

# CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS (Ondas EM)

- Introducción.
- Campos Electromagnéticos.
- Leyes de Maxwell del electromagnetismo
- Ondas electromagnéticas

## BIBLIOGRAFÍA:

- Tipler-Mosca. "Física". Cap. 28, vol 2, 5ª ed.
- Serway-Jewett. "Física". Cap.34 . Vol 2. 3ª ed.



# Introducción



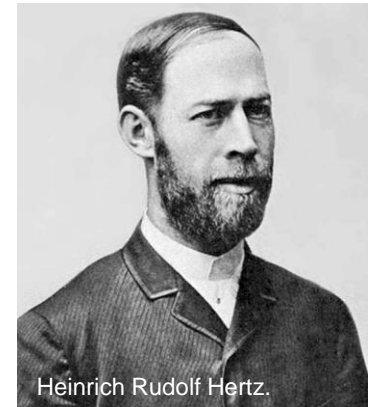
James Clerk Maxwe.

Michael Faraday (1791-1867) introduce el concepto de campos en un intento de explicar la interacción electromagnética a distancia. No propone un formalismo matemático.

James Clerk Maxwell (1831-1879) propone las ecuaciones del electromagnetismo que describen la interacción electromagnética. Su teoría predecía las ondas electromagnéticas.

Heinrich Rudolf Hertz (1847-1894) realiza experimentos que demuestran la teoría de Maxwell. Realiza experimentos que producen ondas electromagnéticas tal como predecía la teoría de Maxwell.

Rápidamente se desarrollan las comunicaciones inalámbricas. En 1895 Alejandro Popoff inventa la antena. Gillermo Marconi realiza sus primeros experimentos de transmisión de señales mediante radio. Hacia 1896 se puede decir que se invento la radiotelegrafía.



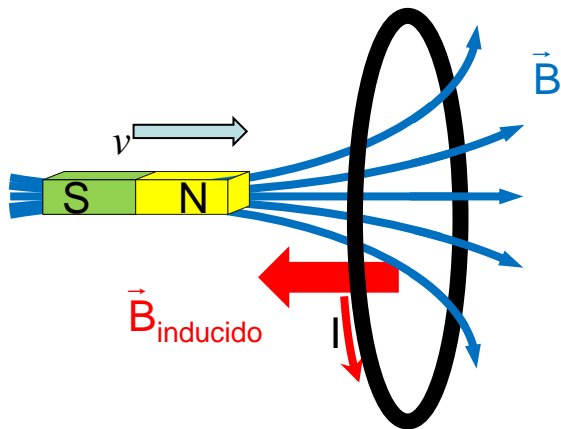
Heinrich Rudolf Hertz.

[en.wikipedia.org/wiki/File:YoungJamesClerkMaxwell.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:YoungJamesClerkMaxwell.jpg)  
[upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/50/Heinrich\\_Rudolf\\_Hertz.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/50/Heinrich_Rudolf_Hertz.jpg)

# Campos electromagnéticos

Recordemos del tema de inducción.

Siempre que en un región hay una variación del flujo del campo magnético, se produce un campo eléctrico inducido y, si hay un medio material, se genera una corriente eléctrica

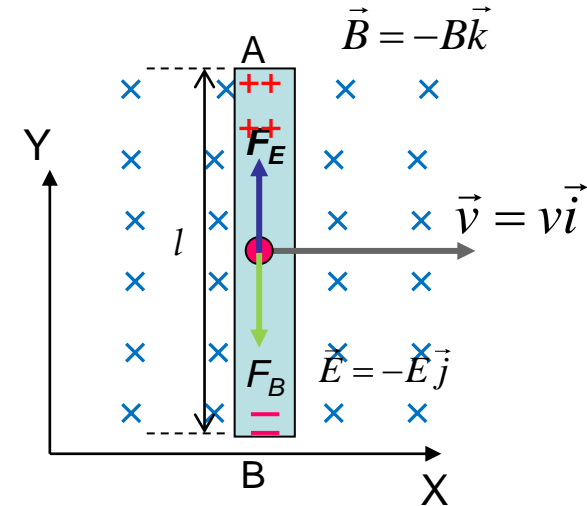


Tanto en el caso de que la variación del flujo del campo magnético

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

se produzca por:

- 1.- un campo magnético variable en el tiempo, o
- 2.- el movimiento

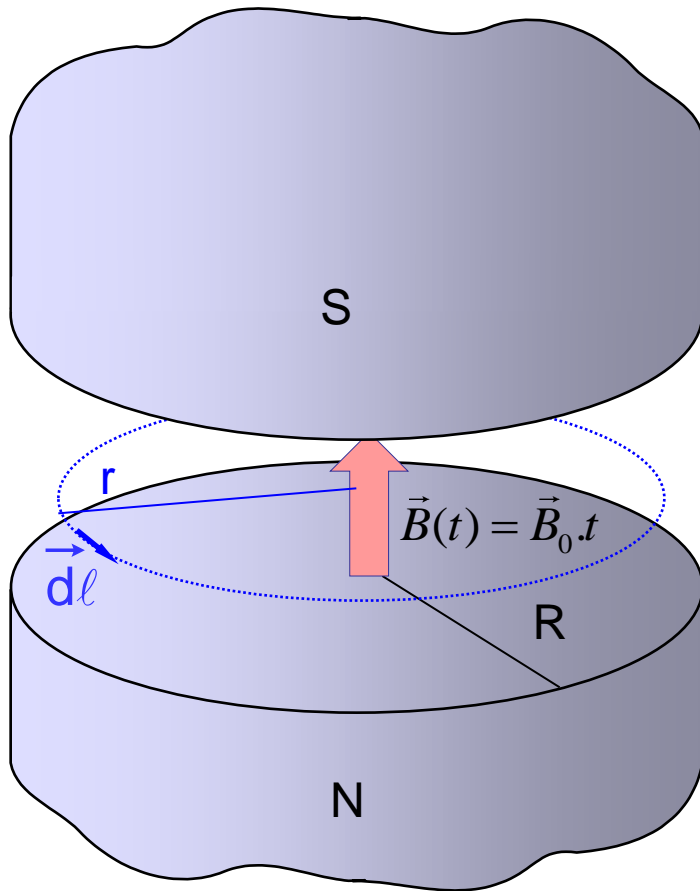


Se generan campos eléctricos **E** inducidos, y diferencias de potencial, fem, inducidas que obedecen la ley de Faraday-Lenz

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

# Campos electromagnéticos

La ley de Faraday-Lenz se cumple incluso si no hay un circuito material. Imaginemos el espacio entre dos electroimanes con forma cilíndrica que generan un campo magnético  $\mathbf{B}(t)$ .



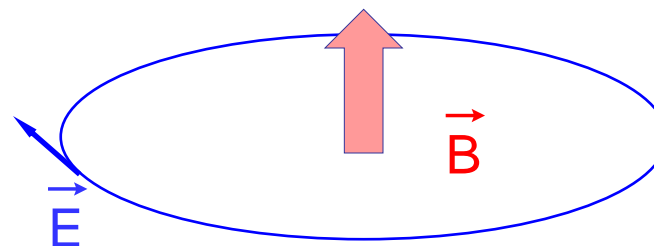
Aplicando la ley de Faraday-Lenz, a lo largo de ese circuito imaginario hay una fuerza electromotriz inducida:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Phi(t) = B_0 t \quad \varepsilon = -\mu_0 \pi r^2 B_0$$

Por tanto, a lo largo de ese circuito se produce un campo eléctrico  $\mathbf{E}$  inducido:

$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} \Rightarrow |\vec{E}| = \frac{\mu_0 r}{2} B_0$$



El campo inducido  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{B}$  son perpendiculares. Se ha formado un campo electromagnético.

# Campos electromagnéticos

Diferencias entre campos electrostáticos e inducidos:

- El campo  $\mathbf{E}$  inducido se produce por variaciones temporales del campo  $\mathbf{B}$ . No está producido por cargas eléctricas.
- Las líneas del campo  $\mathbf{E}$  inducido son cerradas. No nacen de cargas eléctricas positivas y terminan en negativas.
- La diferencia de potencial a lo largo de un circuito cerrado en un campo electrostático es cero:

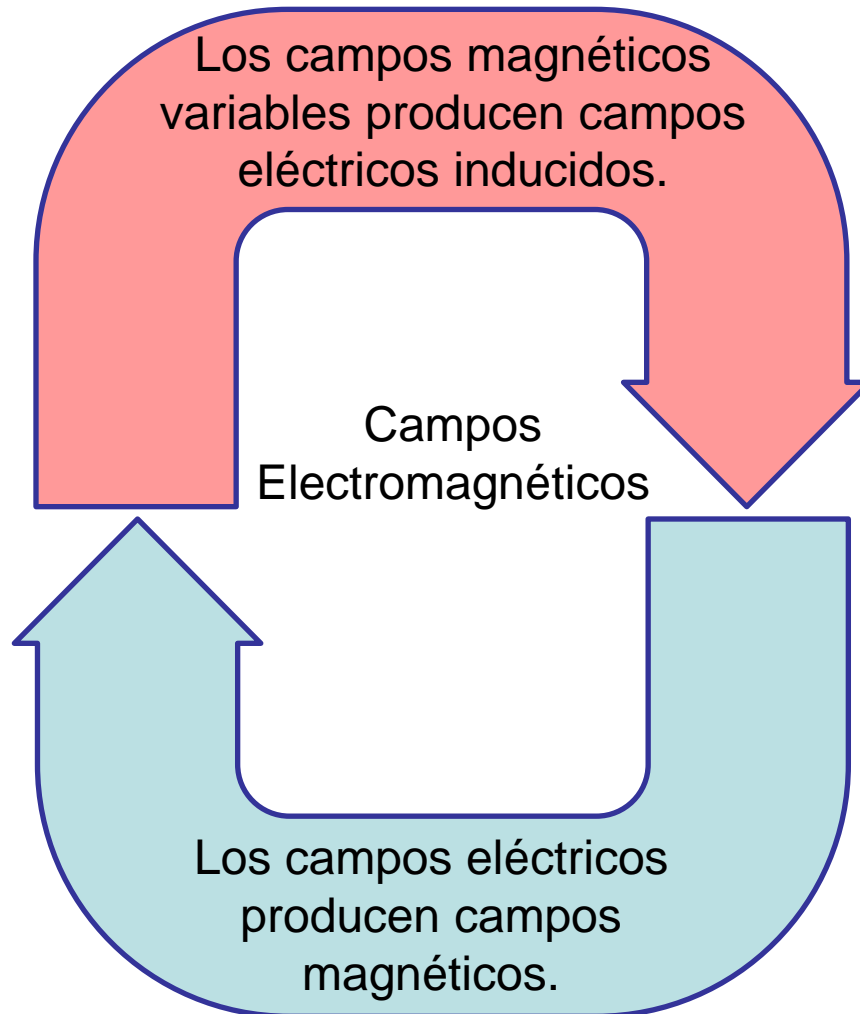
$$V_f - V_i = \oint \vec{E}_{\text{electrostatico}} \cdot d\vec{l} = 0$$

- Para un campo  $\mathbf{E}$  inducido la fem inducida.

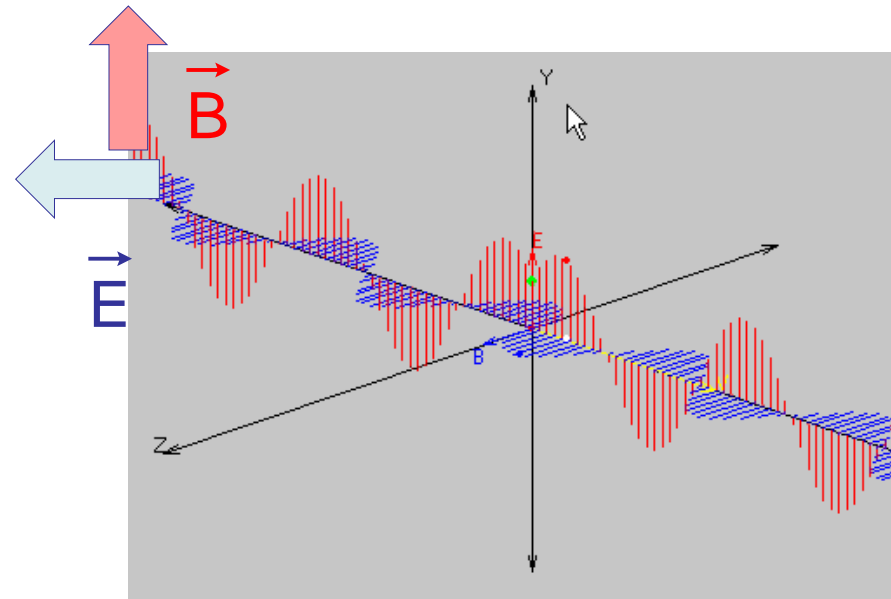
$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \neq 0$$

- La fem inducida no depende de que exista un circuito real.

# Campos electromagnéticos



Los campos magnéticos variables pueden producir campos eléctricos inducidos, que a su vez producen nuevos campos  $\mathbf{B}$ , que a su vez producen nuevos campos  $\mathbf{E}$ , .... De este modo se produce un campo electromagnético que se propaga como una onda.



