APUNTE: Ecuaciones de Maxwell

Alrededor de 1860, el gran físico escocés James Clerck Maxwell dedujo que las leyes experimentales de la electricidad y el magnetismo (leyes de Coulomb, Gauss, Biot-Savart, Ampere y Faraday) podían resumirse de una forma matemática concisa que hoy es conocida como Ecuaciones de Maxwell. En una de ellas (la de Ampere) aparecía una inconsistencia que Maxwell fue capaz de eliminar. Además, los experimentos individuales que condujeron a las leyes nunca dieron una indicación de sus implicaciones, entre ellas la existencia de ondas electromagnéticas.

	Diferencial	***Integral***
Ley de GaussM	$\vec{\nabla}\cdot\vec{\mathbf{B}}=0$	$\oiint_S \vec{\mathbf{B}}\cdot d\vec{\mathbf{A}}=0$
Ley de Gauss E	$\vec{\nabla}\cdot\vec{\mathbf{D}}=\rho_{libre}$	$\oiint_S \vec{\mathbf{D}}\cdot d\vec{\mathbf{A}}=Q_{libre\ encerrada}$
Ley de Faraday	$\vec{\nabla}\times\vec{\mathbf{E}}=-\dfrac{\partial\vec{\mathbf{B}}}{\partial t}$	$\oint_{C\ (S)} \vec{\mathbf{E}}\cdot d\vec{\mathbf{l}}=-\dfrac{d}{dt}\iint_S \vec{\mathbf{B}}\cdot d\vec{\mathbf{A}}$
Ley de Ampère-Maxwell	$\vec{\nabla}\times\vec{\mathbf{H}}=\vec{\mathbf{J}}+\dfrac{\partial\vec{\mathbf{D}}}{\partial t}$	$\oint_{C\ (S)} \vec{\mathbf{H}}\cdot d\vec{\mathbf{l}}=I_{conduc}+\dfrac{d}{dt}\iint_S \vec{\mathbf{D}}\cdot d\vec{\mathbf{A}}$

$\vec{\mathbf{E}}$**: vector intensidad de campo eléctrico**
$\vec{\mathbf{D}}$**: vector desplazamiento eléctrico**
$\vec{\mathbf{B}}$**: vector inducción magnética**
$\vec{\mathbf{H}}$**: vector campo magnético**
$\vec{\mathbf{J}}$**: vector densidad de corriente**
ρ_{libre}**: densidad volumétrica de carga libre**
I_{conduc}**: corriente de conducción**

Las 2 primeras ecuaciones (llamadas Ley de Gauss (1777-1855) para campos magnéticos y Ley de Gauss para campos eléctricos) relacionan cómo se extienden los campos magnéticos y eléctricos, respectivamente por el espacio estando presentes sus fuentes. La tercera y la cuarta relacionan los campos eléctricos y magnéticos cuando ellos dependen del tiempo. (Apéndice I)

1. La primera ($\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathbf{B}} = 0$) proviene del hecho de que no se han encontrado monopolos magnéticos (polos aislados), ni siquiera para campos magnéticos dependientes del tiempo. Es decir, experimentalmente se ha observado que siempre las líneas de campo magnético no divergen de ningún punto ni convergen a ningún punto, es decir, su divergencia es nula (forma diferencial). O lo que es equivalente, que el flujo de campo magnético a través de cualquier superficie cerrada es nulo (forma integral).
2. La segunda ($\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathbf{D}} = \rho_L$) es una generalización de la Ley de Coulomb (1736-1806). La Ley de Coulomb es sólo válida para cargas estáticas, mientras que la Ley de Gauss vale también para campos que varían con el tiempo, es decir, cargas no estacionarias. Esta ley describe cómo convergen las líneas de campo sobre una carga negativa, y cómo divergen desde una carga positiva (forma diferencial). Es lo mismo interpretarla como que el flujo del vector desplazamiento a través de una superficie cerrada es numéricamente igual a la carga libre encerrada (no carga inducida). Es una consecuencia de la Ley de Coulomb.
3. La tercera es la Ley de Faraday (1791-1867). Es históricamente posterior a la de Ampere, y establece que todo campo magnético que varíe con el tiempo inducirá un campo eléctrico. (Apéndice I)
4. La Ley de Ampere (1775-1836) original describe la relación entre el campo magnético y la corriente que la origina. Es decir, la electricidad

produce magnetismo (hilo por el que circula corriente). Sin embargo Maxwell (1831-1879) introdujo un término adicional, que corresponde a la llamada corriente de desplazamiento. En la Ley de Ampere original había una falla cuando las corrientes eran variables, que Maxwell solucionó. (Apéndice I)

En 1822, Faraday quería convertir el magnetismo en electricidad, ya que la electricidad producía magnetismo. Recién lo logró en 1831 (inducción electromagnética).

Aclaración: En general, se encuentran expresiones de las ecuaciones de Maxwell donde no aparecen los campos desplazamiento ni magnético, pero sí aparecen constantes. En realidad las ecuaciones de Maxwell aquí expuestas son generales, ya que no suponen ninguna propiedad de los materiales donde hay campos.

Estas leyes juegan en el electromagnetismo clásico un papel análogo al de las ecuaciones de Newton en la mecánica clásica. Sin embargo, no sólo son ecuaciones matemáticamente más complicadas que las de Newton , sino que además jugaron un papel fundamental en la teoría de la relatividad. El trabajo original de Einstein (1905) sobre la teoría de la relatividad especial se llama *Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento*. (Apéndice II)

En principio, pueden resolverse todos los problemas del electromagnetismo mediante su empleo. Sin embargo, tenemos 8 ecuaciones y 15 incógnitas. Es decir, que para resolverlas debemos encontrar más ecuaciones. Ellas son las llamadas relaciones constitutivas o materiales, que relacionan $\mathbf{E}, \mathbf{D}, \mathbf{B}, \mathbf{H}\ y\ \mathbf{J}$. Veamos las correspondientes a medios lineales e isótropos y sus características.

RELACIONES CONSTITUTIVAS O MATERIALES PARA MEDIOS LINEALES E ISÓTROPOS

- $\vec{\mathbf{D}} = \varepsilon\, \vec{\mathbf{E}}$ $\quad \left(\varepsilon_{vacío} \equiv \varepsilon_0 = 8.85\, 10^{-12}\ \mathrm{C}^2 / \mathrm{Nm}^2\right)$
- $\vec{\mathbf{J}} = \sigma\, \vec{\mathbf{E}}$ **(dieléctricos o aisladores:** $\sigma \approx 0$ **; conductores:** $\sigma \neq 0$**)**
- $\vec{\mathbf{B}} = \mu\, \vec{\mathbf{H}}$ **(** $\mu_{vacío} \equiv \mu_0 = 4\pi\, 10^{-7}\ \mathrm{N}/\mathrm{A}^2$ **; paramagnéticos:** $\mu/\mu_0 > 1$**;**

  diamagnéticos: $\mu/\mu_0 < 1$**; no-magnéticos:** $\mu/\mu_0 \approx 1$**)**

siendo

$\varepsilon \equiv$ **permitividad dieléctrica o constante dieléctrica**

$\mu \equiv$ **permeabilidad magnética**

$\sigma \equiv$ **conductividad**

Si consideramos estas tres relaciones constitutivas, tendremos 9 incógnitas menos y por lo tanto me sobran las ecuaciones. <u>Aclaración:</u> Los materiales ferromagnéticos no pueden ser incluidos aquí porque la relación entre **B** y **H** no es una constante sino una función del campo. Son materiales no-lineales magnéticos. También los hay eléctricos. Un material es **lineal** (eléctrico/ magnético) cuando la relación entre **E** y **D** / **B** y **H** es lineal, lo que equivale a decir que ε/μ están dadas por una matriz de 3x3. En el caso en que las propiedades del material sean tales que se pueda diagonalizar en algún sistema de coordenadas con los tres elementos iguales, la matriz será equivalente a una función $\varepsilon(x,y,z)$ y se dice que el material es **isótropo**. Si uno de ellos es distinto a los otros dos (a los elementos de la matriz diagonal se los llama constantes dieléctricas principales), el material es **anisótropo**. Si la constante dieléctrica o constantes principales no dependen de la posición, el material es homogéneo. Cuando un material es homogéneo, sus propiedades no dependen del trozo de material; cuando un material es isótropo sus propiedades no dependen de la dirección en que esté el material respecto de una perturbación (o lo que es equivalente, existen direcciones preferenciales).

