

Ondas Electromagnéticas

Dualidad onda-partícula de la luz

Comportamiento cuántico de la luz

Aplicaciones

Bibliografía



Ondas Electromagnéticas

Corriente de desplazamiento y Ley de Ampère-Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell y los descubrimientos de Hertz

Ondas planas electromagnéticas

Espectro de las ondas electromagnéticas

Dualidad onda-partícula de la luz

Comportamiento cuántico de la luz

Aplicaciones

Bibliografía



Ondas Electromagnéticas



[Corriente de desplazamiento y Ley de Ampère-Maxwell]

Ampère relacionó la corriente eléctrica con el campo magnético constante que genera:

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \mu_0 I \quad (1)$$

Maxwell modificó la ley sumando al lado derecho una *corriente de desplazamiento*, $I_d \equiv \epsilon_0 d\Phi_E/dt$. Donde $\Phi_E = \int \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}}$ es el flujo del campo eléctrico asociado a la corriente.

La ley de Ampère ahora se convierte en la ley de **Ampère-Maxwell**

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (2)$$



Interpretación de la corriente de desplazamiento

- ▶ La corriente I_d que un campo magnético no solo es inducido por una corriente eléctrica, sino también por un campo eléctrico dependiente del tiempo.
- ▶ La corriente I_d entre dos placas de un capacitor se comporta justo como el flujo de cargas a través del circuito.

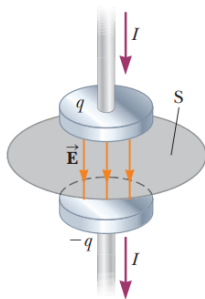


Figura: Flujo de campo eléctrico a través de la superficie S entre las placas de un capacitor.



[Las ecuaciones de Maxwell y los descubrimientos de Hertz]

Las ecuaciones que llevan el nombre de **James Clerk Maxwell** son uno de los resultados de la Física Teórica más relevantes de la historia.

$$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (3)$$

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = 0 \quad (4)$$

$$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (5)$$

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (6)$$

Las ecuaciones 3 a 6 representan las leyes que rigen los fenómenos de la electricidad y el magnetismo.



[Las ecuaciones de Maxwell y los descubrimientos de Hertz]

Significado de las Ecuaciones de Maxwell

Ley de...	Ecuación	Significado
Gauss Eléctrica	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$	El flujo eléctrico neto a través de una superficie cerrada es proporcional a la carga encerrada.
Gauss Magnética	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$	El flujo magnético neto a través de una superficie cerrada es nulo.
Faraday	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	Un campo magnético variable en el tiempo crea un campo eléctrico en su proximidad.
Ampère-Maxwell	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$	Un campo eléctrico variable en el tiempo crea un campo magnético en su proximidad.

Cuadro: Leyes de Maxwell junto con su interpretación física.



[Las ecuaciones de Maxwell y los descubrimientos de Hertz]

La **Ley de Fuerza de Lorentz** nos permite encontrar la fuerza que experimenta una partícula cargada debido a un campo electromagnético en un punto \vec{r} :

$$\boxed{\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}} \quad (7)$$

Las ecuaciones del cuadro 1 y la ecuación 7 describen totalmente el comportamiento de las **interacciones electromagnéticas clásicas en el vacío**.



[Las ecuaciones de Maxwell y los descubrimientos de Hertz]



(a) James C. Maxwell (b) Heinrich R. Hertz

Maxwell predijo que la luz es una onda electromagnética que se propaga a una rapidez igual a $(\mu_0\epsilon_0)^{-1/2}$. **Heinrich Rudolf Hertz** demostró con experimentos las predicciones teóricas de Maxwell.



Naturaleza de las ondas electromagnéticas



[Ecuaciones de onda del campo electromagnético]

Los campos eléctrico y magnético presentan ecuaciones de onda donde la rapidez de propagación de la onda está dada por $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = 2.99792 \times 10^8 ms^{-1}$.

•Ecuación de onda de \vec{E} :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (8)$$

•Ecuación de onda de \vec{B} :

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (9)$$



[Solución a las ecuaciones de onda electromagnéticas]

Una solución simple de 8 y 9 son ondas sinusoidales.

