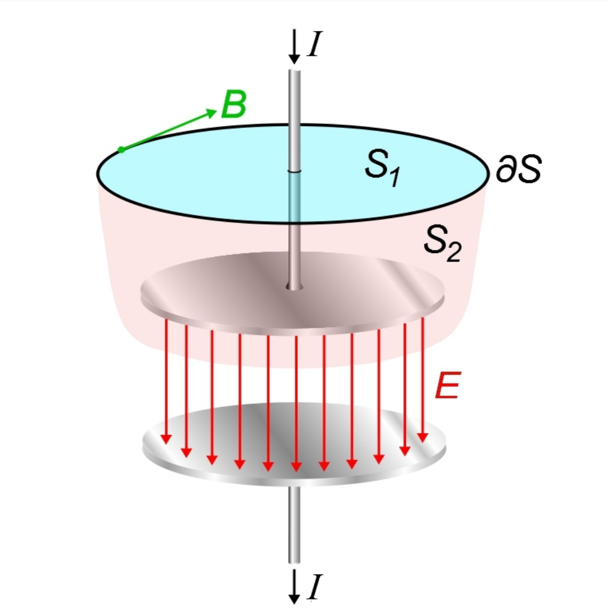
CORRIENTE DE DESPLAZAMIENTO DE MAXWELL. LEY DE AMPÈRE GENERALIZADA



Las superficies S_1 y S_2 están limitadas por la misma trayectoria ∂S. La corriente de conducción en el cable pasa únicamente a través de la superficie plana S_1. Esto conduce a una contradicción en la ley de Ampère que es resuelta únicamente si se postula una corriente de desplazamiento a través de S_2

$$I_d \equiv \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Forma general de la Ley de Ampère (Ley de Ampère-Maxwell)

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 (I + I_d) = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Una **corriente de desplazamiento**, I_d, es una cantidad que está relacionada con un campo eléctrico que cambia o varía en el tiempo. Esto puede ocurrir en el vacío o en un dieléctrico donde existe el campo eléctrico.

El flujo eléctrico a través de S_2 es $\Phi_E = EA = \frac{q}{\epsilon_0}$

Luego la corriente de desplazamiento, es

$$I_d = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = \frac{dq}{dt}$$

Esto es, ¡la corriente de desplazamiento a través de S_2 es precisamente igual a la corriente de conducción I a través de S_1!

La característica significativa de esta generalización de Maxwell es que tanto las corrientes de conducción como los campos eléctricos variables generan campos magnéticos. Posiblemente esto fue inducido por el resultado recíproco de que un campo magnético variable crea un campo eléctrico (Ley de Faraday-Lenz)

ECUACIONES DE MAXWELL[1]

Ley de Gauss

El flujo eléctrico total a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga neta encerrada en esa superficie, dividida por ε_0

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Ley de Gauss para el magnetismo

El flujo magnético neto a través de cualquier superficie cerrada es cero

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

Ley de Faraday de la inducción

La integral curvilínea del campo eléctrico alrededor de cualquier trayectoria cerrada (lo que es igual a la fem) es igual a la variación del flujo magnético a través de cualquier superficie limitada por dicha trayectoria

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Forma generalizada de laLey de Ampère

La integral curvilínea del campo magnético alrededor de cualquier trayectoria cerrada está determinada por la corriente neta y por la variación del flujo eléctrico a través de cualquier superficie limitada por dicha trayectoria

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Fuerza de Lorentz

Una ver que conocemos los campos eléctrico y magnético en un punto del espacio, la fuerza que estos campos ejercen sobre una partícula de carga q pueden calcularse con la expresión:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Las ecuaciones de Maxwell y la ley de fuerza de Lorentz proporcionan una descripción completa de todas las interacciones electromagnéticas clásicas

[1] Aplicadas al espacio vacío, es decir, en ausencia de cualquier material dieléctrico o magnético

ECUACIONES DE MAXWELL[2]