Si además de medios lineales, isótropos y homogéneos, consideramos que el "espacio" que queremos estudiar está libre de cargas y corrientes, las ecuaciones se simplifican notablemente.

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{\mathbf{D}} = 0 \Rightarrow \vec{\nabla}\cdot\vec{\mathbf{E}} = 0$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{\mathbf{B}} = 0 \Rightarrow \vec{\nabla}\cdot\vec{\mathbf{H}} = 0$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{\mathbf{E}} = -\frac{\partial\vec{\mathbf{B}}}{\partial t} \Rightarrow \vec{\nabla}\times\vec{\mathbf{E}} = -\mu\frac{\partial\vec{\mathbf{H}}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla}\times\vec{\mathbf{H}} = \frac{\partial\vec{\mathbf{D}}}{\partial t} \Rightarrow \vec{\nabla}\times\vec{\mathbf{H}} = \varepsilon\frac{\partial\vec{\mathbf{E}}}{\partial t}$$

Pero lo más importante es que Maxwell demostró que las ecuaciones podían combinarse. En 1864, Maxwell presentó a la Royal Society un o de los artículos más importantes jamás escritos : *Una teoría dinámica del campo electromagnético*. Llegó a una *Ecuación de ondas* que deben satisfacer los campos eléctrico y magnético; una fórmula bien conocida que describe los movimientos ondulatorios, desde las vibraciones de un tambor hasta las ondas en el agua

Como $\vec{\nabla}\times(\vec{\nabla}\times\vec{\mathbf{E}}) = -\mu(\vec{\nabla}\times\frac{\partial\vec{\mathbf{H}}}{\partial t}) = -\mu\frac{\partial(\vec{\nabla}\times\vec{\mathbf{H}})}{\partial t} = -\mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{\mathbf{E}}}{\partial t^2}$

y $\vec{\nabla}\times(\vec{\nabla}\times\vec{\mathbf{E}}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla}\cdot\vec{\mathbf{E}}) - \vec{\nabla}^2\vec{\mathbf{E}} = -\vec{\nabla}^2\mathbf{E}$

siendo $\vec{\nabla}^2\vec{\mathbf{E}} \equiv (\vec{\nabla}^2 E_x)\breve{x} + (\vec{\nabla}^2 E_y)\breve{y} + (\vec{\nabla}^2 E_z)\breve{z}$

$$\Rightarrow \boxed{\nabla^2\vec{\mathbf{E}} - \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{\mathbf{E}}}{\partial t^2} = 0} \qquad \text{Análogamente} \qquad \boxed{\nabla^2\vec{\mathbf{H}} - \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{\mathbf{H}}}{\partial t^2} = 0}$$

Esto es una ecuación de ondas y sugiere la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan con una velocidad $u = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$

El término que correspondía a la velocidad de la onda se podía calcular. Maxwell hizo uso de los resultados de los experimentos eléctricos efectuados en 1856 por Weber y Kohlrausch. Si hacemos el cálculo de $1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$ y resulta que las ondas electromagnéticas se propagan con una velocidad de aproximadamente 300.000 km/s que coincidía con la velocidad de la luz medida por Fizeau.

En su libro "A treatise on electricity and magnetism" presenta el siguiente cuadro:

Velocidad de la luz c(m/s)	"Cociente de unidades eléctricas" $1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$ (m/s)
Fizeau..............................314.000.000	Weber........................310.740.000
Aberración, paralaje.........308.000.000	Maxwell.....................288.000.000
Foucault............................298.360.000	Thomson....................282.000.000

Así Maxwell escribió: " Se manifiesta que la velocidad de la luz y el cociente de unidades son cantidades del mismo orden de magnitud. Ninguna de ellas ha sido determinada con tal grado de precisión que nos permita asegurar que una es más grande o chica que la otra. ....La concordancia de los resultados parece inducir que la luz es una perturbación electromagnética que se propaga de acuerdo con las leyes electromagnéticas".

Cada componente de los vectores **E** y **H** verifican entonces la ecuación de ondas. Como la ecuación es lineal, la suma de soluciones es solución (ver Apéndice III). Consideremos entonces una onda plana. ¿Qué es una onda plana?. Decimos que tenemos una onda plana si dado un punto $\vec{\mathbf{r}}$ y una dirección $\breve{\mathbf{N}}$, la perturbación está dada por $V = V(\breve{\mathbf{N}} \cdot \vec{\mathbf{r}}, t)$. Veamos: la ecuación de cada plano perpendicular a $\breve{\mathbf{N}}$ está dado por $\breve{\mathbf{N}} \cdot \vec{\mathbf{r}} = constante$. Entonces en cada instante de tiempo *t*, V es constante sobre el plano. Si *u* es la velocidad de propagación, vemos que la solución general de la ecuación es $V = V_1(\breve{\mathbf{N}} \cdot \vec{\mathbf{r}} - ut) + V_2(\breve{\mathbf{N}} \cdot \vec{\mathbf{r}} + ut)$. Tomemos la solución V_1: representa una perturbación que se propaga con *u* en la dirección $\breve{\mathbf{N}}$. ¿Cumple una onda plana de estas características la ecuación de ondas? Sí.

Lo que nos interesa ahora e ver qué característica tiene esa onda solución, es decir que propiedades tienen las componentes de los campos. Para ello proponemos perturbaciones (campos) del tipo de V_1, reemplazamos en las ecuaciones de Maxwell. Tras la resolución se obtiene que las ondas electromagnéticas son **transversales**, es decir, los campos eléctrico y magnético están en un plano perpendicular al de propagación y son perpendiculares entre sí, formando $\breve{\mathbf{N}}\breve{\mathbf{E}}\breve{\mathbf{H}}$ terna directa. Sólo hemos considerado que es una onda plana. No hemos considerado que sea armónica.

Pero sabemos por experiencia (interferencia, difracción, etc) que la luz tiene el carácter de onda armónica. Postulamos como solución más simple

$$\vec{\mathbf{E}} = \vec{\mathbf{A}}\, sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}\left(\breve{\mathbf{N}} \cdot \vec{\mathbf{r}} - ut\right)\right]$$

donde λ es la longitud de onda, ya que así si a $\breve{\mathbf{N}} \cdot \vec{\mathbf{r}}$ le sumo λ, la función no cambia.