• Solución para \vec{E} :

$$E = E_{max} \cos(kx - \omega t) \quad (10)$$

• Solución para \vec{B} :

$$B = B_{max} \cos(kx - \omega t) \quad (11)$$

Con E_{max} y B_{max} los máximos valores que puede alcanzar la magnitud de los campos. El *número de onda angular* es $k = 2\pi/\lambda$, con λ la longitud de onda. La *frecuencia angular* es $\omega = 2\pi f$, con f la frecuencia de la onda. Se sigue que $\omega/k = c$.



Densidades de energía

Las ondas electromagnéticas transportan energía, como cualquier otro tipo de onda. Los campos electromagnéticos presentan **densidades de energía** por unidad de volumen u_E y u_B dadas por

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (12)$$

$$u_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (13)$$

para E y B , respectivamente.



El vector de Poynting

La tasa de transferencia de energía es dictada por el **vector de Poynting** \vec{S} dado como

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (14)$$

Las unidades de \vec{S} son de *potencia por unidad de área*, i.e., Wm^{-2} . Su dirección coincide con el sentido de propagación de la onda.



[Energía de las ondas electromagnéticas]

No es difícil demostrar que, en ondas electromagnéticas planas, para cualquier instante t la razón entre E y B es una constante, particularmente

$$\frac{E_{max}}{B_{max}} = \frac{E}{B} = c \quad (15)$$

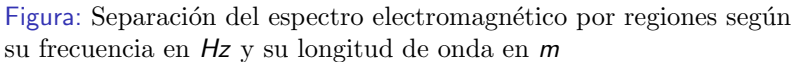
Con c la rapidez de la luz en el vacío. En consecuencia (para el mismo tipo de ondas) se nota que

$$S = \frac{EB}{\mu_0} = \frac{E^2}{\mu_0 c} = \frac{cB^2}{\mu_0} \quad (16)$$

Las ecuaciones 16 dictan la tasa *instantánea* a la que la energía fluye por un área unitaria, siendo E y B instantáneos.



Representación gráfica del espectro electromagnético



Clasificación de las ondas electromagnéticas

Caracterizamos la radiación electromagnética por su longitud de onda o su frecuencia.

- ▶ **Ondas de radio:** su longitud de onda va de 10^4 m hasta 0.1 m . *Son producidas por corrientes eléctricas en conductores y se emplean en sistemas de comunicación.*
- ▶ **Microondas:** su longitud de onda está en el rango de 0.3 m a 10^{-4} m . *Se utilizan para explorar las propiedades atómicas y moleculares de la materia.*
- ▶ **Infrarrojos:** su longitud de onda yace en el intervalo de 10^{-3} m a $7 \times 10^{-7} \text{ m}$. *Son producidas por objetos a temperatura ambiente y son fácilmente absorbidas por la mayoría de sustancias.*



[Espectro de las ondas electromagnéticas]

- ▶ **Luz visible:** *las diferentes longitudes de onda se manifiestan como luz de distintos colores. Comprende un intervalo de longitudes de onda de $7 \times 10^{-7} \text{ m}$ a $4 \times 10^{-7} \text{ m}$.*
- ▶ **Ultravioleta:** *su longitud de onda va desde $4 \times 10^{-7} \text{ m}$ hasta $6 \times 10^{-10} \text{ m}$. El Sol es una fuente importante de este tipo de radiación y es de interés médico.*
- ▶ **Rayos X:** *su longitud de onda comprende valores entre 10^{-8} m y 10^{-12} m . Se producen por un flujo de electrones muy energéticos golpeando un objetivo metálico. Tienen usos clínicos, pero también se emplean en estudios moleculares y atómicos.*
- ▶ **Rayos γ :** *se originan como productos de desintegración nuclear. Sus longitudes de onda están entre 10^{-10} m y 10^{-14} m o menos.*



Ondas Electromagnéticas

Dualidad onda-partícula de la luz

El debate sobre la naturaleza de la luz

Comportamiento cuántico de la luz

Aplicaciones

Bibliografía



Dualidad onda-partícula de la luz



Durante los tiempos de Newton era bien aceptado que la luz consistía en una corriente de *corpúsculos*, pero los intentos por determinar su rapidez llevaron a los científicos a considerar un modelo ondulatorio.

