

ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS



- 1.- Síntesis electromagnética**
- 2.- Ondas electromagnéticas**
- 3.- Espectro electromagnético**

Actividades desarrolladas

Actividades propuestas

1.- SÍNTESIS ELECTROMAGNÉTICA

La teoría electromagnética se sintetiza en estas cuatro leyes, en parte ya estudiadas. (Nos referiremos siempre al vacío como medio):

♦ **Ley de Gauss, del campo eléctrico:**

$$\Phi_E \equiv \oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i$$

“El flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada es igual al producto de la carga interior neta por $1/\epsilon_0$ ”

Se refiere pues al campo eléctrico \vec{E} y sus fuentes q_i , las cargas eléctricas. Maxwell establece a partir de esta ley de Gauss su **primera ecuación**.

♦ **Ley de Gauss, del campo magnético:**

$$\Phi_B \equiv \oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

“El flujo del campo magnético a través de una superficie cerrada es nulo”.

Señala cómo el campo magnético no procede de fuentes polares (no existen polos magnéticos independientes, creadores de campo magnético, a semejanza de las cargas eléctricas). A partir de esta ley de Gauss, Maxwell expresa su **cuarta ecuación**.

♦ **Ley d’Ampère - Maxwell.** La expresión $\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \sum I_i$ representa la Ley d’Ampère.

Se refiere a la circulación del campo magnético \vec{B} a lo largo de un camino cerrado. Expresa la relación entre el campo magnético y las corrientes eléctricas, sus fuentes. Esta ley no es general. Maxwell la amplía y generaliza, de modo que recogiera también la aparición de campos magnéticos debidos a variaciones temporales de flujo eléctrico, obteniendo su **segunda ecuación** que puede expresarse así:

$$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \sum I_i + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt} \left(\iint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \right)$$

Esta ecuación interrelaciona los campos eléctrico y magnético, expresando cómo las variaciones temporales del campo eléctrico \vec{E} originan un campo magnético \vec{B} .

♦ **Ley de inducción de Faraday:**

$$\mathcal{E}_{ind} = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d}{dt} \left(\iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \right)$$

Esta ley relaciona las variaciones temporales de \vec{B} con una fem inducida, y por tanto con un campo eléctrico \vec{E} generado por dichas variaciones de \vec{B} . A partir de esta ley se puede expresar la **tercera ecuación** de Maxwell.

Estas cuatro ecuaciones de Maxwell constituyen, en lo esencial, los fundamentos del Electromagnetismo. Fueron sintetizadas por J. C. Maxwell en 1865.

2.- ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Tomando como base estas ecuaciones, Maxwell dedujo teóricamente la existencia de las ondas electromagnéticas (OEM). El hecho de que un campo eléctrico variable en el tiempo $\vec{E}(t)$ origine un campo magnético, en general, también variable en el tiempo $\vec{B}(t)$, y que éste a su vez dé lugar a un campo eléctrico, expresa la interconexión de ambos campos, $\vec{E}(t)$ y $\vec{B}(t)$, en cada punto del espacio.

Pero tales campos no se ven constreñidos a un punto sino que son origen de campos electromagnéticos en los puntos próximos, propagándose a ellos en forma ondulatoria.

Algunas características de las OEM:

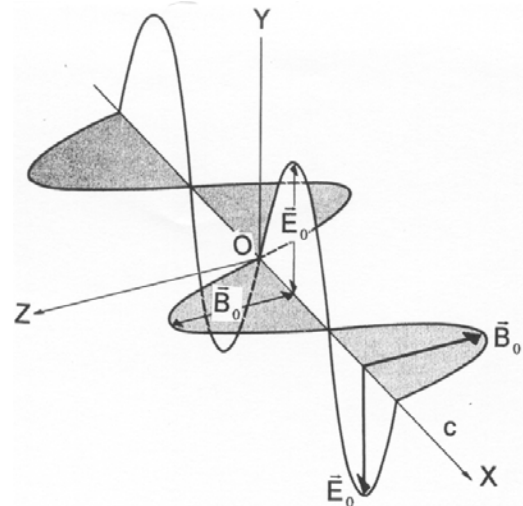
a) En cada punto alcanzado por la OEM aparecen los campos \vec{E} y \vec{B} , variables, por ejemplo armónicamente. En este caso, se pueden escribir así:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \text{sen}(\omega t - kx) \rightarrow \text{onda eléctrica}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \text{sen}(\omega t - kx) \rightarrow \text{onda magnética}$$

b) Ambas ondas son **transversales** y están **interconectadas** por las ecuaciones de Maxwell.