Forma integral		Forma diferencial
$\oiint (\vec{D}\cdot\vec{n})d^2A = Q_{\text{free,included}}$	Ley de Gauss	$\nabla\cdot\vec{D} = \rho_{\text{free}}$
$\oiint (\vec{B}\cdot\vec{n})d^2A = 0$	Ley de Gauss para el magnetismo	$\nabla\cdot\vec{B} = 0$
$\oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi}{dt}$	Ley de Faraday de la inducción	$\nabla\times\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$
$\oint \vec{H}\cdot d\vec{s} = I_{\text{free,included}} + \frac{d\Psi}{dt}$	Ley de Ampère generalizada	$\nabla\times\vec{H} = \vec{J}_{\text{free}} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$

$$\Psi = \iint (\vec{D}\cdot\vec{n})d^2A,\ \Phi = \iint (\vec{B}\cdot\vec{n})d^2A$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0\vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0\varepsilon_r\vec{E},\quad \vec{P} = \sum\vec{p}_0/\mathrm{Vol},\ \varepsilon_r = 1+\chi_e$$ con $$\chi_e = \frac{np_0^2}{3\varepsilon_0 kT}$$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H}+\vec{M}) = \mu_0\mu_r\vec{H},\quad \vec{M} = \sum\vec{m}/\mathrm{Vol},\ \mu_r = 1+\chi_m$$ con $$\chi_m = \frac{\mu_0 n m_0^2}{3kT}$$

[2] Aplicadas en cualquier punto, esto es, en el vacío o bien dentro de cualquier material dieléctrico o magnético

Magnitudes frecuentes en electricidad y magnetismo

SI electromagnetism units V · T · E

Symbol[1]	Name of Quantity	Derived Units	Unit	Base Units
I	Electric current	ampere (SI base unit)	A	A (= W/V = C/s)
Q	Electric charge	coulomb	C	A·s
U, ΔV, $\Delta\varphi$; E	Potential difference; Electromotive force	volt	V	$J/C = kg{\cdot}m^2{\cdot}s^{-3}{\cdot}A^{-1}$
R; Z; X	Electric resistance; Impedance; Reactance	ohm	Ω	$V/A = kg{\cdot}m^2{\cdot}s^{-3}{\cdot}A^{-2}$
ρ	Resistivity	ohm metre	Ω·m	$kg{\cdot}m^3{\cdot}s^{-3}{\cdot}A^{-2}$
P	Electric power	watt	W	$V{\cdot}A = kg{\cdot}m^2{\cdot}s^{-3}$
C	Capacitance	farad	F	$C/V = kg^{-1}{\cdot}m^{-2}{\cdot}A^2{\cdot}s^4$
E	Electric field strength	volt per metre	V/m	$N/C = kg{\cdot}m{\cdot}A^{-1}{\cdot}s^{-3}$
D	Electric displacement field	coulomb per square metre	C/m^2	$A{\cdot}s{\cdot}m^{-2}$
ε	Permittivity	farad per metre	F/m	$kg^{-1}{\cdot}m^{-3}{\cdot}A^2{\cdot}s^4$
χ_e	Electric susceptibility	(dimensionless)	-	-
G; Y; B	Conductance; Admittance; Susceptance	siemens	S	$\Omega^{-1} = kg^{-1}{\cdot}m^{-2}{\cdot}s^3{\cdot}A^2$
κ, γ, σ	Conductivity	siemens per metre	S/m	$kg^{-1}{\cdot}m^{-3}{\cdot}s^3{\cdot}A^2$
B	Magnetic flux density, Magnetic induction	tesla	T	$Wb/m^2 = kg{\cdot}s^{-2}{\cdot}A^{-1} = N{\cdot}A^{-1}{\cdot}m^{-1}$
Φ	Magnetic flux	weber	Wb	$V{\cdot}s = kg{\cdot}m^2{\cdot}s^{-2}{\cdot}A^{-1}$
H	Magnetic field strength	ampere per metre	A/m	$A{\cdot}m^{-1}$
L, M	Inductance	henry	H	$Wb/A = V{\cdot}s/A = kg{\cdot}m^2{\cdot}s^{-2}{\cdot}A^{-2}$
μ	Permeability	henry per metre	H/m	$kg{\cdot}m{\cdot}s^{-2}{\cdot}A^{-2}$
χ	Magnetic susceptibility	(dimensionless)	-	-

Clasificaciones de las ondas

Dependiendo del medio por el que se propagan las ondas se dividen en

- **ondas mecánicas o materiales:** necesitan un medio material para propagarse (oscilaciones en una cuerda, sonido, ondas sísmicas)
- **ondas no mecánicas:** no necesitan un medio material para propagarse, se pueden propagar por el vacío:la luz y en general todas las ondas E.L.M.

