# Tema 7

Onda Electromagnética

## Introducción: Onda

- La energía de cualquier tipo puede transmitirse mediante ondas

La energía se puede transmitir sin que el cuerpo se desplace, basta con que el cuerpo irradie su energía

Esta radiación de energía se llama onda.

El movimiento ondulatorio puede considerarse como un transporte de energía y de cantidad de movimiento desde un punto del espacio a otro, sin transporte de materia.

## Introducción: Onda

Podemos distinguir dos tipos básicos de ondas:

***ONDAS MECANICAS***

***ONDAS ELECTROMAGNETICAS***

## ONDAS MECANICAS

- Ondas en el agua, una cuerda, etc.
- La energía y la cantidad de movimiento se transportan mediante una perturbación del medio, la perturbación se propaga debido a las propiedades elásticas del mismo

## ONDAS ELECTROMAGNETICAS

- Se deben fundamentalmente a vibraciones de campos eléctricos y magnéticos
- No necesitan un medio para propagarse

## Ondas

- Al definir el movimiento asociado a una onda debemos distinguir dos aspectos del movimiento

El movimiento de la onda a través del medio

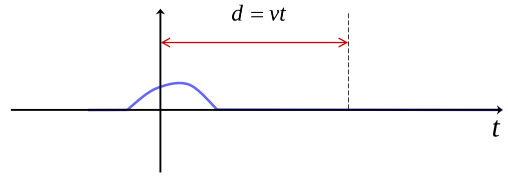
El movimiento oscilatorio de las partículas del medio.

# Ondas

- Podemos clasificar las ondas en función a la dirección de desplazamiento de las partículas con respecto a la dirección de propagación de la onda.
- *Onda transversal* es aquella en la que las partículas oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación.
- Onda longitudinal es aquella en la que las partículas oscilan paralelamente a la dirección de propagación. Demostraremos que las ondas electromagnéticas son transversales. Algunas ondas presentan componentes longitudinales y transversales, como ser las ondas de agua.

# Pulsos

- Un pulso es una onda de extensión relativamente corta




$t = 0$ $\quad y(x,t) = f(x - vt)$

# Ondas

- **Interferencia de ondas:** Cuando dos o más ondas se encuentran entre si decimos que interfieren.
- El principio de superposición establece que la función de onda resultante debida a dos o más funciones de ondas individuales es la suma de las funciones de ondas individuales.
- Posteriormente a su encuentro, el tamaño, forma y velocidad de cada pulso es el mismo que tendría si no se hubieran encontrado.

# Ondas

- **Reflexión y transmisión**: Las ondas pueden reflejarse en fronteras y trasmitirse de un medio a otro.

# Ondas armónicas

# Ecuación de ondas

$y(x,t) = Asen(Kx - \omega t)$ Derivamos con respecto a $t$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} Asen(Kx - \omega t) = -A\omega\cos(Kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial y}{\partial t}\right) = \frac{\partial}{\partial t}\left(-A\omega\cos(Kx - \omega t)\right) = -A\omega^2 sen(Kx - \omega t) =$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -Av^2K^2 y(x,t)} = -A\omega^2 y(x,t)$$ Primera parte

Como $v = \frac{\lambda}{T} = \frac{2\pi/K}{2\pi/\omega} = \frac{\omega}{K} \Rightarrow \omega = vK$ Reemplazando

## Ecuación de ondas

$$y(x,t) = Asen(Kx - \omega t)$$ Derivamos con respecto a $x$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} Asen(Kx - \omega t) = -AK\cos(Kx - \omega t)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(-AK\cos(Kx - \omega t)\right) = -AK^2 sen(Kx - \omega t) =$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -AK^2 sen(Kx - \omega t) = -AK^2 y(x,t)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -AK^2 y(x,t)$$ Segunda parte

## Ecuación de ondas

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -Av^2K^2 y(x,t) \quad \Rightarrow \quad y(x,t) = -\frac{1}{Av^2K^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -AK^2 y(x,t) \quad \Rightarrow \quad y(x,t) = -\frac{1}{AK^2}\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

Igualando $$-\frac{1}{Av^2K^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{1}{AK^2}\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

$$\frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

Ecuación que recibe el nombre de *Ecuación de Onda*

## Ecuación de ondas

La ecuación diferencial vista es la ecuación de onda.

Puesto que hemos llegado a esta ecuación a partir de las derivadas de una función armónica podemos decir que la función de onda correspondiente a una onda armónica satisface, o es solución, de la ecuación de onda.

Si encontramos un sistema físico que cumple la ecuación de onda, debemos esperar la existencia de ondas en dicho sistema.