No obstante, los fenómenos de absorción y emisión no pueden explicarse satisfactoriamente con el modelo ondulatorio. En consecuencia, el modelo corpuscular fue recuperado en 1905 mediante el concepto de *fotones*.

A partir de 1930, con la formulación de la *electrodinámica cuántica* se pudo explicar ambos aspectos de la luz de forma integral.



Ondas Electromagnéticas

Dualidad onda-partícula de la luz

Comportamiento cuántico de la luz

- Radiación de cuerpo negro

- Efecto fotoeléctrico

- Efecto Compton

Aplicaciones

Bibliografía



Definición de cuerpo negro y su radiación

Todos los objetos emiten radiación térmica desde su superficie. Dicha puede manifestarse como luz visible cuya coloración dependerá de la temperatura de la superficie del objeto.

Un *cuerpo negro* es un sistema que absorbe toda la radiación incidente en él. Al irradiar sobre su entorno, el sistema se encuentra en equilibrio térmico. Dicha radiación recibe el nombre de *radiación de cuerpo negro*.

El agujero que conduce a un objeto hueco actúa bastante parecido a un cuerpo negro. La naturaleza de la radiación que emana del hueco depende solo de la temperatura en las paredes de la cavidad, no del material del objeto.



[Resultados experimentales importantes]

Estos resultados sobre la radiación de cuerpo negro son importantes:

1. La potencia de la radiación emitida crece con la temperatura:

$$P = \sigma A e T^4 \quad (17)$$

P es la potencia, $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ es la constante de *Stefan-Boltzmann*, A es el área superficial del objeto, e es la emisividad del objeto y T es su temperatura.



La ley de **Rayleigh-Jeans**, ecuación 19, fue uno de los primeros intentos por modelar la curva de *intensidad vs longitud de onda* de la radiación emitida por un cuerpo negro.

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi ck_B T}{\lambda^4} \quad (19)$$

Esta ecuación, sin embargo, solo recupera los datos experimentales para longitudes de onda grandes.



En 1900 *Max Planck* desarrolló una teoría para la radiación de cuerpo negro que concluyó con una función de $I(\lambda, T)$ consistente con los experimentos. Su teoría parte de las siguientes afirmaciones:

- I La radiación proviene de osciladores atómicos en las paredes de la cavidad.
- II La energía de un oscilador solo puede tener múltiplos enteros de hf , esto es, $E_n = nhf$.
- III Cada valor de n de las energías E_n corresponde con un *estado cuántico*.
- IV Los osciladores absorben o emiten energía al transicionar entre estados cuánticos.



[Modelos de radiación de cuerpo negro]

La idea de Planck se conoció como *cuantización de la energía*. Su expresión teórica para $I(\lambda, T)$ es la siguiente

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\text{Exp}(hc/\lambda k_B T) - 1]} \quad (20)$$

El parámetro h es conocido como la *constante de Planck* y su valor fue ajustado por Planck para que la ecuación 20 coincidiera con los experimentos.

El valor de h es independiente de la identidad de la sustancia y su valor es de $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.



El efecto fotoeléctrico fue descubierto por Hertz y consiste en la eyección de electrones desde una superficie (no necesariamente metálica) debido a la incidencia de luz en ella.

Contrario a lo predicho por la teoría ondulatoria de la luz, la energía de los *fotoelectrones*¹ **no** depende de la intensidad luminosa.

La energía de los fotones incidentes es una función de la *frecuencia* de la onda electromagnética asociada al haz de luz.

$$E = hf$$

(21)

Esta explicación se debió a Einstein, quien la motivó en el trabajo de Planck sobre cuantización de la energía en la *radiación de cuerpo negro* .



