

Clase 01 - Fenómenos luminosos. Radiación.

Prof. Juan Mauricio Matera

16 de agosto

La Luz y sus propiedades

¿Cómo se comporta la luz?

- ▶ Una primera respuesta está relacionado con aquél elemento del ambiente que necesitamos para poder ver.
- ▶ Es producida por el sol y las estrellas, así como por cuerpos que se encuentran a altas temperaturas, al quemar ciertas sustancias.
- ▶ También se produce en situaciones que no involucran altas temperaturas, como cuerpos que fueron expuestos previamente iluminación (fosforescencia), dentro organismos vivos (ej: luciernagas), por descargas eléctricas (relámpagos, arco eléctrico) y por dispositivos electrónicos (luces LED).



La luz como una forma de energía

- ▶ En todos los casos, la producción de luz involucra el consumo de alguna forma de energía (de origen químico, eléctrico, etc).
- ▶ Ciertos dispositivos, así como los organismos vegetales, son capaces de obtener energía de la luz.
- ▶ Cuanto mayor sea la intensidad de la luz, su producción requiere más energía, y es capaz de producir efectos mayores sobre los cuerpos iluminados.
- ▶ Podemos decir entonces que la luz es una forma de energía que es *irradiada* por una fuente, se propaga a través del espacio, e interactúa con nuestros ojos para producir una sensación visual, así como con otros sistemas físicos.



Otras propiedades

- ▶ Además de la intensidad, la luz tiene otras propiedades:
- ▶ Color
- ▶ Polarización
- ▶ Coherencia
- ▶ Velocidad de propagación.

Color

- ▶ No percibimos la luz producida por el sol igual que la producida por una vela.
- ▶ Por otro lado, cuando la luz atraviesa o se refleja en un medio, esta propiedad cambia.
- ▶ Al *mezclar* luz de diferentes colores, percibimos colores distintos, y más brillantes.
- ▶ Al mezclar **tintes** de colores distintos, el color que reflejan cambia, y se oscurece.
- ▶ La luz *blanca* se descompone en luz de diferentes colores al atravesar ciertos cristales.



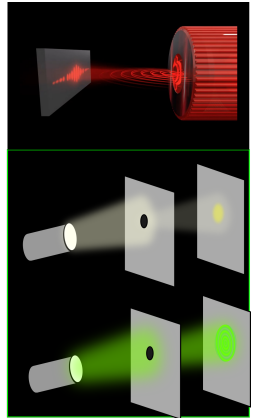
Polarización

- ▶ Existen materiales, llamados **polarizadores**, que al interponerse entre ciertas fuentes de luz y el ojo, dejan pasar diferente intensidad de luz dependiendo de cómo se orientan.
- ▶ Etienne-Louis Malus, descubrió que la ley, que lleva su nombre:
- ▶ La intensidad que atraviesa un polarizador es proporcional a $a + b \cos(\Theta)^2$.
- ▶ Si para una fuente de luz $b \neq 0$, decimos que la fuente está *polarizada*.
- ▶ Si entre un polarizador y una fuente no polarizada interponemos un segundo polarizador, la luz que atraviesa el segundo polarizador resulta estar polarizada.
- ▶ Conclusión: La luz posee una propiedad *vectorial* a la que llamamos *Polarización*.

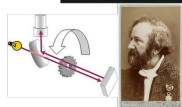


Coherencia

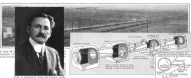
- ▶ Se observa en haces monocromáticos.
- ▶ Cuando está presente, la intensidad de la luz proyectada sobre una pantalla por dos fuentes no es la suma de las contribuciones individuales: aparecen fenómenos de interferencia.
- ▶ Motiva a asumir que la luz se propaga como lo hacen las ondas mecánicas.



Velocidad de propagación



Esquema del Experimento de Fizeau



Esquema del Experimento de Michelson

- ▶ En 1676 Ole Christensen Rømer estima por primera vez esta velocidad, mediante observaciones astronómicas.
- ▶ En el s. XVIII, James Bradley mejora estas medidas y estima que la luz del sol tarda 8min 12s en alcanzar la tierra.
- ▶ En 1848, Hyppolyte Fizeau determina la velocidad de la luz en un experimento de laboratorio, obteniendo una velocidad de $\approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, de acuerdo con la estimación de Bradley.
- ▶ En 1926, Albert Michelson logra una determinación de $c = 2.99796(4) \times 10^8 \text{ m/s}$
- ▶ En la actualidad, el **metro** fue redefinido de forma que $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ es el valor *exacto*.
- ▶ Al atravesar un medio material, la velocidad de la luz se reduce, originando el fenómeno de **refracción**.

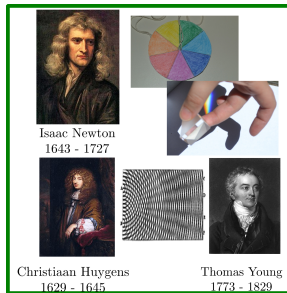
La Óptica

- ▶ Viene del griego clásico optike, que significa “aspecto, apariencia”.
- ▶ Es la rama de la física que involucra el estudio del comportamiento y las propiedades de la luz, incluidas sus interacciones con la materia, así como la construcción de instrumentos que se sirven de ella o la detectan.
- ▶ Es una de las ramas más antiguas de la física.
- ▶ Los primeros desarrollos teóricos sobre la luz datan de la antigua grecia.
- ▶ Será el tema de las siguientes clases.