HAGAMOS UN POCO DE HISTORIA: LA VELOCIDAD DE LA LUZ

Las bases de la concepción de la naturaleza de la luz la podemos encontrar en la antigüedad (Apéndice IV)

- Demócrito (400 a.C.) era un atomista: la luz era una granizada de partículas
- Aristóteles (350 a.C.) no aceptaba la idea del vacío y mucho menos la idea de chorros de partículas en el vacío. Supuso que el espacio estaba lleno de una sustancia llamada éter, donde la luz era un pulso del éter o algo así.
- Durante el siglo XVIII existían dos concepciones diferentes sobre la naturaleza de la luz. La escuela predominante (Newton) la imaginaba como una corriente de partículas. La otra la consideraba como una onda en el éter (Hooke, Huygens) : toda onda es una perturbación de un medio que se propaga.
- Durante el siglo XIX (sobre todo la segunda mitad) fue una época de concepción ondulatoria, teoría que fue resucitada por Young y Fresnel independientemente: la luz era una onda elástica en el éter que todo lo llenaba.
- El siglo XX dio lugar a una mezcla de ambos modelos, a una dualidad onda-partícula.

VELOCIDAD DE LA LUZ

En la antigüedad se hablaba de velocidad de la vista; debe hacerlo a máxima velocidad. Aristóteles, al considerar a la luz como un estado del medio, no se propaga. San Agustín (354-430) asocia a la luz con Dios y Cristo y habla de que “nuestro rayo visual no llega a los objetos cercanos antes y a los lejanos después” i.e. es infinita. En el siglo XII se sostenía que ninguna sustancia corpórea puede ser tan sutil “Lo que es divino puede viajar a velocidad infinita, pero lo material no”: es finita. Para Descartes era infinita porque en el plenum un sacudón en un extremo produce otro instantáneamente en el otro. Pero estaba errado.

Comparada con las cosas ordinarias, la velocidad de la luz es excesivamente grande, por lo tanto, no es sorprendente que llevara tantos años poder medirla. Galileo (1600) quiso medirla con los destellos de una luz y no pudo. En 1676 Römer la midió a partir de la duración de los eclipses de las lunas de Júpiter, ya que el intervalo entre la observación de los mismos dependía de la distancia a la tierra, y supuso que se debía al retraso en llegar la luz. En 1727 Bradley la midió a partir de un experimento usando aberración. El experimento de Fizeau en 1849 fue el primero exitoso en medir la velocidad de la luz en distancias terrestres, usando una rueda dentada. Más adelante Faraday descubrió que la luz que se propagaba por un medio material era afectada por el magnetismo, lo que implicaba un parentesco entre luz y magnetismo ("Si un vidrio se ponía en un fuerte campo magnético, cambia el plano de polarización de la luz cuando luz LP pasa en una dirección en la cual el campo tiene una componente"). Posteriormente Maxwell demostró la posibilidad teórica de la existencia de ondas electromagnéticas que viajarían a una velocidad casi igual a la de la luz. Pero fue recién en 1888 (ya Maxwell había muerto) cuando Hertz descubrió ondas que eran sin dudas electromagnéticas y cuyas propiedades eran similares a la de la luz (interferencia, reflexión y refracción). Así el modelo teórico de las luz sería: un campo eléctrico variable genera un campo magnético variable, y un campo magnético variable genera un campo eléctrico variable. Una onda electromagnética está formada por una trama de campos eléctricos y magnéticos variables. Como si colaboraran entre sí, ambos crecen y decrecen, se generan y regeneran, barriendo el espacio.

RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y SU ESPECTRO

En todas sus formas, la radiación e.m. se propaga en el vacío a la misma velocidad. Ya sea luz, UV o rayos X, la radiación consiste en campo magnéticos y eléctricos oscilantes que se inducen entre sí. El espectro e.m. se suele dividir en regiones según la longitud de onda aproximada. Históricamente se conocieron

1. la luz visible : 400-800 nm
2. infrarrojo (1880): 800 nm – 1 mm
3. ultravioleta (1881): 1 nm –400 nm
4. ondas de radio (1888): 1 m –10 km
5. rayos X (1895): 0.01 nm – 1 nm
6. rayos gamma (1900): 0,0001 nm – 0,01 nm
7. microondas: 1 mm – 1 m

Rayos γ	Rayos X	UV	Visible	Infrarrojo	Microondas	Radio
10^{-4}nm- 10^{-2}nm	0.01 nm- 1 nm	1 nm – 400 nm	400 nm- 800 nm	800 nm- 1mm	1 mm - 1 m	1 m - 10000 m
1900	1895	1881		1880	>1900	1888

Radio atómico : 10^{-10} m = 0,1 nm = 1 Å

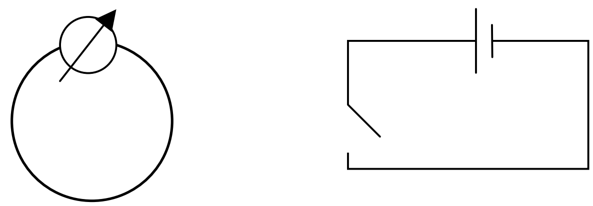
Radio nuclear: 10^{-14} m = 0,001 nm = 0,01 Å

Apéndice I: Modificaciones a las leyes de Faraday y Ampere

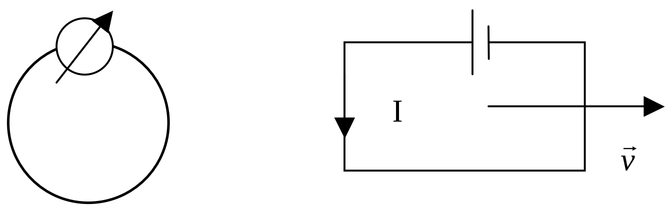
Ley de Faraday

Las observaciones de Faraday se referían a un circuito cerrado formado por un conductor con un instrumento para detectar el paso de corriente. En el circuito de prueba se establecía una corriente transitoria si

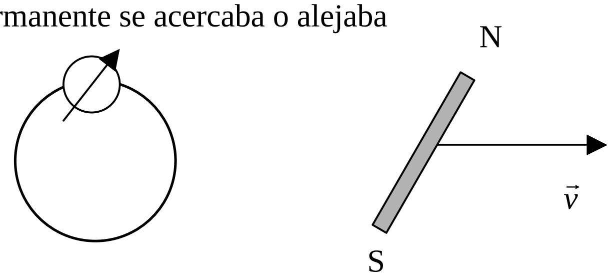
1) El el circuito se “prendía”o “apagaba” una fuente estacionaria



2) Si uno de los circuitos se acercaba o alejaba



3) Si un imán permanente se acercaba o alejaba



Faraday justifica tal comportamiento diciendo: aparece una corriente transitoria en el circuito de prueba porque se produce una fuerza electromotriz que es proporcional a la variación de flujo que concatena el circuito de prueba, i.e. $\Sigma = fem = -\frac{d\Phi}{dt}$ donde el signo menos proviene de la experiencia (Ley cualitativa de Lenz). En esta ecuación Φ es el flujo de **B** y no de **H**. Esto también se comprueba experimentalmente en un transformador. Si se le saca el entrehierrro, no se obtiene la misma relación de transformación y **B**=μ**H**>>μ_0**H**.

