



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.

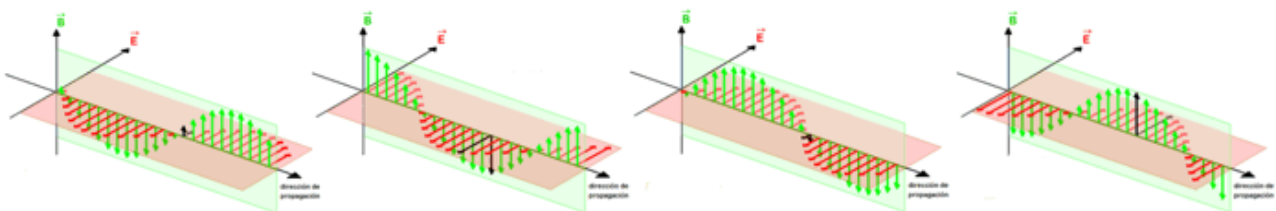
Ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético		
Ley	Forma integral	Significado
I Ley de Maxwell. Ley Gauss para el campo eléctrico	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$	Las cargas son las fuentes del campo eléctrico. Las cargas interactúan según la ley de Coulomb.
II Ley de Maxwell. 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")
III Ley de Maxwell 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.
IV Ley de Maxwell 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: $E = E_0 \text{ sen}(kx - \omega t)$, induciría en un punto del espacio otro campo magnético, también oscilante, perpendicular y en fase con él: $B = B_0 \text{ sen}(kx - \omega t)$.
- 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:

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

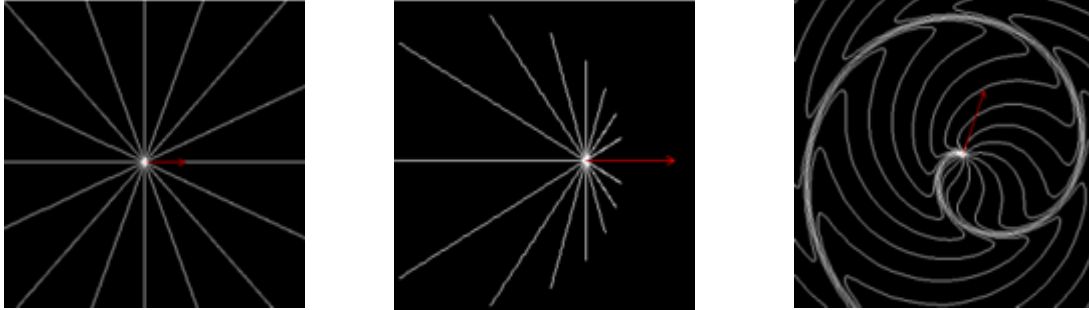
- Las ondas predichas consisten en campos eléctricos y magnéticos oscilantes y mutuamente perpendiculares que se propagan, incluso en el vacío, a una velocidad igual a la de la luz y fueron bautizadas con el nombre de **ondas electromagnéticas**.
- El hecho de que las ondas electromagnéticas se propagaran 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.

