreciable ya que el campo eléctrico fuera de las armaduras del condensador es prácticamente nulo. Y al contrario si tomamos la superficie S_2, el único efecto en este caso será el de la corriente de desplazamiento de Maxwell.

Aproximación histórica a las ecuaciones de Maxwell.

La generalización llevada a cabo por el físico escocés **James Clerk Maxwell** de la ley de Ampère por medio de la corriente de desplazamiento, permitió unificar la descripción de todos los fenómenos eléctricos y magnéticos así como los de las ondas electromagnéticas (incluidos fenómenos ópticos). El conjunto de ecuaciones que describen todo el electromagnetismo clásico (sin efectos cuánticos) fue propuesto por primera vez por Maxwell:

- Ley de Gauss para el campo eléctrico

$$\Phi_e = \oint_S \vec{E} \cdot \overrightarrow{dS} = \frac{Q}{\epsilon_o}$$

El flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada S es igual a la carga encerrada dividida por ε_0.

- Ley de Gauss para el campo magnético

$$\Phi_m = \oint_S \vec{B} \cdot \overrightarrow{dS} = 0$$

El flujo del campo magnético a través de una superficie cerrada S es igual a cero. No existen polos magnéticos aislados

- Ley de Faraday

$$\oint_C \vec{E}_i \cdot \overrightarrow{dr} = -\frac{d}{dt} \int_{S_C} \vec{B} \cdot \overrightarrow{dS}$$

La circulación del campo eléctrico inducido, sobre una curva cerrada C es igual a menos la variación con respecto del tiempo del flujo de $\vec{B}$ a través de una superficie que se apoye en C.

- Ley de Ampére-Maxwell

$$\oint \vec{B} \cdot \overrightarrow{dS} = \mu_o I + \mu_o \, \varepsilon_o \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot \overrightarrow{dA}$$

La circulación del campo magnético sobre una curva cerrada C es igual a μ_0 veces la suma de las intensidades de corriente de conducción y la de desplazamiento de Maxwell.

La ley de Ampère-Maxwell establece una cierta simetría entre el campo eléctrico y el campo magnético: un **campo magnético variable** con el tiempo genera un campo eléctrico (ley de Faraday), y viceversa, **un campo eléctrico variable** con el tiempo genera también un campo magnético (ley de Ampère-Maxwell). Los campos eléctrico y magnético se apoyan el uno en el otro y las ecuaciones de Maxwell permiten de este modo la existencia de ondas electromagnéticas propagándose en el vacío, fig.2. Además, se demuestra que las ecuaciones de Maxwell, al contrario que las de Newton, son compatibles con la teoría de la relatividad de Einstein.

Las ecuaciones de Maxwell en el electromagnetismo juegan el mismo papel que las leyes de Newton en la mecánica. Todas los problemas de electricidad y magnetismo pueden resolverse usando las ecuaciones de Maxwell. Estas son considerablemente más complicadas que las leyes de Newton. Las ecuaciones de Maxwell pueden combinarse para describir las ondas electromagnéticas. Dichas ondas son producidas cuando las cargas eléctricas son aceleradas; por ejemplo los electrones de conducción de una corriente alterna en una antena.

Las ondas electromagnéticas fueron producidas por primera vez en laboratorio por el científico Heinrich Hertz en 1887. Maxwel mostró que la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio libre (velocidad de la luz) debería ser

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

en donde ε_0, permitividad eléctrica del vacío, es la constante que aparece en la ley de Gauss del campo eléctrico; μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío y es la constante que aparece en la ley de Ampère-Maxwell. La determinación experimental de la velocidad de la luz, $c \approx 3 \times 10^8\ m/s$, junto con la definición de μ_0 (recuerda la definición del Amperio) nos permite deducir el valor de la permitividad dieléctrica del vacío ε_0. Maxwell, sin embargo, fue el primero en notar que a partir del valor de μ_0 y la determinación experimental de ε_0, el valor que se obtenía, en aquellos tiempos, para la cantidad $1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$, coincidía con las medida de la velocidad de la luz, y correctamente supuso que la luz misma debía ser una onda electromagnética.

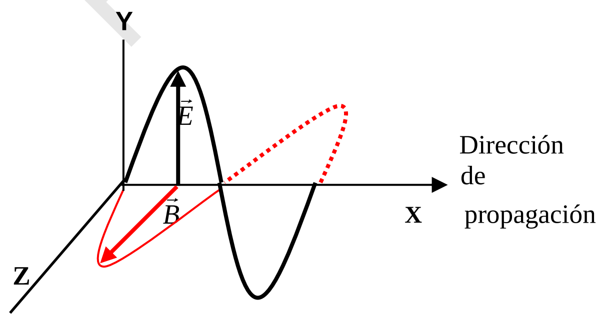


Fig.8. . Una onda electromagnética está formada por un campo eléctrico $\vec{E}$ y otro magnético $\vec{B}$, perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación. Las ondas electromagnéticas son ondas transversales que se propagan incluso en el vacío. Pertenecen a este categoria: las ondas de televisón y de radio, las microondas, la radiación infrarroja, la luz visible, la luz ultravioleta, los rayos X ; y la radiación γ. Como verás en la Óptica Física, las ondas electromagnéticas como la luz, por ser transversales pueden ser polarizadas.