c) Los planos de vibración de ambas ondas son **perpendiculares** entre sí y se propagan en la misma dirección. Ambos campos, \vec{E} y \vec{B} , son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación. Así, si se toma como dirección de propagación el eje X y el campo \vec{E} se sitúa según el eje Y, entonces el campo \vec{B} se sitúa según el eje Z. Véase la figura.



d) Maxwell deduce que la **velocidad de propagación** de estas OEM, en el vacío, debe ser:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2} \times 1.257 \times 10^{-6} \text{ T m A}^{-1}}} \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

e) Ya con anterioridad (hacia 1857) había sido medida la **velocidad de la luz** por diversos métodos, obteniéndose en todos los casos valores muy aproximados a 3×10^8 m/s. Ello sugirió a Maxwell la idea de aceptar el carácter electromagnético de las ondas luminosas. La **Teoría electromagnética de la luz** parte de este principio: **la luz son ondas electromagnéticas**.

f) Faltaba la comprobación experimental. Tal comprobación se consigue veintitrés años después, cuando H. Hertz, en 1888, generó las OEM preconizadas por Maxwell, que se llamaron **ondas hertzianas**. Se vio cómo estas ondas, originadas mediante osciladores electromagnéticos, presentaban las mismas características que la luz, experimentando los mismos fenómenos que ella: reflexión y refracción, interferencias, difracción, polarización, ...

Así quedó plenamente comprobada la estrecha relación entre las ondas luminosas y las OEM: aquéllas constituían una parte, por cierto muy pequeña, del espectro completo de las OEM. A partir de estos resultados, se abrían, entre otros, los nuevos caminos hoy tan desarrollados de las comunicaciones: telegrafía sin hilos \rightarrow radio \rightarrow televisión \rightarrow etc...

Sin embargo, desde los comienzos se plantea un problema: todas las ondas conocidas, longitudinales o transversales, se propagan en medios materiales; sin embargo, las OEM no precisan de medio alguno para propagarse (se propagan también en ausencia de materia, en el vacío). Para solucionar este escollo los físicos postulan la existencia del éter. Se trataría de suponer el universo lleno de este hipotético medio; sus características debían de ser por un lado las de un sólido rígido (las ondas transversales así lo exigen) y por otro las de un gas sutil pues no había podido ser detectado por ningún instrumento contemporáneo. El éter serviría de soporte a las OEM en su propagación. Fue una hipótesis; quedaba para posteriores indagaciones, y como problema pendiente, si tal hipótesis podría ser confirmada experimentalmente.

3.- ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Las OEM son producidas por osciladores electromagnéticos. Algunos de estos osciladores han sido creados por el hombre (emisoras de telecomunicación, radio, televisión, radar, ...). Pero la mayoría son osciladores naturales (moléculas, átomos, núcleos atómicos, ...). Las longitudes de onda emitidas van desde varios kilómetros (ondas de radio) hasta longitudes del orden del tamaño nuclear ($\approx 10^{-14}$ m, rayos gamma). Aunque los límites que separan las distintas zonas del espectro electromagnético no están fijadas de modo estricto, presentamos aquí la siguiente clasificación:

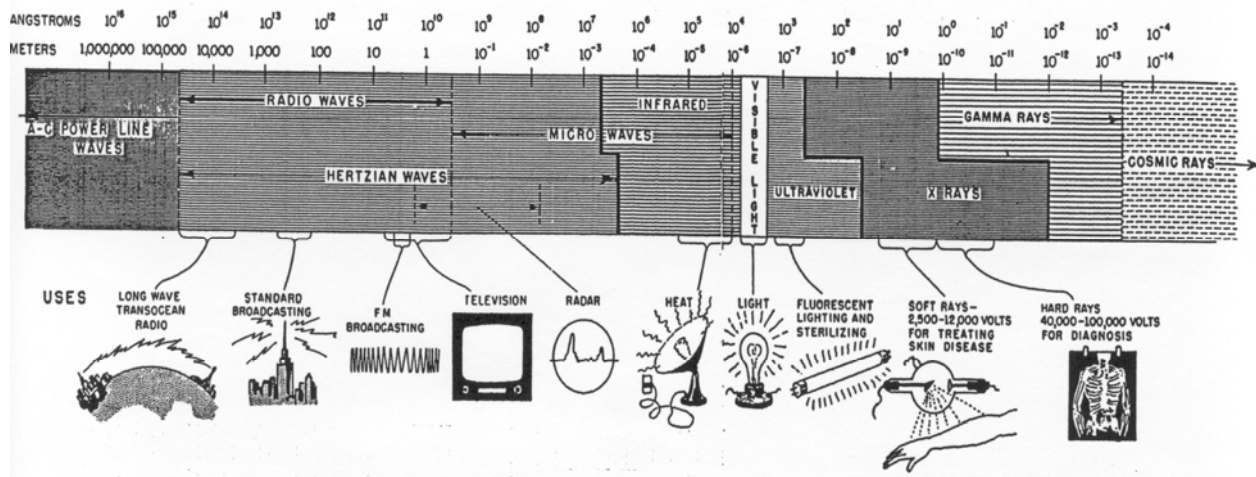
ν (Hz)	λ	NOMBRE	REGIÓN
$> 10^{20}$	$< 0.03 \text{ \AA}$	Radiación cósmica	Región de RAYOS
$10^{20} - 10^{19}$	$0.03 \text{ \AA} - 0.3 \text{ \AA}$	Rayos gamma (γ)	
$10^{19} - 10^{16}$	$0.3 \text{ \AA} - 300 \text{ \AA}$	Rayos X	
$10^{16} - 8 \times 10^{14}$	$30 \text{ nm} - 400 \text{ nm}$	Ultravioleta (UV)	Región ÓPTICA
$8 \times 10^{14} - 4 \times 10^{14}$	$400 \text{ nm} - 750 \text{ nm}$	VISIBLE	
$4 \times 10^{14} - 10^{12}$	$0.75 \text{ \mu m} - 300 \text{ \mu m}$	Infrarrojo (IR)	
$10^{12} - 10^8$	$300 \text{ \mu m} - 3 \text{ m}$	Microondas (MW)	Región de ONDAS
$10^8 - 10^4$	$3 \text{ m} - 30 \text{ km}$	Radiofrecuencia (RF)	
$< 10^4$	$> 30 \text{ km}$	Líneas de potencia	

Recuérdese la relación entre la frecuencia ν , la longitud de onda λ y la velocidad de la luz en el vacío $c = 3 \times 10^8$ m/s:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{o sea} \quad \nu(\text{Hz}) = \frac{3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\lambda(\text{m})}$$

La región de las ondas producidas artificialmente por el hombre, habitualmente llamadas ondas de radio, comprende las ondas muy largas (UHW, longitud de onda mayor que 10 km), ondas largas (HW, de 1 km a 10 km), ondas medias (MW, de 1 km a 100 m), ondas cortas (LW, de 100 m a 10 m) y ondas ultracortas (FM, VHF, UHF, de 10 m a 1 m).

Estas ondas se emiten al espacio y, antes de ser recogidas por la antena receptora, son reflejadas por la ionosfera, capa atmosférica fuertemente ionizada por las radiaciones solares (sobre todo, UV). Cuanto menor es la longitud de onda mejor es la reflexión; por ello las ondas cortas pueden llegar más lejos que las largas y son más adecuadas para las transmisiones radiofónicas a largas distancias. Por el contrario, las ondas muy largas se transmiten directamente, sin necesidad de reflexión en la ionosfera; requieren, no obstante, instalaciones enormemente grandes y son muy lentas; por ello, su utilización se ha limitado al terreno militar. Las ondas ultracortas se utilizan en las transmisiones de radio en FM y en las de televisión, si bien éstas últimas emplean también la parte superior de la zona de microondas. Concretamente, las emisiones de la banda UHF emplean ondas desde 1 m hasta 10 cm.



Las **microondas** están producidas por dispositivos especiales (Klystron) y se utilizan para radar y en radioastronomía; conocida es asimismo su aplicación en aparatos domésticos.

La radiación **infrarroja (IR)** es emitida por osciladores naturales: es debida a cambios energéticos rotacionales y de vibración en las moléculas (por ejemplo, en materiales incandescentes). Es una radiación muy calorífica, con aplicaciones médicas e industriales. Son interesantes sus aplicaciones en fotografía industrial y científica.

