

ÓNDAS ELECTROMAGNÉTICAS. ÓPTICA FÍSICA



James Clerk Maxwell (Edimburgo, 1831 – Cambridge, 1879) foi un gran matemático e físico escocés. Xa desde novo se sentiu atraído polas matemáticas, pois estaba dotado dunha sorprendente habilidade e intuición. É considerado como o maior físico teórico do século XIX.

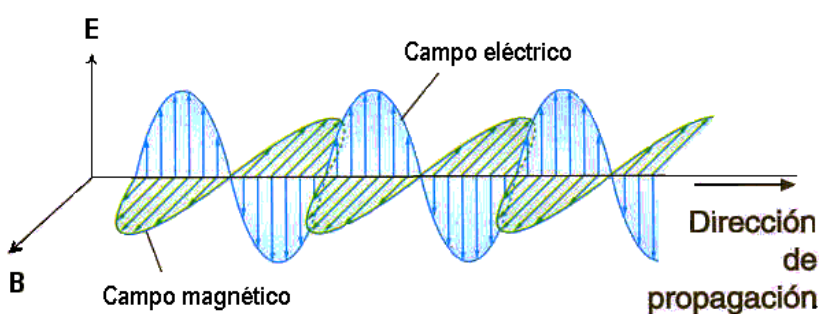
As súas maiores contribucións científicas foron a súa teoría do campo electromagnético e a súa teoría electromagnética da luz. Sintetizou tódolos coñecementos previos sobre electricidade e magnetismo en *catro ecuacións*. Estas ecuacións demostraron que a electricidade, o magnetismo e a luz non son máis que manifestacións dun mesmo

fenómeno: *O campo electromagnético*.

Ecuacións de Maxwell

Nombre	Forma <u>diferencial</u>	Forma <u>integral</u>
<u>Ley de Gauss:</u>	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$	$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{A} = \int_V \rho dV$
Ley de Gauss para el campo magnético (ausencia de <u>monopolos magnéticos</u>):	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$
<u>Ley de Faraday:</u>	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A}$
<u>Ley de Ampère generalizada:</u>	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A} + \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} \cdot d\vec{A}$

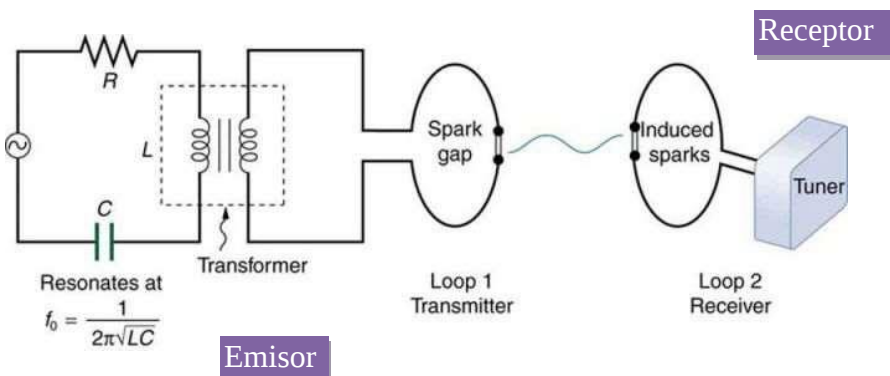
Maxwell desenvolveu a súa *teoría do campo electromagnético* entre 1861 e 1864, e prediú a existencia e características das *ondas electromagnéticas*. Maxwell descubriu que estas debían de propagarse á velocidade da luz e que a luz non era máis que unha forma de radiación electromagnética.



As ondas electromagnéticas son transversais e consisten na propagación, sen necesidade de ningún soporte material dun campo eléctrico e dun campo magnético que son perpendiculares á

dirección de propagación da onda e tamén entre si.

A predicción de Maxwell sobre a existencia das ondas electromagnéticas foi confirmada en 1887 polo físico alemán H. Hertz (descubridor tamén do efecto fotoeléctrico), que produciu e detectou este tipo de ondas.



1- CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

- Son orixinadas por *cargas eléctricas aceleradas*.
- Consisten na *variación periódica do estado electromagnético do espazo*. Un campo eléctrico variable produce un campo magnético variable. Este, á súa vez, orixina un campo eléctrico e así, sucesivamente, propáganse os dous no espazo.
- Non necesitan soporte material para propagarse.
- Os vectores dos campos eléctrico e magnético, $\vec{E}$ e $\vec{B}$, varían *sinusoidalmente* co tempo e a posición, polo que lles son aplicables as ecuacións dadas para as ondas harmónicas:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot \sin(\omega t - kx); \quad \vec{B} = \vec{B}_0 \cdot \sin(\omega t - kx). \text{ Estas ondas están en fase}$$

- Os valores máximos (módulos) dos vectores $\vec{E}$ e $\vec{B}$ cumpren: $\boxed{\frac{E_0}{B_0} = c}$ c = velocidade da onda
- A *velocidade* das ondas electromagnéticas depende do medio de propagación. O seu valor no baleiro vén dado pola expresión:

$$\boxed{c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}}$$

$$\epsilon_0 \text{ (constante dieléctrica do baleiro)} = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\mu_0 \text{ (permeabilidade magnética do baleiro)} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$$

Si se substitúen estes valores na expresión dada, compróbase que $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

- As ondas electromagnéticas tamén cumpren as relacións entre velocidade, λ e T : $\boxed{c = \frac{\lambda}{T}}$

Exercicio resolto

Unha onda electromagnética plana sinusoidal desprázase no baleiro no sentido positivo do eixe X, sendo a súa frecuencia $2 \cdot 10^8 \text{ Hz}$ e o valor máximo do campo eléctrico $E_0 = 500 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$. Calcula: a) a lonxitude de onda e o período; b) o valor máximo do campo magnético correspondente e as ecuacións dos campos eléctrico e magnético.

- Datos: $f = 2 \cdot 10^8 \text{ Hz}$; $E_0 = 500 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

a) Lonxitude de onda $\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 10^8 / \text{s}} = 1,5 \text{ m}$.

Período: $T = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{2 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ s}$

b) Amplitude do campo magnético, B_0 : $B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{500 \text{ N/C}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ T}$

As ecuacións para unha onda que se propaga no sentido positivo do eixe OX son:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{5 \cdot 10^{-9}} = 1,26 \cdot 10^9 \frac{\text{rad}}{\text{s}}; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{1,5} = 4,2 \text{ m}^{-1}$$

$$\vec{E}(x,t) = 500 \vec{j} \cdot \sin(1,26 \cdot 10^9 t - 4,2 x); \quad \vec{B}(x,t) = 1,7 \cdot 10^{-6} \vec{k} \cdot \sin(1,26 \cdot 10^9 t - 4,2 x)$$

2- ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

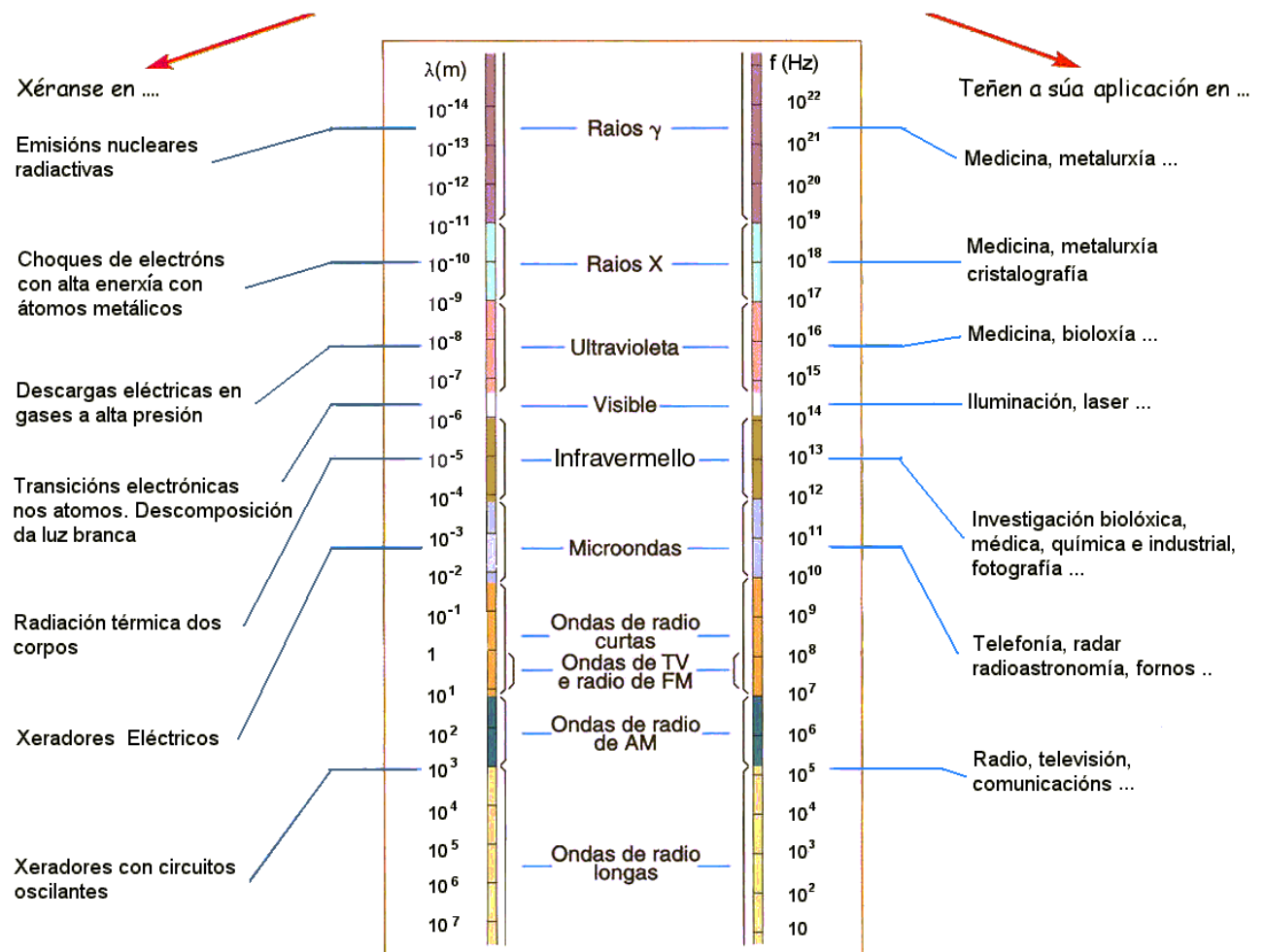
A luz é unha onda electromagnética, pero non todas as ondas electromagnéticas son percibidas polo ollo humano.

Hoxe en día coñecemos moitas clases de ondas electromagnéticas que cubren de forma continua unha ampla marxe de lonxitudes de onda, desde decenas de kilómetros ata 10^{-14} m.

Chamámossle espectro electromagnético á secuencia de tódalas ondas electromagnéticas coñecidas, ordenadas segundo a súa lonxitude de onda ou a súa frecuencia.

Todas as ondas electromagnéticas teñen en común a súa natureza. Porén, cada grupo de ondas, caracterizado por un intervalo determinado de lonxitudes de onda e frecuencias, ten a súa propia forma de produción, así como unhas aplicacións prácticas específicas.

Os diferentes grupos de ondas do espectro...



3- DISPERSIÓN

Para ondas electromagnéticas é mais frecuente falar de índice de refracción absoluto de un medio (n) en vez de falar de índice de refracción relativo como falábamos no caso das ondas mecánicas. Defínese o índice de refracción absoluto, n como o cociente entre a velocidade de propagación da luz no baleiro (c) e a velocidade a través do medio en cuestión:

$$n = \frac{c}{v}$$

Dado que cando unha onda pasa de un medio a outro a frecuencia permanece cte e a lonxitude de onda cambia, o índice de refracción dunha substancia vai ser distinto para cada lonxitude de onda que a atravesese:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0/T}{\lambda/T} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

Vemos que canto maior sexa a lonxitude de onda dunha radiación cando está atravesando unha substancia menor vai a ser n . Debido a esto, cando un feixe de raios de luz de distinta lonxitude de onda (luz branca) incide sobre un material refractante (prisma), cada radiación das que compoñen o feixe vaise desviar un ángulo distinto. Desvíase máis a violeta que a vermella.

A este fenómeno coñéceselle co nome de **dispersión** e é o causante da aparición do *arco da vella* que se produce cando a luz solar (branca) atravesa as gotas de auga que hai en suspensión na atmósfera despois de chover.