¹Electrones emitidos por efecto fotoeléctrico

[Efecto fotoeléctrico: física clásica vs física moderna]

Característica	Predicción Clásica	Resultado Experimental
Energía cinética dependiente de la intensidad luminosa	Los fotoelectrones presentarán mayor energía cinética con el aumento de intensidad luminosa	La intensidad luminosa no determina el comportamiento de los fotoelectrones
Defecto de tiempo entre incidencia y eyección	A baja intensidad el tiempo entre incidencia y eyección es observable y sirve para que el electrón absorba energía	Los electrones son emitidos casi de forma instantánea



[Efecto fotoeléctrico: física clásica vs física moderna]

Característica	Predicción Clásica	Resultado Experimental
Dependencia de la eyección de los electrones sobre la frecuencia de la luz	Habrán fotoelectrones a cualquier frecuencia si la intensidad es suficientemente alta	Ningún electrón se eyectará si la frecuencia es menor que la <i>frecuencia de corte</i> característica
Dependencia de la energía cinética de los fotoelectrones en la frecuencia de la luz	No existe una relación entre esas variables. La energía depende de la intensidad.	La energía cinética máxima crece con la frecuencia



En 1905 **Albert Einstein** explicó el efecto fotoeléctrico elevando la idea de *cuantos* de Planck de un arreglo matemático a un objeto físico.

Afirmó que la radiación electromagnética es transportada por partículas, bautizados como *fotones*, cuya energía es 21:

$$E = hf$$

y viajan a una rapidez $c = 2.99792 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

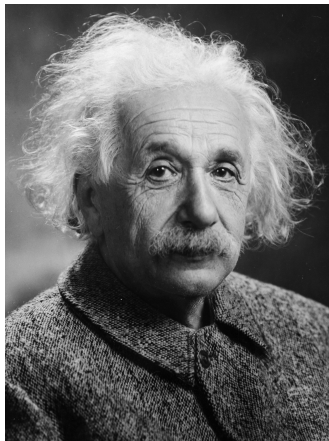


Figura: Retrato de A. Einstein



[Condiciones para el efecto fotoeléctrico]

La frecuencia f de los fotones debe estar por encima de cierto valor de corte impuesto por la *función de trabajo* ϕ del material objetivo.

La función de trabajo representa la energía mínima que mantiene al electrón unido al átomo. Suele ser de unos pocos *electronvoltios*.

La energía cinética máxima de un fotoelectrón, según la teoría de Einstein, es:

$$K_{max} = hf - \phi \quad (22)$$



[Condiciones para efecto fotoeléctrico]

La teoría predice una relación entre la *frecuencia de corte* y la función de trabajo, $f_c = \phi/h$ que implica la siguiente

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{c}{\phi/h} = \frac{hc}{\phi} \quad (23)$$

Longitudes de onda inferiores a la longitud de onda de corte para una función de trabajo ϕ no provocarán fotoelectrones.



Efecto Compton

Dentro de la teoría de Einstein, los fotones no solo transportan energía pero *momento lineal* también, siendo este

$$p = E/c = hf/c \quad (24)$$

Arthur Holly Compton y Peter Debye llevaron la idea más lejos tratando los fotones como partículas puntuales con energía hf y momento hf/c .

Tal modelo les permitió analizar procesos de colisiones (o dispersión) cuya explicación clásica en el contexto de la luz ondulatoria era inconsistente con los experimentos.



[Ecuación de corrimiento de Compton]

Compton y su colaborador notaron una dispersión inusual de rayos X al interactuar con electrones.

Tal interacción se observó como un pico de intensidad en la radiación incidente. Este se corresponde con un valor λ' de longitud de onda mayor que la longitud de onda inicial λ_0 de la radiación.

La relación entre el defecto de longitudes de onda y el ángulo de dispersión θ de la radiación es conocida como *ecuación de corrimiento de Compton*:

$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta))$$

(25)



[Corrimiento de Compton: parte a parte]

En la ecuación 25

$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta))$$

distinguimos varios parámetros:

1. λ' : longitud de onda de un pico desplazado causado por la dispersión de rayos X por electrones libres.
2. λ_0 : longitud de onda para el pico sin corrimiento de la intensidad de los rayos X dispersados por electrones ligados.
3. $h/m_e c = \lambda_C$: es la **longitud de onda de Compton** para el electrón. Tiene un valor de $\lambda_C = 0.00243 \text{ nm}$.
4. θ : es el ángulo en que los fotones son dispersados a su entorno.



