



**INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA**  
**ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS**

**IES La Magdalena.**  
**Avilés. Asturias**

Según se ha visto en los temas anteriores las fuentes del campo eléctrico son las cargas eléctricas, mientras que las corrientes eléctricas originan campos magnéticos.

El estudio de los campos eléctricos y magnéticos estacionarios (no variables) puede reducirse a sólo cuatro ecuaciones que permiten el cálculo de los campos correspondientes si se conoce la distribución de cargas o las corrientes eléctricas.

Estas ecuaciones, no obstante, no recogen el hecho de que los campos eléctricos y magnéticos están relacionados, ya que, como se ha visto, es posible obtener corrientes eléctricas a partir de campos magnéticos.

**Ecuaciones para los campo eléctricos y magnéticos estacionarios**

Ley	Forma integral	Significado
Ley Gauss campo eléctrico	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$	Las cargas son las fuentes del campo eléctrico. Las cargas interactúan según la ley de Coulomb.
Ley Gauss campo magnético	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	No existen fuentes del campo magnético. No es posible aislar los polos magnéticos (no existe el denominado "monopolo magnético")
Circulación campo eléctrico	$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$	Las líneas de fuerza del campo eléctrico no son cerradas. El campo eléctrico es conservativo.
Circulación campo magnético. Ley de Ampere	$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$	Las líneas de fuerza del campo magnético son cerradas. El campo magnético no es conservativo.



**James Clerk Maxwell**  
(1831-1879)

De lo estudiado podríamos concluir que las cargas eléctricas son sensibles tanto a la interacción eléctrica como a la magnética. Además, las corrientes eléctricas generan campos magnéticos y los campos magnéticos variables pueden generar corrientes eléctricas (campos eléctricos), lo que demuestra que ambas interacciones están relacionadas. Podemos hablar de la **interacción electromagnética** o **campo electromagnético**. La electricidad y el magnetismo, por tanto, no son más que manifestaciones del campo electromagnético

Fue **James Clerk Maxwell** quien unificó en una teoría consistente (síntesis que muchas veces se compara con la realizada en la Mecánica por Newton doscientos años antes) los conocimientos existentes hasta la fecha sobre electricidad y magnetismo.

Maxwell publicó sus ya famosas ecuaciones en 1865 en un trabajo titulado ***A Dynamical Theory the Electromagnetic Field***.

Las ecuaciones, en la publicación original, no estaban escritas en la forma actual y constituían un conjunto de veinte ecuaciones que fueron posteriormente reducidas a trece por el propio Maxwell. La formulación actual se debe a Heaviside y Gibbs y data de 1885.

Las ecuaciones de Maxwell son compatibles con la Teoría de la Relatividad de Einstein, sin embargo dejan de tener validez en el dominio atómico, donde la electrodinámica clásica ha de ser reemplazada por la electrodinámica cuántica.

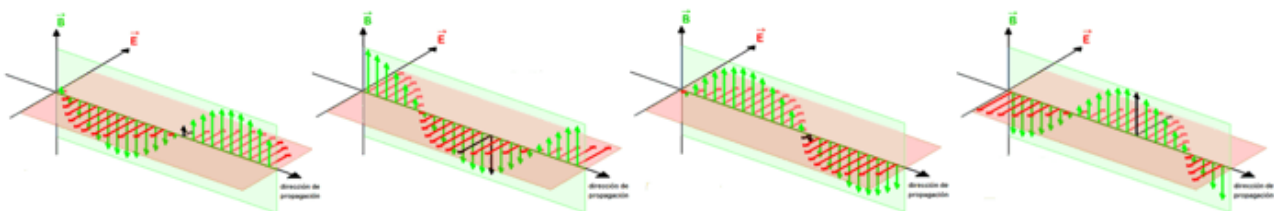
Ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético		
Ley	Forma integral	Significado
<b>I Ley de Maxwell.</b> Ley Gauss para el campo eléctrico	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$	Las cargas son las fuentes del campo eléctrico. Las cargas interactúan según la ley de Coulomb.
<b>II Ley de Maxwell.</b> Ley Gauss para el campo magnético	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	No existen fuentes del campo magnético. No es posible aislar los polos magnéticos (no existe el denominado "monopolo magnético")
<b>III Ley de Maxwell</b> Ley de Faraday-Henry	$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d}{dt} \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$	Un campo magnético variable con el tiempo implica la existencia de un campo eléctrico también variable.
<b>IV Ley de Maxwell</b> Ley de Ampere-Maxwell	$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt} \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$	Si suprimimos el segundo sumando del segundo miembro obtenemos la ley de Ampere (una corriente eléctrica genera un campo magnético). El segundo sumando (introducido por Maxwell) establece que un campo eléctrico variable genera un campo magnético también variable.