[http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\\_waves](http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_waves)

# Leyes de Maxwell del electromagnetismo

Las ecuaciones de Maxwell describen todos los fenómenos electromagnéticos. Son el equivalente a las Leyes de Newton pero para los campos electromagnéticos. Son cuatro ecuaciones que relaciona los campos  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{B}$  con sus fuentes. En el vacío son:

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{\text{int}}}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2)$$

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (3)$$

$$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \oint_s \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

- (1) Corresponde a la ley de Gauss.
- (2) Corresponde a la ley de Gauss para el magnetismo, que establece la ausencia de monopolos.
- (3) Es la ley de Faraday-Lenz general.
- (4) Es la ley de Ampere en general.

Maxwell demostró que combinando estas ecuaciones, se forman ondas cuya velocidad es:

$$c = v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Esta velocidad coincide con la velocidad de la luz en el vacío.

# Ondas electromagnéticas

Para deducir la expresión de las ondas electromagnéticas es más simple usar la notación diferencial de las ecuaciones de Maxwell anteriores (son equivalentes):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0 \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \vec{J}(\vec{r}, t) + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (4)$$

Si calculamos el rotacional de (3):  $\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\vec{\nabla} \times \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

Aplicando que:  $\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$

Podemos escribir:  $\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\frac{\partial(\vec{\nabla} \times \vec{B})}{\partial t}$

Si sustituimos la (1) y (4) en la anterior:

Si procedemos de igual forma con B tenemos:  $V_f - V_i = \oint \vec{E}_{electrostatico} \cdot d\vec{l} = 0$

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Ecuación de una onda tridimensional de velocidad c.

Esta velocidad coincide con la velocidad de la luz en el vacío:

$$c = v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$



# Ondas electromagnéticas

Si en las expresiones anteriores de la onda introducimos la expresión genérica de ondas planas armónicas:

$$E(\mathbf{r}, t) = E_o e^{i(kx - \omega t)}$$

$$B(\mathbf{r}, t) = B_o e^{i(kx - \omega t)}$$

Donde  $\mathbf{k}$  es el vector número de ondas, que apunta en la dirección de la onda, obtenemos:

$$\vec{k} \cdot \vec{E} = 0$$

$$\vec{k} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \vec{B}$$

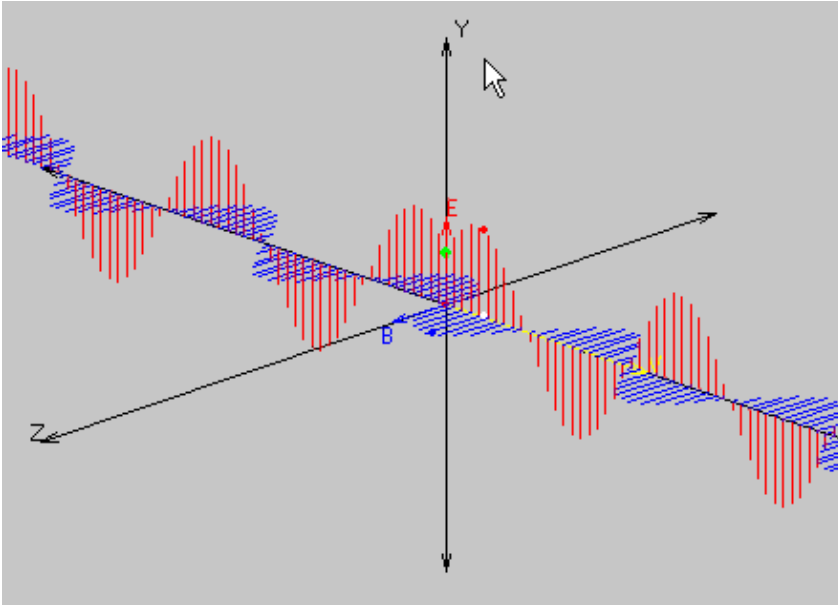
$$\vec{k} \times \vec{B} = -\mu_o \epsilon_o \vec{E}$$

Este resultado muestra que  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{B}$  son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda,  $\mathbf{k}$ , y entre si. Además, muestra que  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{B}$  están relacionados, conocido uno el otro está determinado. Si tomamos módulos, podemos establecer dicha relación. Como la velocidad de fase es  $c$ :

$$kE = \omega B \Rightarrow B = \frac{E}{c}$$

Las dos primeras ecuaciones reducen los grados de libertad de  $\mathbf{E}$  o  $\mathbf{B}$  a dos. Por eso la luz puede estar polarizada de dos formas distintas.