En cuanto a las características de la propiedad física que se propaga, Ψ, se habla de:

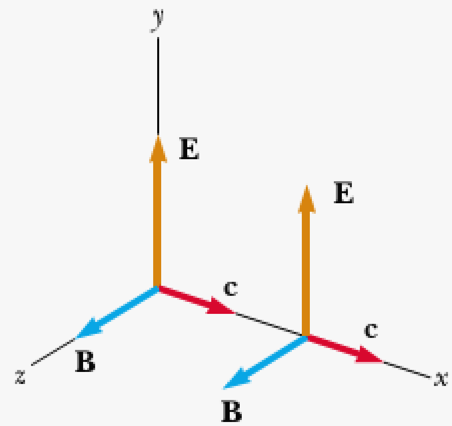
- **Ondas escalares** cuando Ψ es una magnitud física escalar (presión, temperatura, densidad, etc.)
- **Ondas vectoriales** cuando Ψ es un vector (campo eléctrico o magnético, desplazamiento de la cuerda de su posición de equilibrio, etc.). Dentro de las ondas vectoriales se suele hablar de:
  - **Ondas longitudinales:** la perturbación $\vec{\Psi}$ tiene la misma dirección que la de propagación de la onda: el sonido
  - **Ondas transversales:** la perturbación $\vec{\Psi}$ es normal a la dirección de propagación de la onda: las ondas E.L.M.

En general, las ondas vectoriales no tienen por qué ser longitudinales o transversales puras→ondas mixtas (olas del mar, ondas sísmicas)

DEDUCCIÓN DE LAS ECUACIONES DE ONDA EN EL VACÍO (I)

Empezaremos por la ley de Ampère generalizada para una región del espacio vacía (q=0 , I=0)

$$\oint \mathbf{E}\cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \qquad \oint \mathbf{B}\cdot d\mathbf{s} = \epsilon_0\mu_0\frac{d\Phi_E}{dt}$$



Si se utiliza la ley de Faraday-Lenz y se asume ondas planas, se llega a las siguientes ecuaciones diferenciales para **E** y **B**

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t} \qquad (1)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0\epsilon_0\frac{\partial E}{\partial t} \qquad (2)$$

Tomando la derivada con respecto a x en la ecuación (1) y combinando con la (2), se llega a:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial B}{\partial t}\right) = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right) = -\frac{\partial}{\partial t}\left(-\mu_0\epsilon_0\frac{\partial E}{\partial t}\right)$$

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

Cambiando el orden anterior, esto es, tomando la derivada con respecto a x en la ecuación (2) y combinando con (1), se llega a una ecuación diferencial para el otro campo:

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0\epsilon_0\frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

Ambas ecuaciones diferenciales presenta la forma general de una ecuación de ondas con la velocidad expresada por:

$$E = E_{\max}\cos(kx - \omega t)$$

$$B = B_{\max}\cos(kx - \omega t)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = 2.997\,92\times 10^8\ \mathrm{m/s}$$

Las ecuaciones de Maxwell han unificado la permitividad del vacío ε_0, la permeabilidad del vacío μ_0, y la velocidad de la luz misma, c. Antes de su derivación no se conocía que había esta fuerte interacción entre la luz y la electricidad y el magnetismo.

DEDUCCIÓN DE LAS ECUACIONES DE ONDA EN EL VACÍO (II)

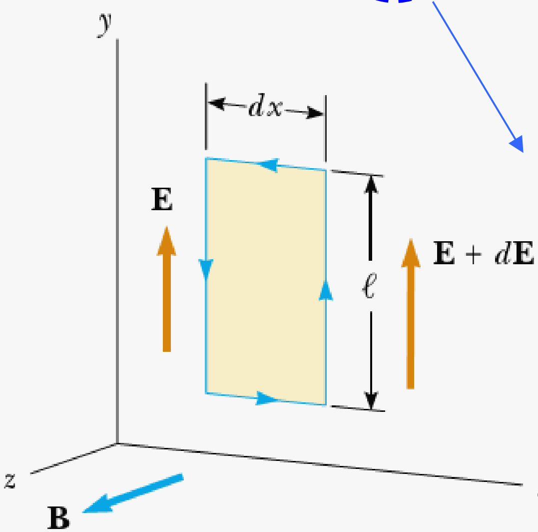
(1)

$$\oint \mathbf{E}\cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$E(x+dx,t) \approx E(x,t) + \left.\frac{dE}{dx}\right]_{t\ \text{constant}} dx = E(x,t) + \frac{\partial E}{\partial x}dx$$

$$\oint \mathbf{E}\cdot d\mathbf{s} = [E(x+dx,t)]\ell - [E(x,t)]\ell \approx \ell\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)dx$$

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = \ell\, dx \left.\frac{dB}{dt}\right]_{x\ \text{constant}} = \ell\, dx\frac{\partial B}{\partial t} \qquad \ell\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)dx = -\ell\, dx\frac{\partial B}{\partial t}$$