La **luz visible** se extiende, en una franja muy estrecha, entre 750 nm y 400 nm aproximadamente. El ojo humano es sensible a estas radiaciones, obteniendo la sensación cromática. La división cromática del espectro luminoso visible es aproximadamente:

Rojo	750 – 650 nm
Naranja	650 – 585 nm
Amarillo	585 – 575 nm
Verde	575 – 500 nm
Azul	500 – 420 nm
Violeta	420 – 400 nm

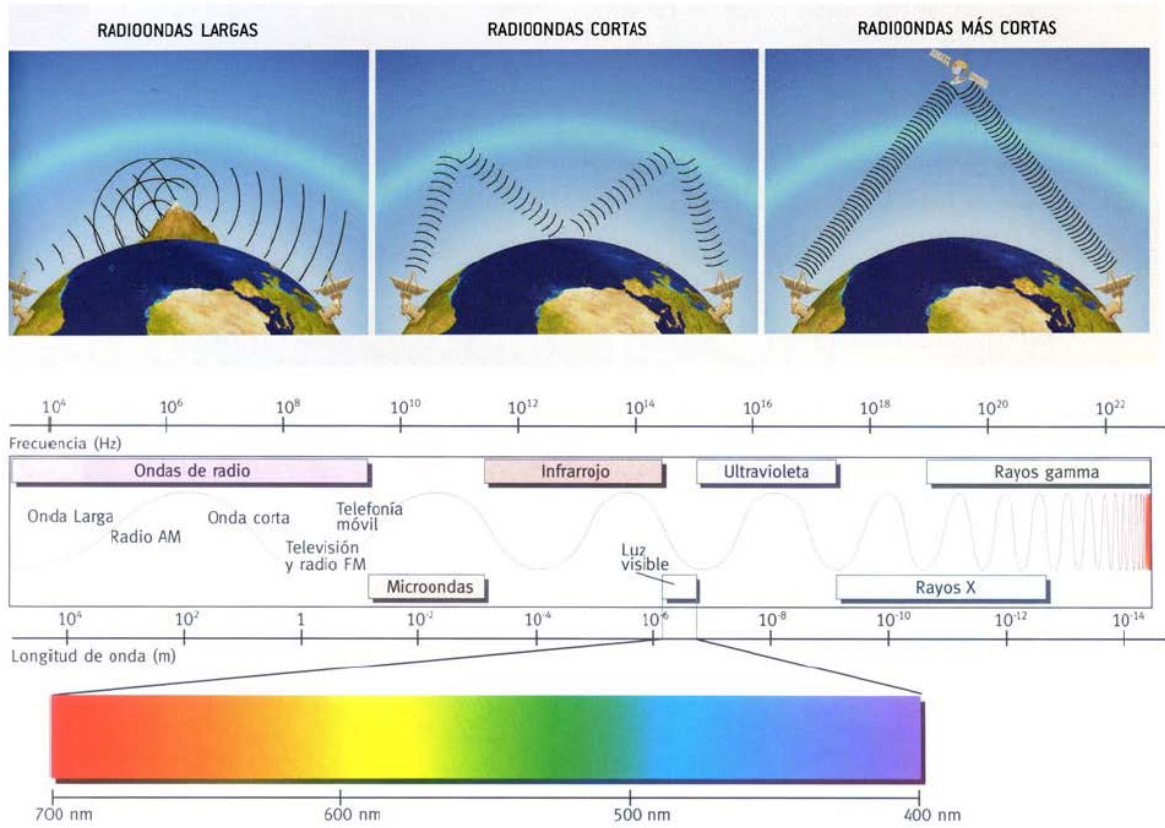
La luz visible es emitida por átomos excitados, por ejemplo, en la incandescencia de sólidos y líquidos. Se produce en los saltos electrónicos de las capas más exteriores. Sabemos todos la importancia de la luz en la vida de los seres (reacciones químicas, por ejemplo fotosíntesis) y en la naturaleza. Sus aplicaciones son casi infinitas.

La radiación **ultravioleta (UV)** procede fundamentalmente de cambios energéticos en el átomo, en sus electrones intermedios. Está presente en la radiación que nos llega del sol. Se acostumbra a dividir su espectro en UV próximo y UV lejano. Presentan alta fluorescencia y manifiestan diversas acciones sobre los cuerpos vivos, debido a su elevado poder de penetración: acción esterilizante (impidiendo la división celular), acción eritemal (quemaduras), acción pigmentaria (sobre la piel).

Los **rayos X** proceden de cambios energético que se operan en el átomo, en sus electrones más interiores; asimismo aparecen en el frenado brusco de electrones de alta velocidad. Son muy energéticos y penetrantes, y dañinos para los organismos vivos; aunque, como es sabido, se utilizan de forma controlada en diagnósticos médicos, así como en la investigación científica (ionización de gases, fluorescencia, ...)

Los **rayos γ**, de longitud de onda aún inferior (pero no bien definida su separación respecto de la zona de los rayos X), son emitidos por los núcleos radiactivos, obedeciendo, por tanto, a cambios energéticos en el núcleo atómico. Son de muy elevado poder de penetración, por lo tanto

altamente peligrosos para el organismo humano. Se encuentran en grandes cantidades en los reactores nucleares.