[Ángulo de dispersión de los electrones]

Los electrones de Compton se desvían en un ángulo ϕ que depende de las variables cinemáticas del sistema:

$$\tan(\phi) = \frac{p_e \sin(\phi)}{p_e \cos(\phi)} = \frac{p' \sin(\theta)}{p - p' \cos(\theta)} = \frac{E' \sin(\theta)}{E - E' \cos \theta} \quad (26)$$

Donde, p_e es el momento lineal del electrón después de la colisión, p' es el momento lineal del fotón después de la colisión, E y E' son la energía total del fotón antes y después de la colisión, respectivamente.



Ondas Electromagnéticas

Dualidad onda-partícula de la luz

Comportamiento cuántico de la luz

Aplicaciones

Absorción y emisión de fotones por átomos

Espectros de líneas de absorción (emisión)

Radiación de Bremsstrahlung y Rayos X

Creación y aniquilación de pares

Bibliografía



Aplicaciones



[Absorción y emisión de fotones por átomos]

Los fotones juegan un rol importante en la investigación de la estructura interna de los átomos.

Las relaciones energéticas entre los átomos y los fotones durante los procesos de emisión y absorción de fotones en los átomos constituyen las técnicas más importantes para aprender sobre los átomos.

Átomos de diferentes elementos absorben y emiten luz de diferentes longitudes de onda. Esto da lugar a espectros discretos de la luz irradiada o absorbida por los materiales.



[Espectros de líneas de absorción (emisión)]



Figura: Espectro de líneas de absorción del hidrógeno. Las líneas negras indican longitudes de onda de radiación absorbida por el átomo.



Figura: Espectro de líneas de emisión del hidrógeno. Las líneas a color indican longitudes de onda de radiación emitida por el átomo.



[Radiación de Bremsstrahlung y Rayos X]

Cuando electrones bajo la influencia de una diferencia de potencial colisionan con un objetivo metálico liberan energía por cada colisión. Los fotones así producidos conforman un espectro continuo de rayos X llamado **radiación de frenado o bremsstrahlung**.

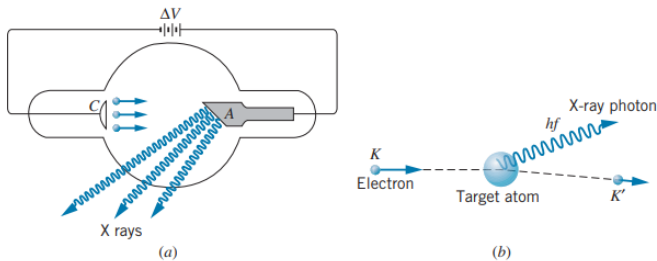


Figura: Diagrama de un aparato produciendo radiación de frenado.



[Creación y aniquilación de pares]

Cuando un fotón suficientemente energético colisiona con un átomo puede dar lugar a la **formación de un electrón y su antipartícula**, un positrón. El proceso se denomina **creación de pares**.

Conservación de la energía dicta que la energía del fotón hf debe distribuirse sobre la energía mecánica total del electrón, E_+ , y del positrón, E_- :

$$hf = E_+ + E_- = (m_e c^2 + K_+) + (m_e c^2 + K_-)$$

El proceso contrario puede suceder: un electrón y un positrón se **aniquilan** mutuamente al interactuar dando lugar a 2 fotones.

$$(m_e c^2 + K_+) + (m_e c^2 + K_-) = E_1 + E_2$$



Ondas Electromagnéticas

Dualidad onda-partícula de la luz

Comportamiento cuántico de la luz





Aplicaciones

Bibliografía



Fuentes Bibliográficas



-  R. A. Serway and J. W. Jewett Jr., *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*.
Boston, MA: Cengage Learning, 9th ed., 2014.
-  H. D. Young and R. A. Freedman, *Física Universitaria con Física Moderna*.
México: Pearson Educación, 14va ed., 2018.
-  K. S. Krane, *Modern Physics*.
EEUU: John Wiley & Sons, Inc., 3era ed., 2012.
-  R. Belford, “Atomic line spectra and niels bohr,” 2020.