Se asume que el dx es pequeño en comparación con la longitud de onda.

$$\oint \mathbf{E}\cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \iff \boxed{\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t}}$$

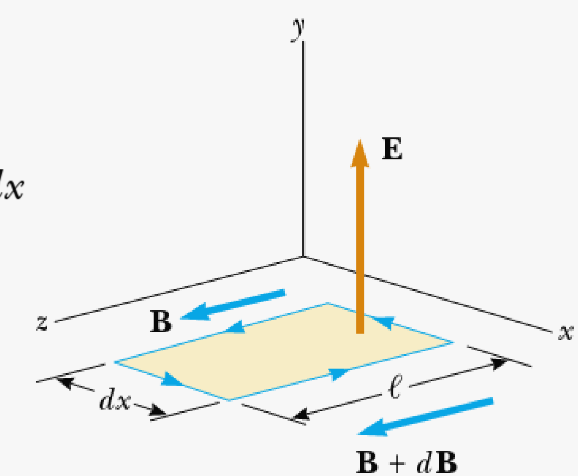
(2)

$$\oint \mathbf{B}\cdot d\mathbf{s} = \epsilon_0\mu_0\frac{d\Phi_E}{dt} \qquad \frac{\partial \Phi_E}{\partial t} = \ell\, dx\frac{\partial E}{\partial t}$$

$$\oint \mathbf{B}\cdot d\mathbf{s} = [B(x,t)]\ell - [B(x+dx,t)]\ell \approx -\ell\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right)dx$$

$$-\ell\left(\frac{\partial B}{\partial x}\right)dx = \mu_0\epsilon_0\,\ell\, dx\left(\frac{\partial E}{\partial t}\right)$$

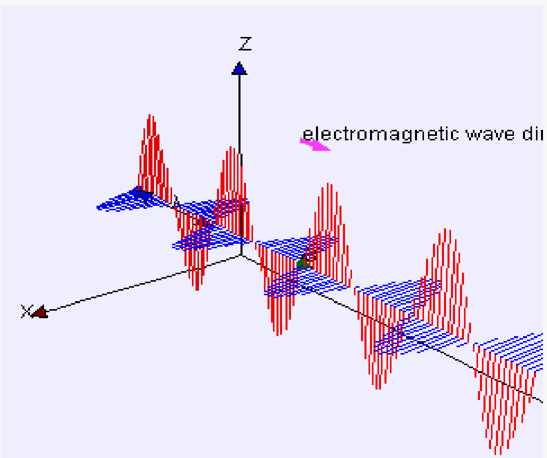
$$\oint \mathbf{B}\cdot d\mathbf{s} = \epsilon_0\mu_0\frac{d\Phi_E}{dt} \iff \boxed{\frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0\epsilon_0\frac{\partial E}{\partial t}}$$



ECUACIONES DE MAXWELL EN EL VACÍO ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Leyes de Maxwell

Ley de inducción de Faraday
Ley de Ampére generalizada
Ley de Gauss para el CE
Ley de Gauss para el CM



Ecuaciones de onda

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

Diagrama 3D mostrando una onda plana polarizada linealmente que se mueve de izquierda a derecha. Los campos eléctricos y magnéticos están en fase (véase como los máximos o mínimos ocurren en fase).

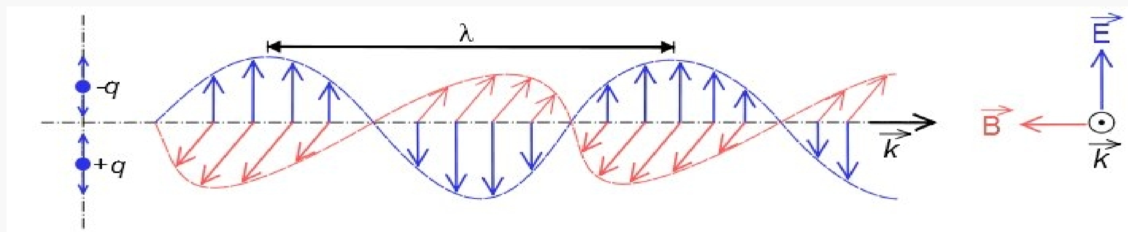
Ondas electromagnéticas

velocidad de propagación:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \qquad \left(c = \lambda f = \frac{\omega}{k}\right)$$

$$E = E_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

$$B = B_{\max} \cos(kx - \omega t)$$



1. **son ondas transversales:** Los campos eléctrico y magnético oscilantes perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación de la onda,

2. **no son independientes:** ambos campos oscilan en fase (y así, por ejemplo ambos se anulan simultáneamente).