PROBLEMAS

- 1- Calcula o índice de refracción dun medio polo que se propaga una onda electromagnética cuxo campo eléctrico ven dado pola ecuación:

$$\vec{E}(x,t) = 10^{-3} \vec{j} \cdot \cos(5 \cdot 10^{10} t - 200 x) \text{ V/m. Sol.: } n = 1,2$$

- 2- O campo eléctrico dunha onda plana no baleiro é $\vec{E}(x,t) = 100 \vec{j} \cdot \sin(3 \cdot 10^{15} t - 10^7 x)$ (SI). Calcula:

a) a lonxitude de onda e a frecuencia; a amplitude do campo magnético correspondente e a súa ecuación de onda.

$$\text{Sol.: a) } 6,28 \cdot 10^{-7} \text{ m; } 4,77 \cdot 10^{14} \text{ Hz; b) } B = 3,33 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

- 3- Unha antena emite unha onda electromagnética de frecuencia 50 kHz. a) Calcula a súa lonxitude de onda. b) Determina a frecuencia dunha onda sonora coa mesma lonxitude de onda. Datos: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; $v_{\text{son}} = 340 \text{ m/s}$

- 4- O espectro visible no aire está comprendido entre as lonxitudes de onda 380 nm (violeta) e 780 nm (vermello). a) Calcula as frecuencias de estas radiacións extremas. ¿Cál de elas se propaga a maior velocidade? b) Determina entre qué lonxitudes de onda está comprendido o espectro visible na auga, cuxo índice de refracción es 4/3. ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

- 5- Unha onda electromagnética ten, no baleiro, unha lonxitude de onda de $5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. a) Determina a frecuencia e o número de onda. b) Se dita onda entra nun determinado medio, a súa velocidade redúcese a $3c/4$. Determina o índice de refracción do medio e a frecuencia e a lonxitude de onda en dito medio. ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)

- 6- Unha onda electromagnética con unha frecuencia de $5,7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ propágase con una velocidade de $2,17 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ en certo obxecto de vidro. Calcula: a) lonxitude de onda no vidro b) lonxitude de onda cando se propaga no aire c) o índice de refracción do vidro

Teoría ondulatoria de la luz:

Diferencia de Fase y Coherencia

$$E_1(x, t) = E_{Max} \cdot \sin(k_1 x - \omega_1 t)$$

$$E_2(x, t) = E_{Max} \cdot \sin(k_2 x - \omega_2 t + \phi)$$

$$\left. \begin{array}{l} \phi = \text{constante} \\ f_1 = f_2 \dots y/o \dots \lambda_1 = \lambda_2 \end{array} \right\}$$

Ondas coherentes



Ej. Luz monocromática de un LASER (λ, f y Φ iguales)



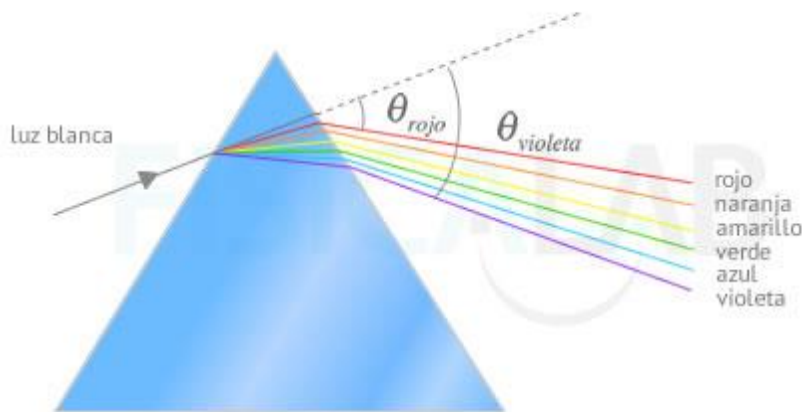
Ej. Luz monocromática de un LED (misma λ y f , pero diferentes Φ)

$$\left. \begin{array}{l} \phi = \text{variable} \\ f_1 \neq f_2 \dots y/o \dots \lambda_1 \neq \lambda_2 \end{array} \right\}$$

Ondas incoherentes



Ej. Luz blanca de un foco (muchas λ, f y Φ diferentes)



Problema ondas

Se hace vibrar una cuerda de guitarra de 1 m de longitud, sujeta por los dos extremos, observando que presenta 7 nodos. Si la amplitud máxima es de 1 cm y la velocidad de propagación de las ondas por la cuerda es de 6 m/s, calcula:

- La ecuación de la onda estacionaria en la cuerda.
- La posición de nodos y vientres y la distancia entre nodos, entre vientres o entre un nodo y un vientre consecutivos.
- La frecuencia fundamental de vibración y la longitud de onda asociada.