La trascendencia de esta ley la da Maxwell 30 años después. Faraday la había enunciado pensando que Σ era una fuerza electromotriz que hacía circular corriente por el circuito de prueba. Maxwell hizo un razonamiento matemático sencillo y físicamente sutil. Para Maxwell esta ley debía ser una propiedad de los campos **E** y **B** que no tenía nada que ver con la presencia o ausencia del circuito por el que se mide la corriente. Así se liberó del circuito. Maxwell postuló que la variación del flujo de **B** en alguna zona (limitada o no limitada) del espacio, produce en todo punto del espacio, exista o no un circuito de prueba, un campo eléctrico inducido por el cambio de flujo de **B**. Eso es lo que produce el movimiento de cargas en un conductor, i.e., una corriente. Si el “circuito”es dieléctrico no habrá movimiento de cargas (porque por definición, en un dieléctrico no hay cargas libres que puedan migrar) pero sí un campo eléctrico y por los tanto una *fem*. La Ley de Faraday se convierte, entonces, en

$$\oint_{C(S)} \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}}$$

Como para campos vectoriales con divergencia nula ($\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$) vale que $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla$, resulta

$$\oint_{C(S)} \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = -\iint_S \frac{\partial}{\partial t} \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} + \oint_{C(S)} \left(\vec{\mathrm{v}} \times \mathbf{B}\right) \cdot d\vec{\mathbf{l}}$$

1) Si el circuito es estacionario y el campo variable en el tiempo, i.e. **B**=**B**(x,y,z,t)

$$\oint_{C(S)} \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = -\iint_S \frac{\partial}{\partial t} \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}}$$

2) Si el circuito se mueve con velocidad ***v*** y el campo es estático **B**=**B**(x,y,z)

$$\oint_{C(S)} \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \oint_{C(S)} \left(\vec{\mathrm{v}} \times \mathbf{B}\right) \cdot d\vec{\mathbf{l}}$$

Ley de Ampere-Maxwell

Para el caso dinámico, Maxwell admitió como válidas a la Ley de Gauss E, i.e. $\nabla \cdot \vec{\mathbf{D}} = \rho_{\mathbf{Libre}}$ y la ausencia de monopolos magnéticos, i.e. $\nabla \cdot \vec{\mathbf{B}} = 0$ (Ley de Gauss M). Además generalizó la Ley de Faraday $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t}$. Sin embargo, no podía aceptar como válida en el caso dinámico la Ley de Ampere $\nabla \times \vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{J}}_{Libre}$. ¿Por qué? Porque así no se cumplía la Ley de conservación de la carga. En efecto, si $\nabla \times \vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{J}}_{Libre} \Rightarrow \nabla \cdot (\nabla \times \vec{\mathbf{H}}) = \nabla \cdot \vec{\mathbf{J}}_{Libre} = 0$ porque la divergencia del rotor es idénticamente nula. Pero $\nabla \cdot \vec{\mathbf{J}}_{Libre}$ no puede ser cero. ¿Por qué? Porque $\vec{\mathbf{J}}_{Libre}$ representa a los portadores de carga en movimiento y, en consecuencia, $\nabla \cdot \vec{\mathbf{J}}_{Libre}$ nos da la idea de la "salida" o "entrada" de cargas en un punto del espacio. Si desde un punto "divergen" corrientes, en ese punto debe disminuir el número de cargas presentes por unidad de tiempo, i.e.
$\nabla \cdot \vec{\mathbf{J}}_{Libre} = -\frac{\partial \rho_{Libre}}{\partial t}$. Lo que es equivalente a $\nabla \cdot \vec{\mathbf{J}}_{Libre} + \frac{\partial \rho_{Libre}}{\partial t} = 0$. A esta ecuación (que corresponde a la conservación de la carga) se la llama ECUACIÓN DE CONTINUIDAD. Como Maxwell considera válida para el caso dinámico la Ley de Gauss

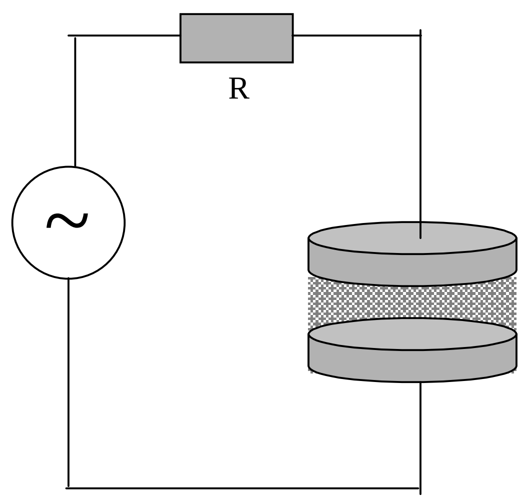
para cargas $\nabla \cdot \vec{\mathbf{D}} = \rho_{Libre}$. Entonces $\dfrac{\partial \rho_{Libre}}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial t}\left(\nabla \cdot \vec{\mathbf{D}}\right) = \nabla \cdot \dfrac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t}$ $\Rightarrow$

$$\nabla \cdot \vec{\mathbf{J}}_{Libre} + \frac{\partial \rho_{Libre}}{\partial t} = 0 = \nabla \cdot \vec{\mathbf{J}}_{Libre} + \nabla \cdot \frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t} = \nabla \cdot (\vec{\mathbf{J}}_{Libre} + \frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t}).$$

Es decir, encontró un vector, $\vec{\mathbf{J}}_{Libre} + \dfrac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t}$, de divergencia nula que respeta la conservación de la carga. Así modifica la Ley de Ampere, agregándole un término adicional y, en consecuencia

$\nabla \times \vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{J}}_{Libre} + \dfrac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t} = \vec{\mathbf{J}}_{Libre} + \vec{\mathbf{J}}_{Desplazamiento} =$ corriente de conducción + corriente de desplazamiento

De esta manera, la Ley de Ampere-Maxwell indica que en todo punto del espacio donde haya corrientes dadas por portadores libres o un campo desplazamiento eléctrico variable en el tiempo, se producirá un campo magnético **H**.

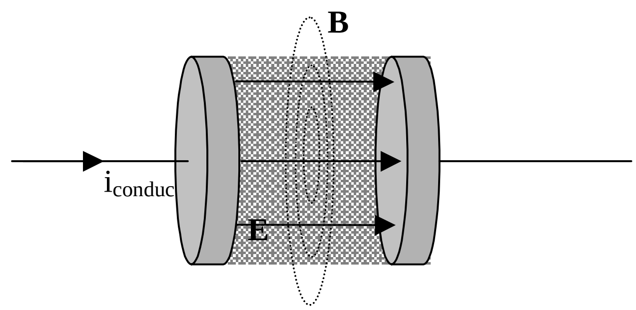


Ejemplo: Pensemos en un circuito RC serie. Supongamos que el espacio entre placas está ocupado por un dieléctrico perfecto. Sabemos que la corriente convencional (la de los electrones libres) no puede fluir por un aislante perfecto. Sin embargo, si la fuente de alimentación es alterna, se mide una corriente. Entonces, ¿qué pasa?