Del estudio de las ecuaciones de Maxwell pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Un campo eléctrico oscilante:  $E = E_0 \sin(kx - \omega t)$ , induciría en un punto del espacio otro campo magnético, también oscilante, perpendicular y en fase con él:  $B = B_0 \sin(kx - \omega t)$ .
- Del estudio de las ecuaciones se deduce que **ambos campos se propagan de forma análoga a como lo hacen las ondas**, con una velocidad que para el vacío o el aire vale:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{N \cdot s^2}{C^2}}} = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

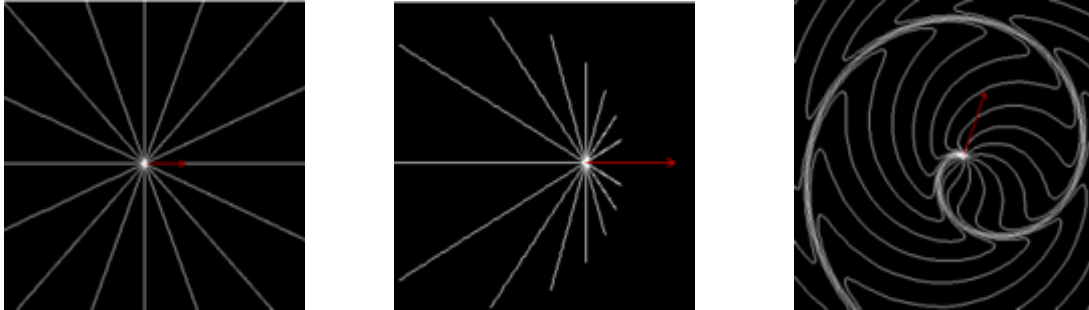
- Las ondas predichas consisten en campos eléctricos y magnéticos oscilantes y mutuamente perpendiculares que se propagan, incluso en el vacío, a una velocidad igual a la de la luz y fueron bautizadas con el nombre de **ondas electromagnéticas**.
- El hecho de que las ondas electromagnéticas se propagaran con idéntica velocidad que la luz llevó a la consideración de que **la luz misma no es más que una onda electromagnética**. La teoría de Maxwell unificaba así óptica y electromagnetismo.



Secuencia de una onda electromagnética propagándose hacia la derecha. Consta de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, en fase, y mutuamente perpendiculares.

- **Una carga acelerada irradia energía en forma de ondas electromagnéticas.**

Si la carga no se mueve con velocidad constante, sino que acelera, producirá un campo eléctrico variable (ver figura). Como consecuencia, se inducirá un campo magnético también variable en fase con el primero y perpendicular a él. Esto es, una onda electromagnética. Por tanto, una carga acelerada irradia energía en forma de ondas electromagnéticas.



**Izquierda:** campo eléctrico creado por una carga que se mueve con velocidad constante. El campo eléctrico es uniforme.

**Centro:** campo eléctrico creado por una carga que se mueve hacia la derecha con aceleración. El campo eléctrico no es uniforme. Muestra una mayor intensidad (líneas más juntas) en la zona anterior que en la posterior.

**Derecha:** campo creado por una carga que se mueve con movimiento circular uniforme. El campo eléctrico es más complejo y también variable.

Captura de pantalla de:

<http://www.cco.caltech.edu/~phys1/java/phys1/MovingCharge/MovingCharge.html>



**Heinrich Hertz**  
(1857-1894)

**Hertz** confirmó las predicciones teóricas realizadas por Maxwell sobre las ondas electromagnéticas al lograr producir y detectar este tipo de ondas en 1888.

Hertz obtuvo como valor para la velocidad de propagación para las ondas electromagnéticas (desde entonces también llamadas hertzianas) el valor predicho por Maxwell:  $3 \cdot 10^8$  m/s.