Podemos generalizar la ecuación de onda escribiendo

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$$

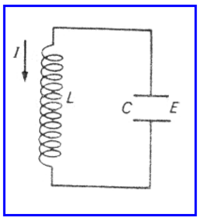
Donde $\Psi$ es la magnitud física que "ondea" y $v$ es la velocidad de la onda

## Introducción a las ondas electromagnéticas

- Las ondas electromagnéticas se generan por vibraciones de campos eléctricos y magnéticos.
- No necesitan medio material de propagación.
- Son doblemente transversales, el campo magnético y el campo eléctrico son perpendiculares entre si y a su vez perpendiculares a la dirección de propagación.
- Se propagan a la velocidad de la luz.
- Su origen se funda en el hecho de que toda carga eléctrica acelerada emite energía en forma de radiación electromagnética.

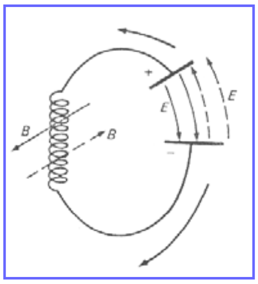
## Introducción a las ondas electromagnéticas

- Un método sencillo para producirlas consiste en preparar un circuito oscilante formado por una bobina y un condensador.
- Ya vimos el funcionamiento de este circuito en lo que hace al intercambio de energía entre el condensador y la bobina.



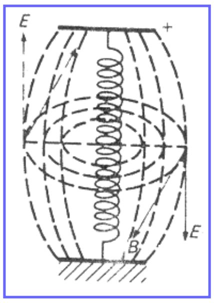

En el circuito la energía electromagnética queda almacenada en el propio circuito sin irradiarla al exterior

## Introducción a las ondas electromagnéticas




Esta irradiación se consigue separando paulatinamente las armaduras del condensador

## Introducción a las ondas electromagnéticas




Hasta llegar al caso limite, donde tenemos una antema emisora.

La energía se irradia en forma de ondas esféricas doblemente transversales

## Las ecuaciones de MAXWELL

- El experimento de Oersted (1820) había demostrado la existencia de efectos magnéticos debidos a cargas en movimiento.
- Los descubrimientos de Faraday (1831) habían puesto de manifiesto que campos magnéticos variables con el tiempo dan lugar a un movimiento de cargas eléctricas en los conductores.
- La explicación de Faraday de estos fenómenos llamados de inducción había introducido por primera vez en la historia de la física la noción de campo magnético representado por un conjunto de líneas de fuerza.
- Medio siglo antes, Charles Coulomb (1785) había descrito en forma de ley el modo en que las cargas eléctricas se atraen entre sí.

## Las ecuaciones de MAXWELL

Estos cuatro elementos sirvieron de base en 1864 a James Clerk Maxwell para iniciar la síntesis de los fenómenos eléctricos y de los fenómenos magnéticos entonces conocidos

James Clerk Maxwell
1831 - 1879

Teoría del Electromagnetismo.

## Las ecuaciones de MAXWELL

Escribió “Teoría Dinámica del Campo Electromagnético”

Presento las celebres ecuaciones que unificaban los campos eléctricos y magnéticos, y demostró que estas ecuaciones predecían la existencia de ondas de los campos eléctrico y magnéticas,

***Ondas Electromagnéticas***

## Las ecuaciones de MAXWELL

- *Ley de Gauss para el campo eléctrico*

  establece que el flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada es proporcional a la carga neta encerrada por el volumen encerrado por dicha superficie.

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{\sum q}{\varepsilon_0}$$

## Las ecuaciones de MAXWELL

*Ley de Gauss para el campo magnético*

establece que el flujo del campo magnético a través de una superficie cerrada es igual a cero: Dado que este flujo es cero, el equivalente magnético a la carga eléctrica no existe, la unidad magnética más chica es el dipolo magnético

$$\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$$

## Las ecuaciones de MAXWELL

*Ley de Faraday*:

establece que la integral de línea del campo eléctrico a lo largo de un camino cerrado es proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético a través de una superficie limitada por dicho camino.

Un campo magnético cambiante viene acompañado de un campo eléctrico.

$$\oint \vec{E}d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int \vec{B}d\vec{S}$$

## Las ecuaciones de MAXWELL

*Ley de Amper en forma modificada:*

La forma modificada de la Ley de Amper establece que la integral de línea del campo magnético a lo largo de un camino cerrado es proporcional a la suma e dos términos.

Un campo eléctrico cambiante viene acompañado de un campo magnético.

El primer término contiene la corriente total que atraviesa la superficie limitada por el camino cerrado.