Si existe la corriente de desplazamiento, entre las placas del capacitor debe existir un campo magnético mientras se carga el capacitor, ya que existirá un campo eléctrico variable en el tiempo, y, por lo tanto un vector desplazamiento también variable en el tiempo. Así, dentro del capacitor $\nabla \times \vec{\mathbf{H}} = \dfrac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t} = \vec{\mathbf{J}}_{desplazamiento}$. Suponiendo que el medio es lineal, isótropo y homogéneo $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$. En consecuencia

$$\oint_{C\,(S)} \vec{\mathbf{H}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \frac{1}{\mu} \oint_{C\,(S)} \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \iint_S \frac{\partial \vec{\mathbf{D}}}{\partial t} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \iint_S \vec{\mathbf{J}}_{Desplaz} \cdot d\vec{\mathbf{A}}$$

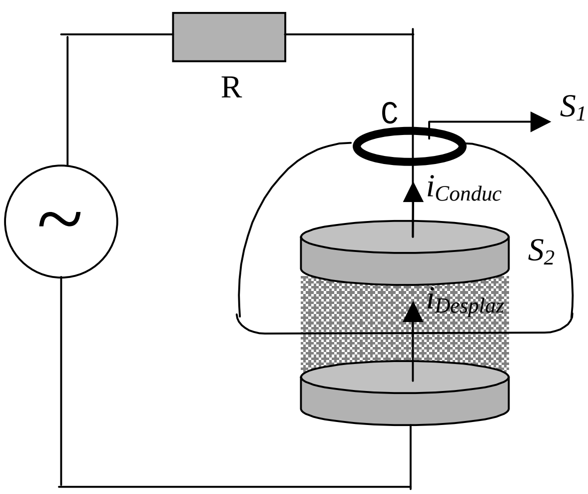
Como las líneas de **B** son cerradas, el capacitor tiene simetría cilíndrica y despreciamos efectos de borde, el campo magnético sólo puede depender de la coordenada radial y sólo tener componente tangencial.En consecuencia, puede considerarse una curva de integración en forma de circunferencia cuyo centro contenga al eje del cilindro y sea perpendicular al mismo, i.e. $d\mathbf{l} = r\, d\varphi\, \breve{\varphi}$, resultando $\vec{\mathbf{B}} = \dfrac{\mu}{2\pi} \pi r J_{Desplaz}\, \breve{\varphi} = \dfrac{\mu}{2\pi} i_{Desplaz} \dfrac{r}{R^2}\, \breve{\varphi}$ siendo R el radio de las placas del capacitor. Resultaría entonces que el campo magnético es cero en el eje y aumenta de manera lineal con la distancia al centro. Fuera del capacitor, la corriente concatenada es toda la corriente de desplazamiento y, en consecuencia, $\vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{Desplaz} \frac{1}{r} \breve{\varphi}$



Como esto se verifica experimentalmente, es correcto pensar que hay corriente de desplazamiento.

Por otra parte, en la zona donde hay corriente de conducción, existe un campo magnético dado por $\vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{Conducc} \frac{1}{r} \breve{\varphi}$.

¿Qué relación hay entre $i_{Desplaz}$ y la $i_{Conducc}$?



$$\oint_{C\,(S)} \vec{\mathbf{H}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \iint_{S_1} \left(\nabla \times \vec{\mathbf{H}}\right) \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \iint_{S_2} \left(\nabla \times \vec{\mathbf{H}}\right) \cdot d\vec{\mathbf{A}}$$

$$\oint_{C\,(S)} \vec{\mathbf{H}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \iint_{S_1} \left(\nabla \times \vec{\mathbf{H}}\right) \cdot d\vec{\mathbf{A}} = i_{Conducc}$$

$$\oint_{C\,(S)} \vec{\mathbf{H}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \iint_{S2} \left(\nabla \times \vec{\mathbf{H}}\right) \cdot d\vec{\mathbf{A}} = i_{Desplaz}$$

En consecuencia $i_C = i_D$. La corriente de conducción es numéricamente igual a la de desplazamiento aunque es conceptualmente diferente. Entre las placas de un capacitor perfecto no hay flujo de cargas sino oscilación del campo eléctrico. Notar que no se trata de cargas ligadas, ya que si el espacio entre placas no contiene ningún material, la corriente de desplazamiento existe.

ON THE ELECTRODYNAMICS OF MOVING BODIES

By A. EINSTEIN

June 30, 1905

It is known that Maxwell's electrodynamics—as usually understood at the present time—when applied to moving bodies, leads to asymmetries which do not appear to be inherent in the phenomena. Take, for example, the reciprocal electrodynamic action of a magnet and a conductor. The observable phenomenon here depends only on the relative motion of the conductor and the magnet, whereas the customary view draws a sharp distinction between the two cases in which either the one or the other of these bodies is in motion. For if the magnet is in motion and the conductor at rest, there arises in the neighbourhood of the magnet an electric field with a certain definite energy, producing a current at the places where parts of the conductor are situated. But if the magnet is stationary and the conductor in motion, no electric field arises in the neighbourhood of the magnet. In the conductor, however, we find an electromotive force, to which in itself there is no corresponding energy, but which gives rise—assuming equality of relative motion in the two cases discussed—to electric currents of the same path and intensity as those produced by the electric forces in the former case.

Examples of this sort, together with the unsuccessful attempts to discover any motion of the earth relatively to the "light medium," suggest that the phenomena of electrodynamics as well as of mechanics possess no properties corresponding to the idea of absolute rest. They suggest rather that, as has already been shown to the first order of small quantities, the same laws of electrodynamics and optics will be valid for all frames of reference for which the equations of mechanics hold good.[1] We will raise this conjecture (the purport of which will hereafter be called the "Principle of Relativity") to the status of a postulate, and also introduce another postulate, which is only apparently irreconcilable with the former, namely, that light is always propagated in empty space with a definite velocity c which is independent of the state of motion of the emitting body. These two postulates suffice for the attainment of a simple and consistent theory of the electrodynamics of moving bodies based on Maxwell's theory for stationary bodies. The introduction of a "luminiferous ether" will prove to be superfluous inasmuch as the view here to be developed will not require an "absolutely stationary space" provided with special properties, nor

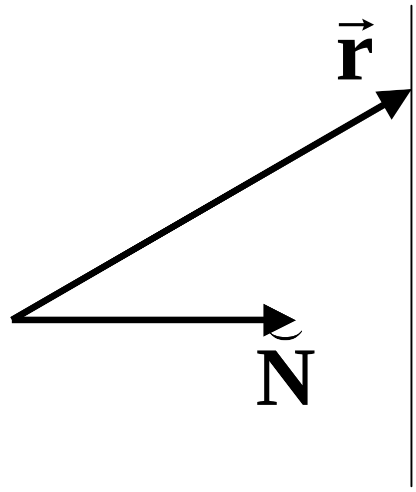
[1] The preceding memoir by Lorentz was not at this time known to the author.

Apéndice III: Solución de la ecuación de ondas

Cada componente de $\vec{\mathbf{E}}$ y de $\vec{\mathbf{H}}$ cumple:

$$\boxed{\nabla^2 V - \frac{1}{u^2}\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = 0}$$

¿Es solución una onda plana: $V = V_1(\breve{\mathbf{N}}\cdot\vec{\mathbf{r}} - ut) + V_2(\breve{\mathbf{N}}\cdot\vec{\mathbf{r}} + ut)$ con $\breve{\mathbf{N}} = N_x\breve{i} + N_y\breve{j} + N_z\breve{k}$ y $\vec{\mathbf{r}} = x\,\breve{i} + y\,\breve{j} + z\,\breve{k}$?