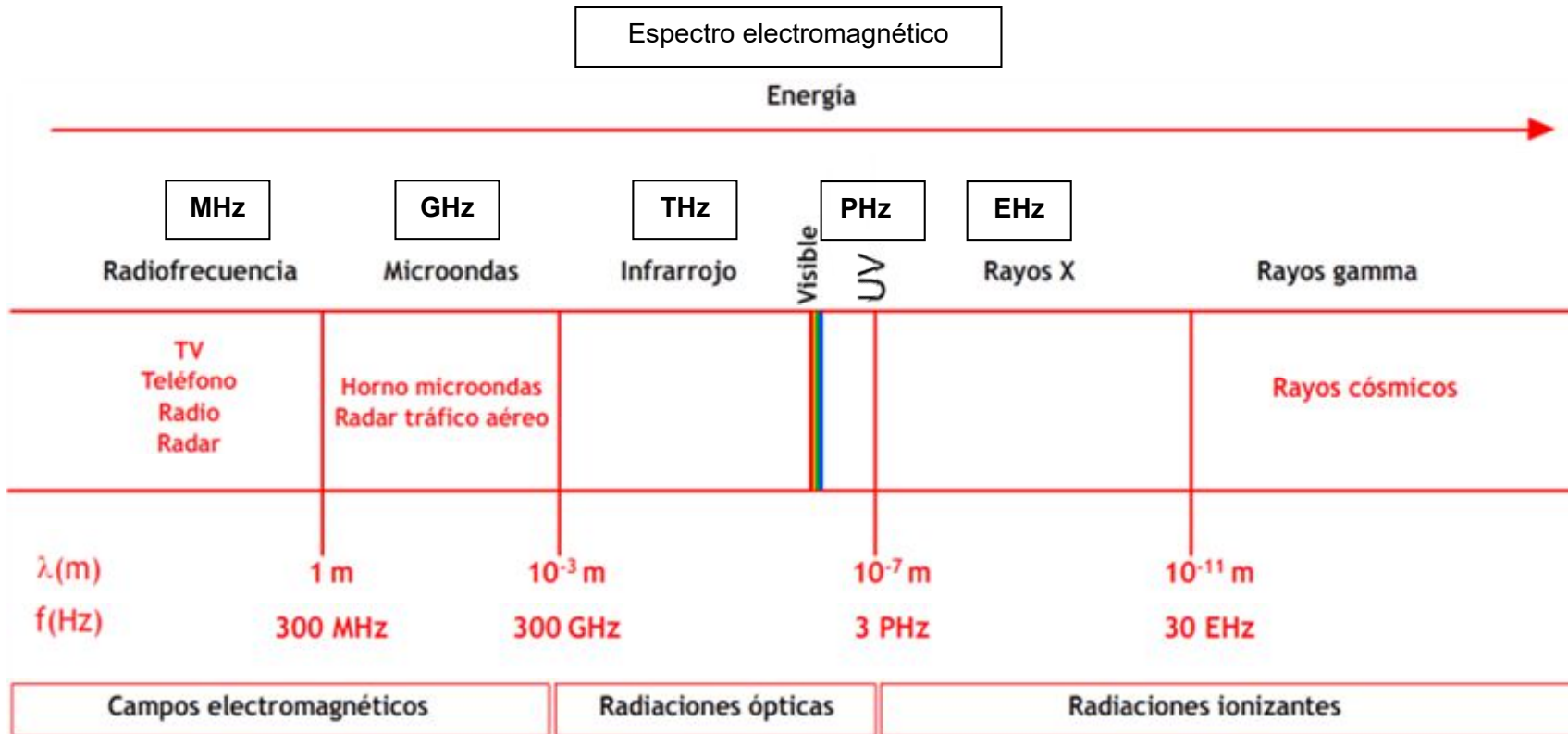
Me ha parecido detectar ondas electromagnéticas continuas por reflexión en la sala" (Diario de H. Hertz, marzo de 1888)

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.

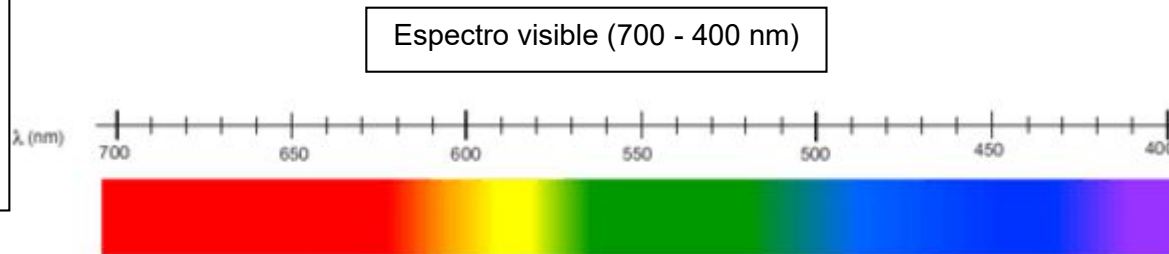
La energía de las radiaciones electromagnéticas (y por tanto su peligrosidad para la salud) aumenta con su frecuencia, aunque hay que ser cautos con las exposiciones a ondas electromagnéticas de frecuencia baja durante un periodo de tiempo prolongado.