El segu... l flujo de cam... itada por dic...

$$\oint \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum i + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt}\int \vec{E}d\vec{l}$$

## Las ecuaciones de MAXWELL

Las ecuaciones de Maxwell representan una descripción completa y concisa de los campos eléctrico y magnético.

$$\oint \vec{E}d\vec{S} = \frac{\sum q}{\varepsilon_0}$$

$$\oint \vec{E}d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int \vec{B}d\vec{S}$$

$$\oint \vec{B}d\vec{S} = 0$$

$$\oint \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum i + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt}\int \vec{E}d\vec{l}$$

## Aproximación de ondas planas

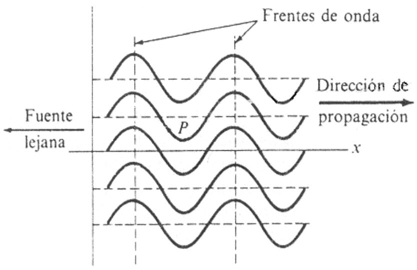
- Anticipando el resultado consideraremos , solo campos eléctricos y magnéticos que varíen en forma ondulatoria, no consideraremos los campos que sean uniformes en el espacio o constantes en el tiempo
- La dependencia espacial y temporal de los campos será oscilante, así entonces una onda de campo eléctrico que viaja en la dirección $+x$ será:

$$E = E_0 sen(kx - \omega t)$$

Los campos eléctricos y magnéticos serán de la forma:

$$B = B(x,t) \qquad E = E(x,t)$$

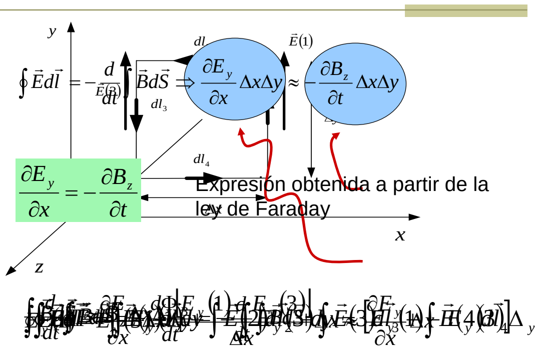
## Aproximación de ondas planas




## Aproximación de ondas planas

- Los campos eléctricos y magnéticos ondulatorios son mutuamente perpendiculares
- Siguiendo con las ideas anteriores, si el eje de propagación es el eje X, podemos fijar para el campo eléctrico en uno de los otros ejes por ejemplo el eje Y , en consecuencia mediante la Ley de Faraday se puede demostrar que el campo magnético necesariamente debe estar orientado según el eje Z
- Una onda que cumple con estas condiciones se llama onda plana polarizada y se define como el plano de polarización a aquel plano que contiene al campo eléctrico y a la dirección de propagación. Para el caso comentado el plano de polarización será el plano XY .

## La ecuación de onda electromagnética




$$\oint \vec{E}d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int \vec{B}d\vec{S} \Rightarrow \frac{\partial E_y}{\partial x}\Delta x \Delta y \approx -\frac{\partial B_z}{\partial t}\Delta x \Delta y$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t}$$

## La ecuación de onda electromagnética

- De la ley de Amper, haciendo un análisis similar obtenemos

$$\frac{\partial B_z}{\partial x} = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}$$

## La ecuación de onda electromagnética

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t}$$

Derivamos con respecto a $x$

$$\frac{\partial B_z}{\partial x} = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}$$

Derivamos con respecto a $t$

## La ecuación de onda electromagnética

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial E_y}{\partial x}\right) = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial B_z}{\partial t}\right) \Rightarrow \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial B_z}{\partial t}\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial B_z}{\partial x}\right) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial E_y}{\partial t}\right) \Rightarrow \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial B_z}{\partial x}\right) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

*Ecuación de onda para el campo eléctrico* $E_y$

## La ecuación de onda electromagnética

- Si comparamos las ecuaciones de onda para el campo electromagnético obtenidas con la ecuación general de onda vemos que la velocidad de propagación de la onda será:

$$\frac{1}{v^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \Rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

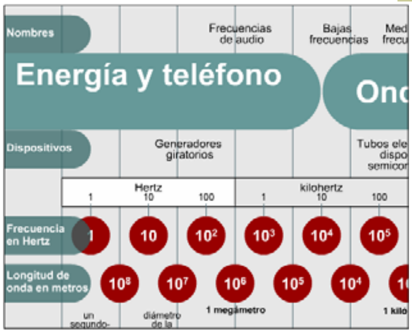
$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{(4\pi * 10^{-7})(8.85 * 10^{-12})}} = 3 * 10^8 \, {}^{m}\!/_{seg}$$

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

## La ecuación de onda electromagnética

- Esta velocidad tiene el mismo valor que la velocidad de la luz, , en base a esto Maxwell razonó que como la luz no era nada más que una onda de campos eléctricos y magnéticos que se propaga en el espacio y en el tiempo, y la velocidad en el vacío depende de las propiedades eléctricas y magnéticas del mismo.

$$c = v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 3 * 10^8 \, {}^{m}\!/_{seg}$$


Nombres
Frecuencias de audio
Bajas frecuencias
Energía y teléfono
Dispositivos
Generadores giratorios
Hertz
kilohertz
Frecuencia en Hertz
Longitud de onda en metros
1 megámetro