$V \equiv V_1(\breve{\mathbf{N}}\cdot\vec{\mathbf{r}} - ut) \equiv V(\varphi)$

Reemplazando en las Ecuaciones de Maxwell

$$\boxed{\vec{\mathbf{E}} = \vec{\mathbf{E}}(\varphi)\,;\vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{H}}(\varphi) \Rightarrow \begin{array}{l} \dfrac{\partial\vec{\mathbf{E}}}{\partial t} = \dfrac{\partial\vec{\mathbf{E}}}{\partial\varphi}\dfrac{\partial\varphi}{\partial t} = -u\dfrac{d\vec{\mathbf{E}}}{d\varphi} \\ \dfrac{\partial\vec{\mathbf{H}}}{\partial t} = \dfrac{\partial\vec{\mathbf{H}}}{\partial\varphi}\dfrac{\partial\varphi}{\partial t} = -u\dfrac{d\vec{\mathbf{H}}}{d\varphi} \end{array}}$$

$$\boxed{\vec{\nabla}\times\vec{\mathbf{E}} = \begin{vmatrix} \breve{i} & \breve{j} & \breve{k} \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \breve{i} & \breve{j} & \breve{k} \\ \dfrac{\partial\varphi}{\partial x} & \dfrac{\partial\varphi}{\partial y} & \dfrac{\partial\varphi}{\partial z} \\ \dfrac{\partial E_x}{\partial\varphi} & \dfrac{\partial E_y}{\partial\varphi} & \dfrac{\partial E_z}{\partial\varphi} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \breve{i} & \breve{j} & \breve{k} \\ N_x & N_y & N_z \\ \dfrac{\partial E_x}{\partial\varphi} & \dfrac{\partial E_y}{\partial\varphi} & \dfrac{\partial E_z}{\partial\varphi} \end{vmatrix} = \breve{\mathbf{N}}\times\frac{d\vec{\mathbf{E}}}{d\varphi}}$$

$$\boxed{\vec{\nabla}\times\vec{\mathbf{E}} = \breve{\mathbf{N}}\times\frac{d\vec{\mathbf{E}}}{d\varphi}} \qquad \boxed{\vec{\nabla}\times\vec{\mathbf{H}} = \breve{\mathbf{N}}\times\frac{d\vec{\mathbf{H}}}{d\varphi}}$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{\mathbf{H}} = \frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = \frac{\partial H_x}{\partial\varphi}\frac{\partial\varphi}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial\varphi}\frac{\partial\varphi}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial\varphi}\frac{\partial\varphi}{\partial z} = \breve{\mathbf{N}}\cdot\frac{d\vec{\mathbf{H}}}{d\varphi}$$

$$\Rightarrow \vec{\nabla}\cdot\vec{\mathbf{H}} = \breve{\mathbf{N}}\cdot\frac{d\vec{\mathbf{H}}}{d\varphi} \qquad \vec{\nabla}\cdot\vec{\mathbf{E}} = \breve{\mathbf{N}}\cdot\frac{d\vec{\mathbf{E}}}{d\varphi}$$

$$\boxed{\breve{\mathbf{N}}\times\frac{d\vec{\mathbf{E}}}{d\varphi} = \mu\,u\,\frac{d\vec{\mathbf{H}}}{d\varphi}} \qquad \boxed{\breve{\mathbf{N}}\times\frac{d\vec{\mathbf{H}}}{d\varphi} = -\varepsilon\,u\,\frac{d\vec{\mathbf{E}}}{d\varphi}}$$

$$\boxed{\breve{\mathbf{N}}\cdot\frac{d\vec{\mathbf{H}}}{d\varphi} = 0} \qquad \boxed{\breve{\mathbf{N}}\cdot\frac{d\vec{\mathbf{E}}}{d\varphi} = 0}$$

Integrando respecto a φ para $\breve{\mathbf{N}} = $ constante

$$\boxed{\left.\begin{array}{cc} \breve{\mathbf{N}}\times\vec{\mathbf{E}} = \mu\, u\, \vec{\mathbf{H}} & \breve{\mathbf{N}}\times\vec{\mathbf{H}} = -\varepsilon\, u\, \vec{\mathbf{E}} \\ \breve{\mathbf{N}}\cdot\vec{\mathbf{E}} = 0 & \breve{\mathbf{N}}\cdot\vec{\mathbf{H}} = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \textbf{Ondas transversales}}$$

Como $u = {1}/{\sqrt{\mu\varepsilon}}$ y $\left|\breve{\mathbf{N}}\times\vec{\mathbf{E}}\right| = \left|\vec{\mathbf{E}}\right| = \mu\, u \left|\vec{\mathbf{H}}\right| = \mu \dfrac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}\left|\vec{\mathbf{H}}\right| = \sqrt{\dfrac{\mu}{\varepsilon}}\left|\vec{\mathbf{H}}\right|$

$$\boxed{\sqrt{\varepsilon}\left|\vec{\mathbf{E}}\right| = \sqrt{\mu}\left|\vec{\mathbf{H}}\right|}$$

Como la luz tiene el carácter de onda armónica:

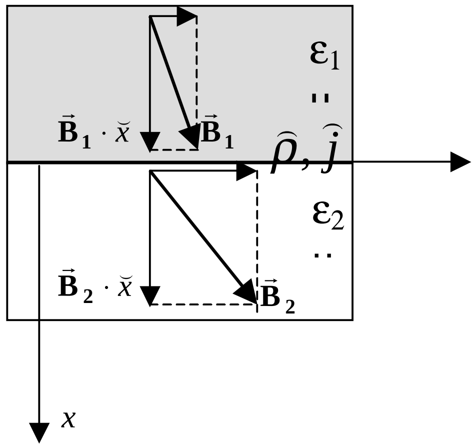
$$\boxed{\vec{\mathbf{E}} = \vec{\mathbf{A}}\, sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}\left(\breve{\mathbf{N}}\cdot\vec{\mathbf{r}} - ut\right)\right]}$$

CONDICIONES DE CONTORNO SOBRE UNA SUPERFICIE DE DISCONTINUIDAD O INTERFAZ

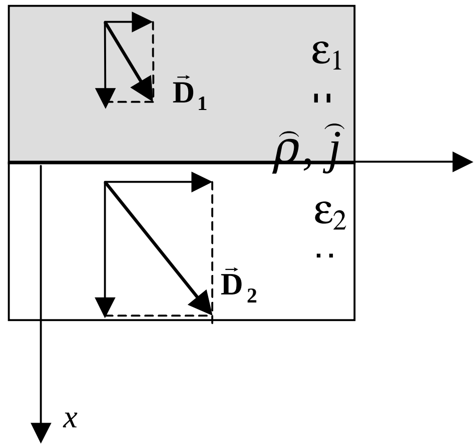
A partir de las ecuaciones de Maxwell, aplicadas a ambos lados de una interfaz de forma y características arbitrarias se obtiene:

1. La componente normal del vector inducción magnética es continua a través de una superficie de discontinuidad.
2. En presencia de una capa con densidad superficial de carga $\widehat{\rho}_{superficial}$, la componente normal del desplazamiento eléctrico cambia abruptamente a través de la superficie, en una cantidad igual a $\widehat{\rho}_{superficial}$.
3. La componente tangencial del vector campo eléctrico es continua a través de la superficie.
4. En presencia de una densidad superficial de corriente $\widehat{j}_{superficial}$, la componente tangencial del vector campo magnético cambia abruptamente, en una cantidad igual a $\widehat{j}_{superficial}$.