3. sus módulos están relacionados por la ecuación $|\vec{E}| = c\,|\vec{B}|$

4. Pueden exhibir distintos tipos de polarización: lineal, circular, elíptica...

5. Las ondas electromagnéticas cumplen el principio de superposición

TRANSVERSALIDAD Y ACOPLAMIENTO DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Pero hay dos ecuaciones y empezamos con cuatro, por tanto hay mas información sobre estas ondas escondidas en las ecuaciones de Maxwell. Vamos a considerar un vector de onda genérico para el campo eléctrico.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 f\left(\hat{\mathbf{k}} \cdot \mathbf{x} - ct\right)$$

Aquí $\mathbf{E}_0$ es la constante de amplitud, f es cualquier función diferenciable dos veces, **k** es un vector unitario en la dirección de propagación, y **x** es un vector de posición. Se observa que:

$$f\left(\hat{\mathbf{k}} \cdot \mathbf{x} - ct\right)$$

Es una solución genérica a lo ecuación de ondas. En otras palabras

$$\nabla^2 f\left(\hat{\mathbf{k}} \cdot \mathbf{x} - ct\right) = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial^2 t} f\left(\hat{\mathbf{k}} \cdot \mathbf{x} - ct\right)$$

Esta forma satisface la ecuación de onda, pero ¿satisface todas las ecuaciones de Maxwell?, y ¿con qué campo magnético se corresponde?

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \hat{\mathbf{k}} \cdot \mathbf{E}_0 f'\left(\hat{\mathbf{k}} \cdot \mathbf{x} - ct\right) = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{k}} = 0$$

La primera ecuación de Maxwell implica que el campo eléctrico es ortogonal a la dirección de propagación de la onda.

$$\nabla \times \mathbf{E} = \hat{\mathbf{k}} \times \mathbf{E}_0 f'\left(\hat{\mathbf{k}} \cdot \mathbf{x} - ct\right) = -\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{B} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{B} = \frac{1}{c}\hat{\mathbf{k}} \times \mathbf{E}$$

La tercera ecuación de Maxwell da el campo magnético. Las restantes nos dan los campos **E** y **B**.