*"He repetido los experimentos con el mayor cuidado.*

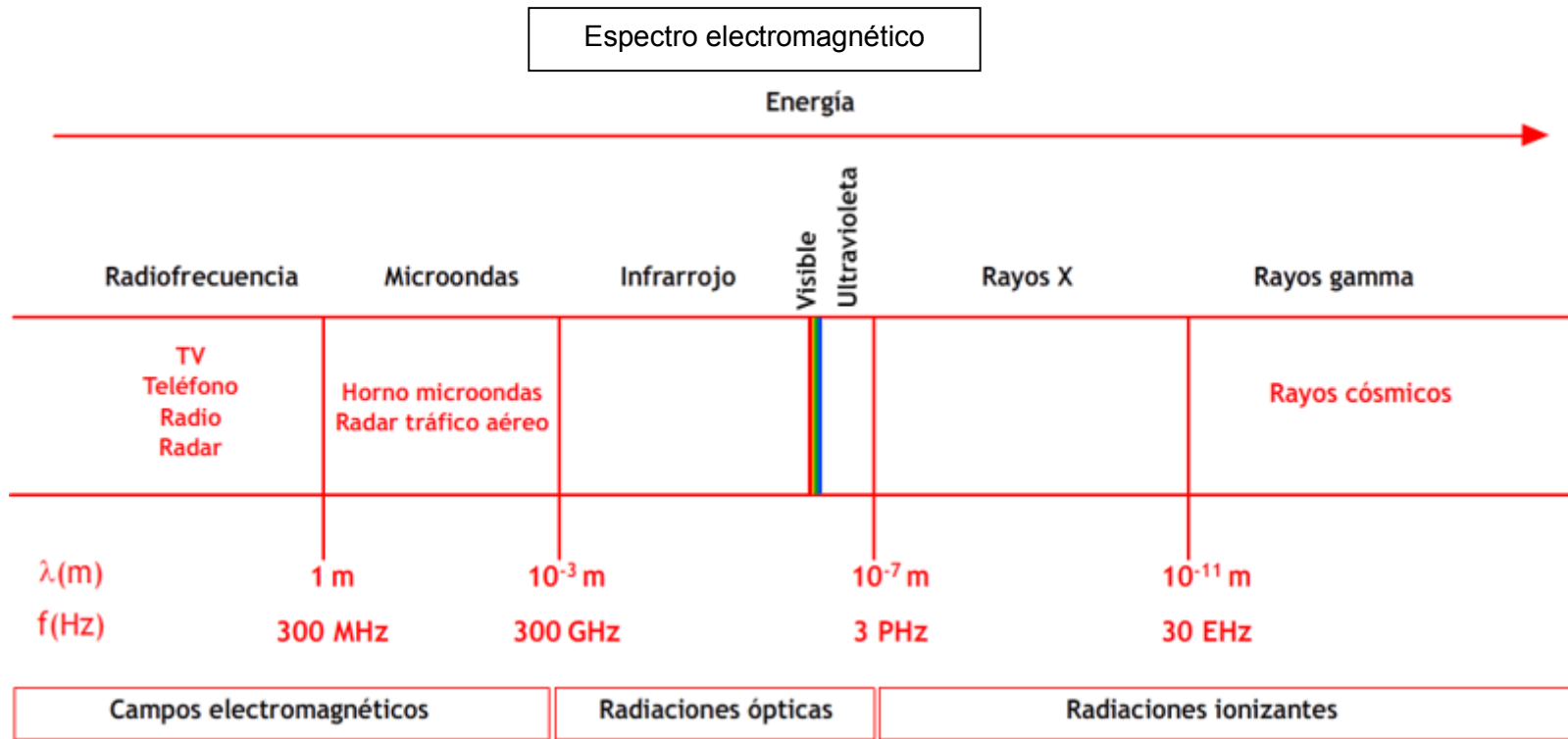
*Me ha parecido detectar ondas electromagnéticas continuas por reflexión en la sala" (Diario de H. Hertz, marzo de 1888)*

Existen una gran variedad de ondas electromagnéticas que van desde los rayos gamma, muy energéticos y fuertemente ionizantes (son capaces de arrancar electrones de los átomos produciendo iones), hasta las ondas de radio en el extremo opuesto del espectro (ver página siguiente).

La zona del espectro que el ojo humano es capaz de percibir es una franja muy estrecha (la llamada *zona visible* del espectro) con una longitud de onda comprendida entre los 400 y 700 nm, aproximadamente. Por encima de los 700 nm se sitúa el infrarrojo y por debajo de los 400 nm, comienza el ultravioleta.

La energía de las radiaciones electromagnéticas (y por tanto su peligrosidad para la salud) aumenta con su frecuencia, aunque hay que ser cautos con las exposiciones a ondas electromagnéticas de frecuencia baja durante un periodo de tiempo prolongado.

Ondas electromagnéticas más comunes	
Tipo	Frecuencia
Wifi	246 MHz
Microondas	245 MHz
Teléfono móvil	900 - 1800 MHz
Radio (FM)	100 MHz
Lu z visible (amarillo)	500 THz
Rayos UVA	7 500 - 1 000 THz



**Prefijos**

Mega (M)	= $10^6$
Giga (G)	= $10^9$
Tera (T)	= $10^{12}$
Peta (P)	= $10^{15}$
Exa (E)	= $10^{18}$