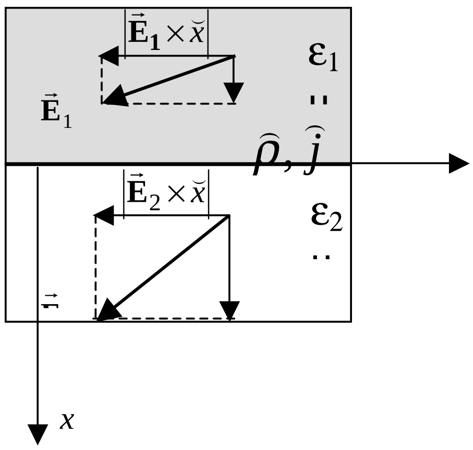
$$\vec{\mathbf{B}}_1 \cdot \breve{x} = \vec{\mathbf{B}}_2 \cdot \breve{x}$$



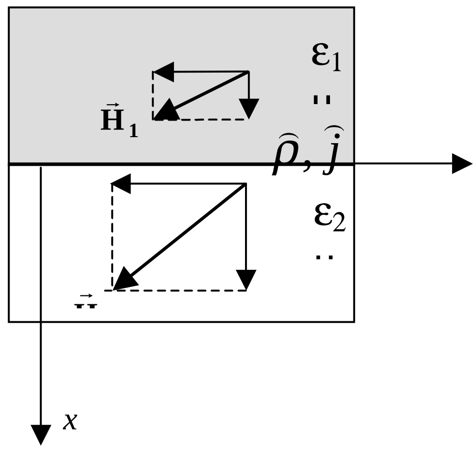
$$\vec{\mathbf{D}}_2 \cdot \breve{x} - \vec{\mathbf{D}}_1 \cdot \breve{x} = \widehat{\rho}_{superficial}$$



$$\vec{\mathbf{E}}_1 \times \breve{x} = \vec{\mathbf{E}}_2 \times \breve{x}$$



$$\vec{\mathbf{H}}_2 \times \breve{x} - \vec{\mathbf{H}}_1 \times \breve{x} = \widehat{j}_{superficial}$$



Apéndice IV: Concepción sobre la naturaleza de la luz desde la antigüedad hasta Maxwell

La imagen del ojo como farol era un lugar común en tiempos pasados. La luz del sol desempeñaba un papel secundario en el misterio de la vista. El fulgor de los ojos de los gatos y su capacidad para moverse de noche convencieron a los primeros ópticos de la realidad del fuego visual.

EMPEDOCLES (492-435 a.c.) reconocía la existencia de la luz solar; pero consideraba que la luz era sólo una parte del proceso, y reconocía que algo más se requería para la visión.

PLATON (427-347 a.c.) completó la explicación de Empédocles (aunque era similar): el fuego del ojo hace que éste emita una luz suave. Esta luz se fusiona con la diurna (lo semejante con lo semejante), formando así un cuerpo único de luz. Es decir, dos luces se unen y actúan como mediadoras entre el hombre y el mundo externo. I.e. el ojo de la mente no es pasivo, sino que desempeña un papel importante en el acto de ver.

EUCLIDES (325-¿ a.c.) En su libro "Óptica" presenta un tratado geométrico brillante sobre la vista. Creía que un ***rayo visual*** era esencial para la visión y propuso argumentos a favor de esta posición. Por ejemplo, a menudo no vemos las cosas aun cuando las miramos. Si se nos cae una aguja, no la vemos de inmediato aunque nuestro campo visual incluya la aguja. Si la visión dependiera sólo de una luz externa que viajara a los ojos, la veríamos de inmediato. Evidentemente la luz se reflejaba en la aguja y viaja al ojo mientras la buscamos. Entonces la visión no depende sólo de la luz externa. Sin embargo, si consideramos el rayo visual, al buscar la aguja, el rayo visual del ojo barre el suelo y vemos la aguja cuando el rayo la alcanza. El rayo de Euclides presenta importantes diferencias con la etérea y luminosa emanación de Empédocles y Platón.

ARISTÓTELES (384-322 a.c.) Pero, si el ojo alberga una fuente luminosa, por qué no vemos de noche? Aristóteles sostenía que el aire oscuro es opaco. Si encendemos una lámpara se vuelve transparente (como el cristal líquido de las pantallas). El fuego puede cambiar el estado del aire de transparente en potencia a transparente en acto. Entonces nosotros, con nuestros ojos activos, vemos a través de la habitación. Para Aristóteles la luz no era una cosa sino un estado en que se hallaba un medio. La luz no tenía sustancia ni estructura. Esta concepción no cambiará hasta el S. XVII

Pero había otra escuela griega. **DEMÓCRITO** (470-380 a.c.) sostenía que no existía otra cosa que átomos y vacío. Otros seguidores fueron **EPICURO, CICERON** y

LUCRECIO. La luz era una granizada de partículas. Las imágenes se desprendían de los objetos o los objetos las desprendían y se precipitaban al ojo para entrar (por eso se veía en la pupila).

Hacia el final del Imperio Romano se cerró la Academia platónica (529 d.c.) sede del pensamiento pagano y herejes. Los siete sabios dela academia de Atenas huyeron a Irán. En el S.VI era el mayor centro cultural del mundo: observatorio astronómico, escuela de medicina y el primer hospital del mundo.

ALHAZEN (Basora, 965 d.c.) En el S.IX Bagdad se convirtió en un gran centro cultural. El filósofo, matemático, astrónomo y óptico alejó más la historia de la vista de lo espiritual. En el 1040 su obra se tradujo al latín y se convirtió en el fundamento de los futuros estudios de Óptica: reemplazó la teoría platónica de la luz y estudió la cámara oscura. El enfoque de la visión enfatizaba la luz externa a tal punto que elaboró una serie de argumentos para respaldar la idea de que la vista derivaba totalmente de la luz que entraba a los ojos (mirar mucho al sol, duele; mirar una luz y cerrar los ojos da el mismo contorno con otros colores y más difuminados). Los rayos eran útiles para el estudio geométrico de la luz.

LEONARDO DA VINCI (1452-1519) Sugirió que el ojo era una cámara oscura donde se proyecta la imagen del mundo

KEPLER (1571-1630) Desarrolló una explicación geométrica de la cámara oscura y una explicación del ojo y de la visión. El problema de la imagen invertida lo dejó para otro.

GALILEO (1564-1642) No dio una explicación tajante sobre la naturaleza de la luz, pero para él la luz no era Dios sino un cuerpo.(distorsiones en el sol, planetas con el telescopio: no vio ángeles ni perfección). En 1611 Galileo llevó piedras fosforescentes (esponja solar): luz fría. Según Aristóteles, el fuego volvía transparente el aire pero no una piedra fría. Entonces, quizá la luz fuera como el calor una acción corpuscular y mecánica. La luz puede ser un cuerpo como los demás.

DESCARTES (1596-1650) Hizo la verificación experimental de los estudios de Kepler. Así el rayo interior se extinguió. Por otra parte propuso una filosofía del universo: “Las reglas de la naturaleza son las reglas de la mecánica”. Su concepción de la luz es la siguiente:

El espacio es inconcebible aparte de la materia. Donde hay espacio, hay materia (comparación con la uva triturada y el jugo). El espacio está lleno de un *plenum* concebido de manera atomista, un fluido material que ocupa todos los vacíos e impulsa a los planetas en su trayecto. Entre el ojo y el objeto hay una columna de *plenum* a lo largo del cual puede viajar una acción (velocidad infinita). La luz no es un proyectil ni un fluid, sino una tendencia al movimiento en el *plenum*. I.e. el objeto afecta el *plenum* circundante, causando una conmoción en el ojo y así vemos. La vista y la luz son mecanismo.