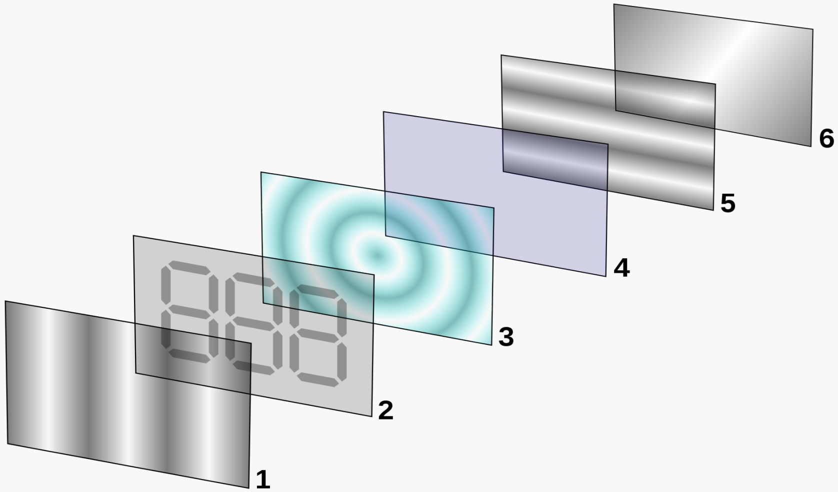
Ecuaciones de Maxwell $\Rightarrow$

$$\vec{E} = \frac{c^2}{\omega}\vec{B} \times \vec{k}$$

$$\vec{B} = \frac{1}{\omega}\vec{k} \times \vec{E}$$

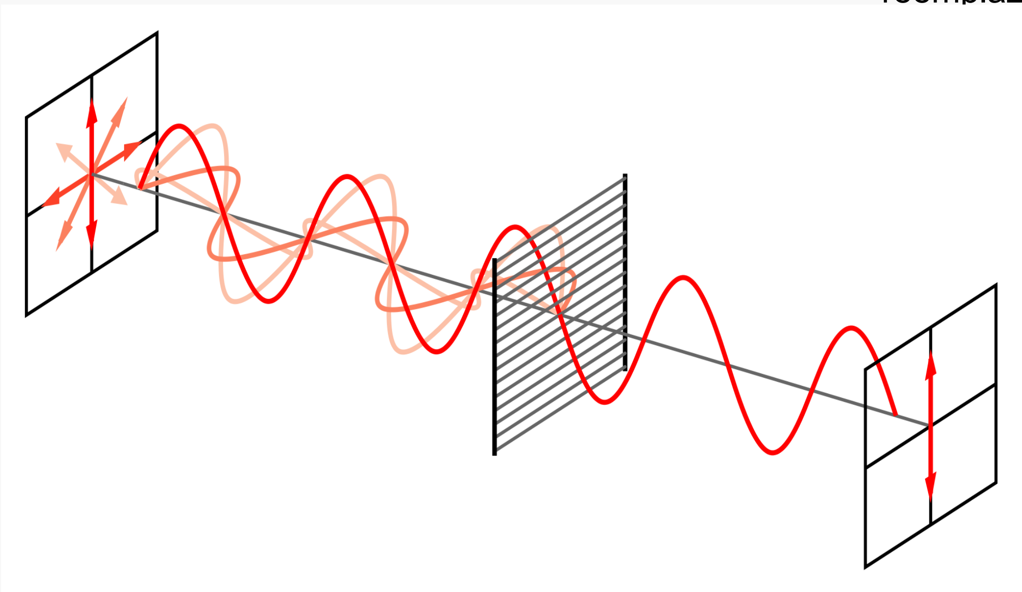
$$\vec{B} = \frac{1}{\omega}\vec{k} \times \vec{E} \quad con \ \vec{k} \perp \vec{E} \quad \Rightarrow \quad |\vec{B}| = \frac{k}{\omega}|\vec{E}| \quad \Rightarrow \quad |\vec{E}| = c\,|\vec{B}|$$

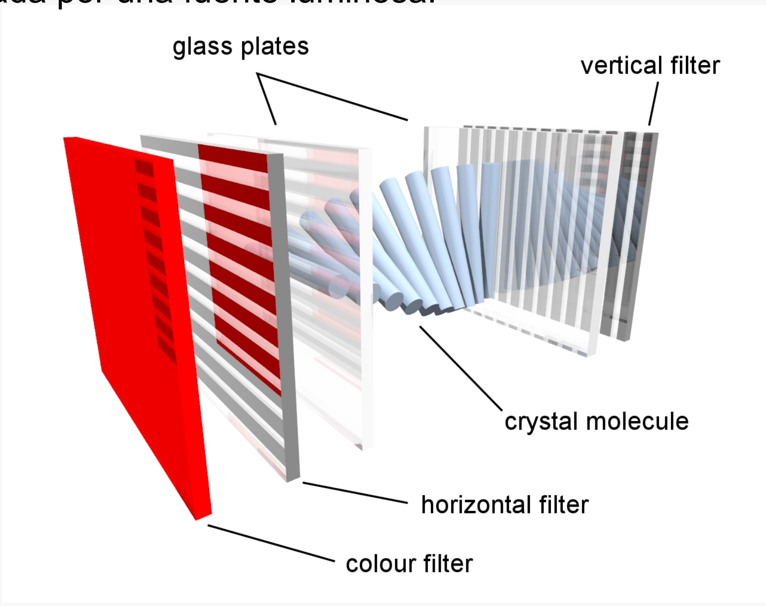
POLARIZACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS



Pantalla de cristal líquido Twisted Nematic (TN).

1) Film de filtro vertical para polarizar la luz que entra.
2) Sustrato de vidrio con electrodos de Óxido de Indio ITO. Las formas de los electrodos determinan las formas negras que aparecen cuando la pantalla se enciende y apaga. Los cantos verticales de la superficie son suaves.
3) Cristales líquidos "Twisted Nematic" (TN).
4) Sustrato de vidrio con film electrodo común (ITO) con los cantos horizontales para alinearse con el filtro horizontal.
5) Film de filtro horizontal para bloquear/permitir el paso de luz.
6) Superficie reflectante para enviar devolver la luz al espectador. En un LCD retroiluminado, esta capa es reemplazada por una fuente luminosa.