# Ondas electromagnéticas



[http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\\_waves](http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_waves)

- Los campos  $E$  y  $B$  de una onda electromagnética son perpendiculares entre sí.
- Dichos campos oscilan localmente, y con un desfase constante.
- Para generar ondas electromagnéticas se usan sistemas emisores cuyas dimensiones mínimas están determinadas por la longitud de onda de la onda generada:

## Algunos ejemplos de menor a mayor energía:

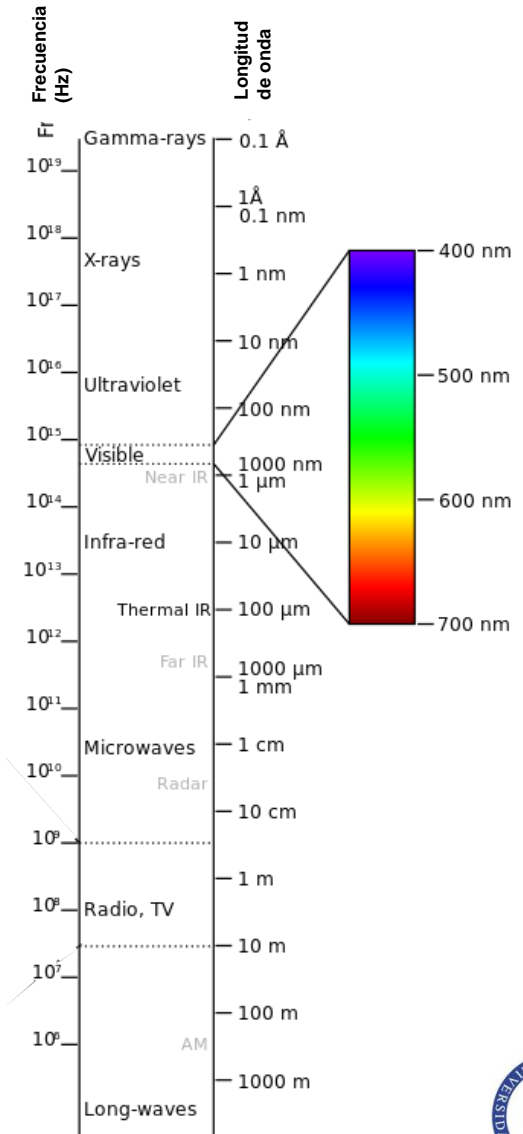
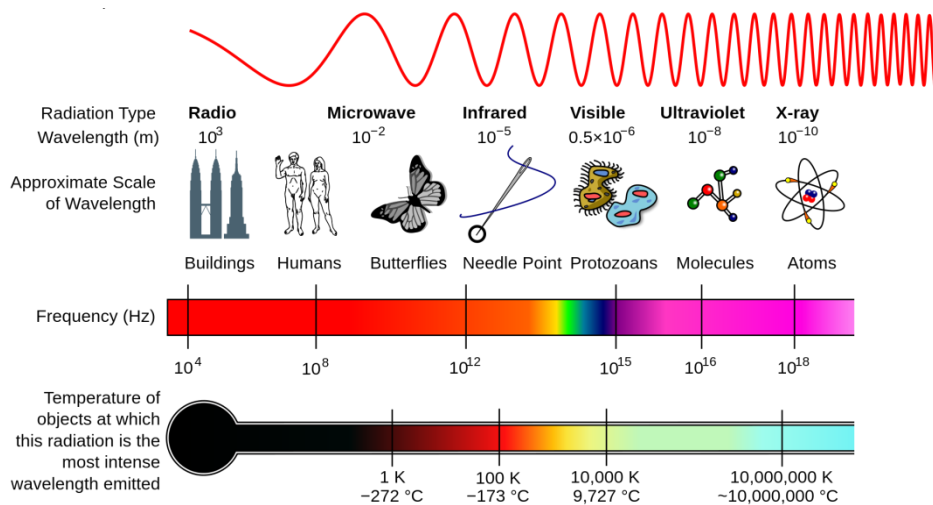
- Las antenas de radio que emiten en amplitud modulada (AM), en onda larga o corta. La longitud de onda tiene dimensiones de decenas a centenares de metros.
- Las microondas de los hornos. Las longitudes de onda típicas están en el rango de las micras
- Luz infrarroja. Esta asociada a la sensación de temperatura.
- La luz visible se generada por emisión atómica.
- La radiación EM más energética corresponde a los rayos  $\gamma$ . Se generan en proceso nucleares

# Ondas electromagnéticas

El espectro electromagnético EM: Aquí se muestra el espectro electromagnético. No existe un límite superior o inferior teórico. Se muestran objetos cotidianos para poder tener una idea del tamaño de la longitud de onda de la clasificación arbitraria que se utiliza del EM y se indica explícitamente la parte visible del EM.

Siempre se cumple:

$$\lambda \cdot \nu = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$



[http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\\_spectrum](http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum)