HUYGENS (1629-1695) Consideraba que la luz era una onda, una vibración pura que se propagaba por una sustancia más sutil que el aire pero de gran rigidez.

NEWTON (1642-1727): la fama de Newton comenzó con un telescopio (reflector). En 1665, durante la peste, inventó el cálculo, la teoría de la gravedad, la dinámica planetaria, la teoría de la luz y la del color. Para él la unidad fundamental de la luz es el **rayo**, que corresponde a una teoría corpuscular de la luz: los componentes mínimos o rayos eran formales (construcciones ópticas). Los rayos de luz llegan desde el sol y hay distintas clases de rayos (colores) que sumados dan la luz natural. Y se preguntaba: "¿No son los rayos de luz pequeñísimos cuerpos emitidos desde sustancias brillantes?". Los más pequeños azules y los más grandes rojos. (ver Descartes). La luz era un cuerpo y las leyes de movimiento eran las mismas que las de las manzanas y los planetas. El cosmos estaba unificado: las fuerzas de atracción y repulsión atraían e impulsaban proyectiles de luz, sino viajarían en línea recta siguiendo la ley de inercia. La Óptica de Newton se aceptó acríticamente en Universidades, la difundió con conferencias en los clubes científicos y hubo versiones populares escritas por literatos (Voltaire: "Elementos de la filosofía de Newton")

Como críticas a la teoría corpuscular: 1) si dos personas se miran, las partículas deben seguir la misma trayectoria en dirección contraria

2) Si el sol irradiara gran cantidad de partículas, se consumiría

3) ¿Cómo pasan tantos corpúsculos por el agujero dela cámara oscura sin afectar la imagen?

La respuesta era: son muy pequeñas y eficientes. Entonces deberían ser muchísimos pórquese derretía una lámina de cobre en el foco de un reflector de medio metro.

La teoría cartesiana eludía muchas dificultades. Es la simiente de la teoría ondulatoria

Pero ambas teorías tenían una concepción material.

EULER (1707-1783) "Los rayos de luz solar son respecto del éter lo que el sonido es respecto del aire" Los objetos luminosos "vibran" y el éter lleva esas vibraciones al ojo como el aire lleva el sonido al oído. Argumentó en contra de la teoría de Newton, pero no pudo explicar la difracción (Grimaldi, 1665) (DAR EJEMPLOS). Sus libros fueron leídos por Lagrange, Laplace, Gauss, Poisson y Fourier (los primeros físicos-matemáticos) y comenzó la aplicación del análisis matemático moderno a la naturaleza

YOUNG (1773-1829) A la teoría de Euler le sumó que las ondulaciones del éter se pueden reforzar o debilitar al punto de la extinción mediante una interferencia similar a las de las ondas de agua: Ppio de Interferencia

FRESNEL (1788-1827) (Ingeniero Civil) Otro de los problemas era la polarización., que parecía favorecer la teoría corpuscular. En 1819 en la Academia de Ciencias de París se reunieron los más grandes físico-matemáticos de la época (partidarios en su mayoría de la teoría corpuscular) para juzgar cuál era el mejor enfoque científico sobre la difracción. Fresnel, mediante un refinado uso del principio de interferencia y deslumbrante aplicación del cálculo realizó nuevas predicciones. Pero no hizo experiencias ni ejemplos concretos. Poisson procedió a resolver una de sus engorrosas ecuaciones y llegó a un aparente absurdo: predecía un punto de luz directamente detrás de un pequeño obstáculo opaco. Arago realizó una experiencia y obtuvo lo que Fresnel había predicho con su teoría. Poisson, sin quererlo, sepultó la teoría corpuscular de Newton.

Otro de los problemas era la **polarización** (resplandor y polaroides). La experiencia era la siguiente: se pasaba luz por un cristal llamado espato de Islandia y luego por otro. Para cierta orientación relativa ninguna luz pasa por el segundo. Los teóricos corpusculares habían sugerido que las partículas de luz, al pasar por el primer cristal, eran seleccionadas de acuerdo a su forma. Si el segundo cristal estaba alineado de la misma manera la luz lo atravesaba. Si no, no. Sería como insertar una clavija cuadrada en un cuadrado. Para los ondulatorios el problema fundamental era que el sonido no presentaba efectos de polarización. Fresnel sugirió entonces que la luz era ***transversal*** a la dirección de propagación.

Cuando en Inglaterra se conocieron los trabajos de Fresnel, se comenzaron a utilizar sus ideas (1820-1835).

FARADAY (1791-1867) Dadas sus convicciones religiosas, Faraday era propenso a creer en la unidad de la naturaleza: lo aparentemente disímil es en realidad lo mismo. Conociendo la obra de Fresnel, pensó que tal vez se podrían vincular no sólo luz y sonido, sino también efectos eléctricos. En la inducción electromagnética entre dos circuitos sugirió que una onda de electricidades causada por cambios súbitos en la corriente del primario. Esta onda viaja en el espacio e induce una perturbación similar en el secundario. Durante casi 30 años se dedicó a realizar estudios experimentales para saber qué era esa onda eléctrica que puede conectar circuitos distantes sin conexión. Su primer ataque a las teorías vigentes consistió en considerar que los átomos eran aglomeraciones, eran ***centro de fuerzas***.Así el *plenum* de Descartes era un mar de fuerzas. Los átomos son intersecciones de miles de líneas de fuerza que atraviesan el Universo. Reemplazando a Wheastone inesperadamente en una conferencia, habló sobre sus PENSAMIENTOS SOBRE VIBRACIONES DE LOS RAYOS : las vibraciones llamadas luz descritas por Fresnel no eran vibraciones del éter sino movimientos de líneas físicas de fuerza. Pensar que algo tan insustancial como las líneas de fuerza constituían el fundamento ontológico del mundo resultaba absurdo para la imaginación materialista.

MAXWELL (1831-1879) Tradujo al lenguaje matemático las ideas de Faraday. En la "Teoría dinámica del campo electromagnético" (1864) Maxwell vislumbra la nueva estructura para la descripción de la realidad. Todos los efectos eléctricos y magnéticos se pueden explicar así con elegancia. Pero al final del trabajo habla sobre la luz:ecuación análoga a la de Euler para ondas sonoras.

"La concordancia de los resultados parece demostrar que la luz, la electricidad y el magnetismo son manifestaciones de la misma sustancia: la luz es una perturbación electromagnética que se propaga por el campo siguiendo leyes electromagnéticas"

J. C. Maxwell

Referencias

Maxwell J.C., "A Treatise on Electricity and Magnetism" Dover Publications Inc. Part IV, Chapter XXI, 1954 (republicación inalterada de la versión de 1891)

Zajonc, A., "Atrapando la luz" Ed. Andrés Bello, 1994

Begbie, G. H., "La visión y el ojo" EUDEBA Colección Ciencia Joven (1977)

De Broglie, L., "Materia y luz" Espasa Calpe, 1939

Galilei, G., "Dialogues Concerning Two New Sciences" (traducida al inglés por H. Crew y A. de Salvio) Dover Publications, Inc., New York