ENERGÍA DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA. VECTOR DE POYNTING

Energía por unidad de volumen

$$u_E = \frac{dW_E}{dV} = \frac{\varepsilon}{2}E^2$$

$$u_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

$$u_B = \frac{(E/c)^2}{2\mu_0} = \frac{\epsilon_0\mu_0}{2\mu_0}E^2 = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$$

$$u_B = u_E = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{2\mu_0} \qquad u = u_E + u_B = \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0}$$

$$E = 10^5\ \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad B = 1\ \text{T} \quad \rightarrow \quad \frac{u_B}{u_E} = \frac{B^2/\mu_0}{\varepsilon_0 E^2} = \frac{1}{\varepsilon_0\mu_0}\left(\frac{B}{E}\right)^2 = c^2\left(\frac{B}{E}\right)^2 = \left(c\frac{B}{E}\right)^2 = \left(\frac{3\times10^8}{10^5}\right)^2 = 9\times10^6 \qquad u_B \gg u_E$$

Flujo de Energía por unidad de superficie

$$dW = u\ dV = \varepsilon E^2\ v\ dt\ ds$$

$$\frac{dW}{dt\ ds} = \frac{\omega\varepsilon}{k}E^2 = \varepsilon v E^2$$

Vector de Poynting

El módulo del vector de Poynting proporciona la intensidad instantánea de la onda en su dirección de propagación

$$\vec{\mathbb{P}} = \varepsilon v E^2\ \hat{\mathbf{u}}$$

$$\vec{\mathbb{P}} = \frac{1}{\mu}\ \vec{E}\times\vec{B} = \varepsilon\ v^2\ \vec{E}\times\vec{B}, \quad \text{(W/m}^2\text{)}$$

INTENSIDAD DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Energía Flujo de energía promedio

Dado que los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética oscilan con la frecuencia de la onda la magnitud del vector de Poynting cambia en el tiempo.

$$\langle \vec{\mathbb{P}} \rangle = \langle \left| \vec{\mathbb{P}} \right| \rangle \hat{\mathbf{u}} = \varepsilon v \langle E^2 \rangle \hat{\mathbf{u}} = \varepsilon v E_0^2 \langle \cos^2(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \rangle \hat{\mathbf{u}},$$

$$\left(\langle \cos^2 \omega t \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \cos^2 \omega t \; dt = \frac{1}{2} \right)$$

$$\langle \vec{\mathbb{P}} \rangle = \frac{v^2 \varepsilon}{2} \; \vec{E}_0 \times \vec{B}_0 = \frac{1}{2} \, \varepsilon v E_0^2 \; \hat{\mathbf{u}}.$$

El promedio del vector de Poynting sobre un periodo de tiempo muy superior al periodo de la onda es llamado irradiancia, *I*

$$I \equiv \langle |\vec{\mathbb{P}}| \rangle = \frac{v^2 \varepsilon}{2} \; \left| \vec{E}_0 \times \vec{B}_0 \right| = \frac{1}{2} \, \varepsilon v E_0^2$$

La irradiancia, I, representa el flujo de energía asociado a la radiación electromagnética en la dirección perpendicular a su dirección de propagación.

Irradiancia

Intensidad : Energía que por unidad de tiempo y superficie recibe una superficie, perpendicular a la dirección de propagación, alcanzada (iluminada) por una onda.

$$I \equiv \langle|\vec{\mathbb{P}}|\rangle = \frac{v^2\varepsilon}{2}\left|\vec{E}_0 \times \vec{B}_0\right| = \frac{1}{2}\,\varepsilon v E_0^2$$

La intensidad de una onda ELM es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico (o magnético) de la onda.

Irradiancia o **iluminación energética** I_r: Es la energía que por unidad de tiempo y superficie recibe una superficie alcanzada (iluminada) por una onda.

$$I_r = I\frac{ds'}{ds} = I cos\theta = \langle\vec{\mathbb{P}}\rangle \cdot \frac{d\vec{s}}{ds} = \langle\vec{\mathbb{P}}\rangle \cdot \hat{\mathbf{u}}_S = I\ \hat{\mathbf{u}} \cdot \hat{\mathbf{u}}_S$$

La **potencia total** que recibe una superficie iluminada es:

$$P = \int_S I_r\, ds = \int_S I\cos\theta\, ds = \int_S \langle\vec{\mathbb{P}}\rangle \cdot d\vec{s}$$

si trata de una onda plana que incide sobre una superficie, también plana

$$P = I_r\, S = I S\cos\theta$$

Si la onda es esférica y la superficie también, $S = 4\pi r^2$, entonces $\cos\theta = 1$:

$$P = I \cdot 4\pi r^2$$

MOMENTO LINEAL DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA. PRESIÓN DE RADIACIÓN

Una onda electromagnética trasporta momento lineal así como energía. Se sigue que, el momento de una onda absorbido por una superficie se debe traducir en una presión sobre la superficie.

$$p = \frac{U}{c}$$ (absorción completa)

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{A}\frac{dp}{dt}$$ (P presión ejercida por la radiación absorbida; p momento lineal que lleva la onda)