ACTIVIDADES DEASARROLLADAS

1.- Calcular las longitudes de onda con las que emiten las siguientes emisoras en San Sebastián:

**COPE: 88,5 MHz.- RNE-5: 558 KHz.- 40 Pples: 97,2.-
T Rentería: 107,0 MHz.- C. SER: 1044 KHz**

$$c = \lambda v \Rightarrow \lambda = \frac{c}{v} \rightarrow \begin{array}{l} \text{COPE: } \lambda = \frac{3 \times 10^8}{88,5 \times 10^6} = \frac{300}{88,5} = 3,39 \text{ metros} \\ \text{RNE-5 } \lambda = \frac{300}{0,558} = 538 \text{ metros} \\ \text{etc} \end{array}$$

2.- Calcula el índice de refracción de un medio por el que se propaga una OEM cuyo campo eléctrico está dado por $E(x,t) = 10^{-3} \cos(5 \cdot 10^{10} t - 200 x)$ V/m.

$$n = \frac{c}{v_p} \quad v_p = \lambda v = \frac{2\pi}{k} \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\omega}{k} = \frac{5 \times 10^{10}}{200} = 2,5 \times 10^8 \text{ m/s} \quad n = \frac{c}{v_p} = \frac{3 \times 10^8}{2,5 \times 10^8} = 1,2$$

3.- Una onda de radio de 25 MHz se propaga en un medio cuyo índice de refracción es 1,5. Si la amplitud de la onda es 2×10^{-4} V/m y se propaga a lo largo del eje X, escribir la ecuación que representa dicha onda.

Por ser una onda de radio es una OEM y por tanto se cumple que: $E(x,t) = E_0 \sin(\omega t - kx)$.

La amplitud de la onda es $E_0 = 2 \times 10^{-4}$ V/m

La frecuencia es $\nu = 25 \text{ MHz} = 25 \times 10^6 \text{ Hz} \rightarrow \omega = 2\pi\nu = 2,5 \times 10^7 \cdot 2\pi$

La velocidad de propagación se calcula teniendo presente que

$$n = \frac{c}{v_p} \rightarrow v_p = \frac{c}{n} = \frac{3 \times 10^8}{1,5} = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$$

La longitud de onda $\lambda = \frac{v_p}{\nu} = \frac{2 \times 10^8}{25 \times 10^6} = 8 \text{ metros} \rightarrow k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{8} = 0,25 \cdot 2\pi$

Ecuación de la onda: $E(x,t) = 2 \times 10^{-4} \sin 2\pi(2,5 \times 10^7 t - 0,25 x)$ V/m

ACTIVIDADES PROPUESTAS

- 1.- Un foco emite OEM de frecuencia igual a 1'5 MHz y atraviesan un medio que tiene un índice de refracción igual a 1'5. ¿Cuál es la longitud de onda de esta radiación en el aire y en dicho medio? **R.: En el aire, 200 metros, y en el medio 133'3 metros**

- 2.- Una OEM plana, sinusoidal y polarizada linealmente, tiene una longitud de onda de 500 nm y se propaga en el vacío en la dirección del eje X. Si el plano de polarización de la onda forma un ángulo de 30° con el XY y el módulo de la amplitud del campo eléctrico es 10 V/m, determinar la ecuación de la onda en términos del campo eléctrico.
R. : $\vec{E}(x, t) = 2(\sqrt{3}\hat{j} + \hat{k}).\text{sen}\{4\pi \cdot 10^6 (3 \cdot 10^8 t - x)\}$ V/m

- 3.- Escribe la ecuación de una OEM plana armónica, propagándose en el vacío en la dirección positiva del eje Y, siendo su plano de polarización el XY, su longitud de onda 200 nm y la máxima amplitud del campo eléctrico 4 V/m. **R.: $\vec{E}(y, t) = 4 \text{ sen}\{10^7 \pi(c t - y)\}$ \hat{i} V/m**

- 4.- El campo de una OEM plana en el vacío se representa, utilizando unidades del S.I., por los siguientes datos: $E_{0x} = 0$, $E_{0y} = 0'5 \text{ sen}[2\pi \cdot 10^8 (t - x/c)]$, $E_{0z} = 0$. Calcular: a) La longitud de onda.- b) El estado de polarización.- c) La dirección y sentido de propagación.- d) La frecuencia. **R.: 3 m de longitud de onda.- La onda está polarizada según el plano de polarización OXY.- Se propaga en la dirección positiva del eje X.- Su frecuencia es 10^8 Hz**