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}



Región de radiofrecuencia (MHz)

El límite superior se sitúa en 1 m de longitud de onda y en los 300 MHz de frecuencia. Es la banda del espectro utilizada en comunicaciones: radio, TV, radar... etc.

Algunos valores son:

Radio: 10 THz – 10 kHz.

Las radios comerciales que emiten en FM (frecuencia modulada) tienen unas frecuencias entre 87,5 MHz y 108 MHz. Las que emiten en AM (amplitud modulada) emiten en el rango 153 kHz (onda larga) – 30 MHz (onda corta).

La longitud de onda de las ondas de radio comerciales van desde los aproximadamente 3 m de la FM a los casi 2 km de AM (onda larga).

TV: La emisión de TV analógica ocupa de 30 – 300 MHz para el VHF y de 300 – 3000 MHz para el UHF.

Región de radiofrecuencia (GHz)

En esta región opera la telefonía móvil con frecuencias de 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz (1,8 GHz), 2100 MHz (2,1 GHz) y 2600 MHz (2,6 GHz).

Hornos microondas y wifi: 2, 5 GHz.

Región infrarroja (THz)

Radiación térmica, emitida por cualquier cuerpo caliente (por encima de 0 K). se divide en tres regiones:

Infrarrojo próximo (800 nm – 2500 nm). Frecuencia media de 300 THz.

Infrarrojo medio (2,5 μm – 50 μm). Frecuencia media de 10 THz.

Infrarrojo lejano (50 μm – 1000 μm). Frecuencia media de 1 THz.

Región visible (10¹⁴THz)

Luz roja (700 nm) a luz violeta (400 nm). Lo que se corresponde con unas frecuencias de 400 THz a 700 THz

Ultravioleta (PHz)

Ultravioleta próximo (400 nm – 200 nm). Frecuencia media de 1 PHz.

El ultravioleta próximo se subdivide en otras tres regiones:

UVA: (400 nm – 315 nm). Luz negra, no es absorbida por la atmósfera.

UVB (315 nm – 280 nm). El 90% es absorbida por la atmósfera.

UVC (280 nm – 100 nm). Se absorbe prácticamente toda por la atmósfera.

La frecuencia de los rayos UVA es inferior a 1 PHz (frecuencia que se corresponde con una longitud de onda de 300 nm).

La UVB, y sobre todo las UVC, ya están en el rango de 1 PHz y la energía correspondiente a los fotones de esta frecuencia es del orden de unos pocos eV:

$$E = hf = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1} = 6,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$6,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \cdot \frac{1 \text{ eV}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 4,1 \text{ eV}$$

Las energías de ionización de los elementos están muy próximas a este valor (C: 11,3 eV; H: 13,6 eV; O: 13,6 eV; N: 14,5 eV), por tanto estas radiaciones **son ya capaces de ionizar los átomos y romper los enlaces** (un enlace covalente típico tiene una energía de 6 eV), por lo que puede producir daños importantes a nivel molecular.

Ultravioleta lejano (200 nm – 10 nm). Frecuencia media de 3 PHz (energía de los fotones: 12,3 eV)

Rayos X (EHz)

Radiaciones ionizantes. Sus efectos biológicos dependen en gran medida de la dosis. Se recomienda evitar dosis equivalentes superiores a los 5 mSv (0,5 rem)/año.

Rayos gamma

Radiaciones ionizantes. Se utilizan para tratamiento de ciertos tipos de cáncer.

Los rayos gamma también se utilizan en Medicina nuclear para realizar diagnósticos.