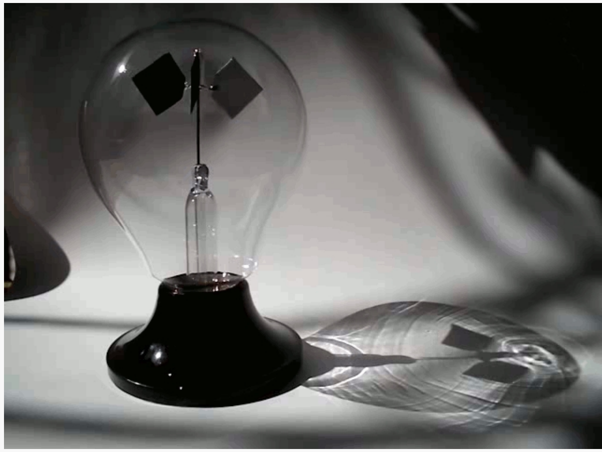
$$P = \frac{1}{A}\frac{dp}{dt} = \frac{1}{A}\frac{d}{dt}\left(\frac{U}{c}\right) = \frac{1}{c}\frac{(dU/dt)}{A}$$

$$P = \frac{S}{c}$$ Presión de radiación ejercida en una superficie completamente absorbente

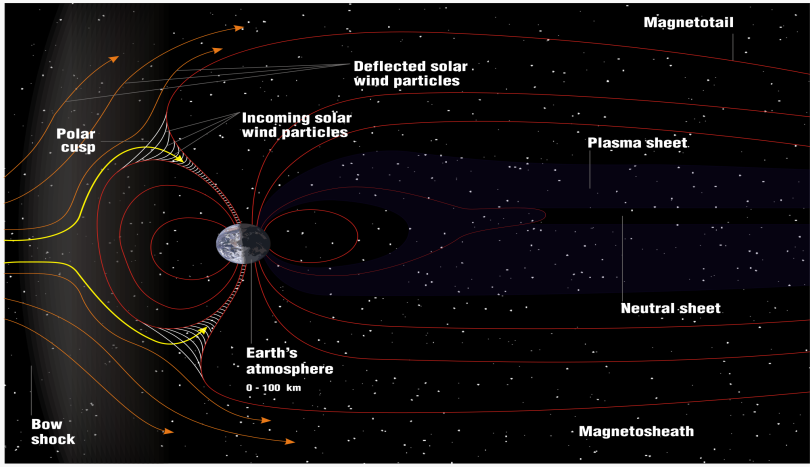
$$p = \frac{2U}{c}$$ (reflexión completa)

$$P = \frac{2S}{c}$$ Presión de radiación ejercida en una superficie completamente reflectante

Radiómetro de Crookes o molinillo de luz



Magnetosfera de la Tierra desviando las partículas cargadas solares (líneas amarillas) hacia lo polos, donde forman las auroras.

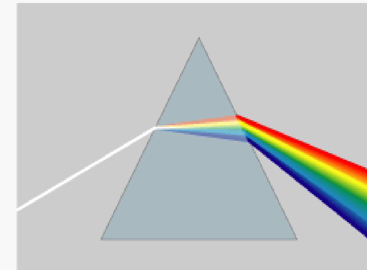


Para una incidencia oblicua en una superficie reflectante, el momento transferido es $(2U\cos\theta)/c$ y la presión $P = (2S\cos^2\theta)/c$ donde θ es el ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de propagación de la onda.

Incluso bajo grandes intensidades de radiación electromagnética, la presión de radiación es muy pequeña. En la órbita de la Tierra, con una intensidad solar de 1.350 W/m^2, la presión de radiación alcanza un máximo de 4,5 x10-6 N/m^2. Si esta radiación no es absorbida y se refleja en una superficie, la presión alcanza un total de 9 x10-6 N/m^2, siendo necesaria una superficie reflectante de 380 metros de diámetro para obtener un Newton de fuerza. La presión de radiación constituye el principal pilar de funcionamiento en un impulsor basado en velas solares, o de luz.

Espectro electromagnético

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro.



La radiación electromagnética puede manifestarse de diversas maneras como calor radiado, luz visible, rayos X o rayos gamma. A diferencia de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética se puede propagar en el vacío. En el siglo XIX se pensaba que existía una sustancia indetectable, llamada éter, que ocupaba el vacío y servía de medio de propagación de las ondas electromagnéticas. El estudio teórico de la radiación electromagnética se denomina electrodinámica y es un subcampo del electromagnetismo.