Modelos para la luz

- ▶ Identificamos a la luz como una forma de energía que *irradian* ciertos cuerpos.
- ▶ Esto no da aún un “modelo” sobre de qué esta hecha la luz.
- ▶ A mediados del sXVII, competían dos modelos:
 - ▶ Modelo Corpuscular
 - ▶ Modelo Ondulatorio

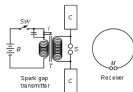
- ▶ Christian Huygens en 1690, propone una teoría que describe a la luz como un fenómeno ondulatorio.
- ▶ En 1704 Isaac Newton publica su *Optika* donde propone que la luz está compuesta de partículas, y que la luz blanca es el resultado de mezclar luz de diferentes colores.
- ▶ Alrededor de 1800, Thomas Young demuestra la existencia del fenómeno de **interferencia**, lo que dá evidencia experimental a la teoría ondulatoria.



- ▶ en 1845, Michel Faraday descubre que los campos magnéticos afectaban la polarización de la luz.
- ▶ En 1850, Leon Foucault determina la **velocidad de la luz** como $c \approx 298000 \text{ km/s}$
- ▶ James Maxwell, con su teoría de las ondas electromagnéticas, nota que la velocidad de propagación de estas coincide con la de la luz, y conjetura que son en realidad el mismo fenómeno.
- ▶ Poco después, Heinrich Hertz confirma la teoría de las ondas electromagnéticas generando y detectando por primera vez ondas de radio.



Léon Foucault
1819 -1868



Heinrich Hertz
1857 - 1894

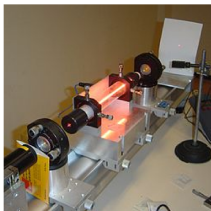
- ▶ Ya en el siglo XX, Nikola Tesla y Guglielmo Marconi desarrollan paralelamente las primeras comunicaciones basadas en ondas de radio.
- ▶ Max Planck y Albert Einstein desarrollan la teoría cuántica de la luz y la explicación del efecto fotoeléctrico: la luz es **onda** y **partícula** a la vez.
- ▶ En los años 60, se logró construir por primera vez una fuente LASER. La luz LASER es **radiación electromagnética coherente**, lo que significa que su **frecuencia**, **fase**, **polarización** y **dirección de propagación** están **altamente definidas**.



Guglielmo Marconi
1874-1937



Nikola Tesla
1856 - 1943



Modelo Corpuscular

- ▶ Propuesto por Pierre Gassendi (1660) e Isaac Newton (1704).
- ▶ La luz estaba compuesta por partículas microscópicas, rígidas, elásticas y livianas.
- ▶ Los emisores de luz emiten estas partículas en todas direcciones.
- ▶ En ausencia de materia, las partículas se mueven en línea recta.
- ▶ Los cuerpos opacos pueden absorberlas, o hacer que reboten sobre ellos.



Modelo ondulatorio



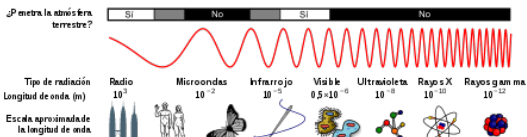
- ▶ Propuesto por Robert Hook (1678) y Christian Huygens (1690).
- ▶ La luz es una onda en un medio elástico, y muy tenue que llena el espacio (ether).
- ▶ Predice fenómenos semejantes a los observados en las ondas mecánicas (reflexión, refracción e interferencia).
- ▶ En diferentes medios, la velocidad de propagación es diferente.

Teoría de las ondas electromagnéticas de Maxwell

- ▶ Desarrollada por James C. Maxwell en 1862.
- ▶ La luz es una *onda electromagnética* que resulta de las perturbaciones sobre los *campos electromagnéticos*.
- ▶ Las perturbaciones son producidas por el movimiento de *partículas cargadas*.
- ▶ La teoría predice que la luz se propaga en el vacío con una velocidad característica $c \approx 2,99 \text{m/s}$, que se reduce al atravesar medios materiales.
- ▶ La velocidad de propagación en el vacío es independiente del sistema de referencia!
- ▶ La luz visible forma sólo una pequeña parte del espectro electromagnético.
- ▶ La analizaremos con detalle estos conceptos a lo largo del curso.

Teoría de las ondas electromagnéticas de Maxwell

- ▶ Desarrollada por James C. Maxwell en 1862.
- ▶ La luz es una *onda electromagnética* que resulta de las perturbaciones sobre los *campos electromagnéticos*.
- ▶ Las perturbaciones son producidas por el movimiento de *partículas cargadas*.
- ▶ La teoría predice que la luz se propaga en el vacío con una velocidad característica $c \approx 2,99 \times 10^8 \text{ m/s}$, que se reduce al atravesar medios materiales.
- ▶ La velocidad de propagación en el vacío es independiente del sistema de referencia!
- ▶ La luz visible forma sólo una pequeña parte del espectro electromagnético.
- ▶ La analizaremos con detalle estos conceptos a lo largo del curso.



Electrodinámica cuántica

- ▶ La teoría de Maxwell presentaba problemas en lo que respecta a describir la emisión de radiación electromagnética por los sistemas atómicos, así como en la descripción del espectro de emisión de los cuerpos calientes.
- ▶ La introducción de la mecánica cuántica a principios del s XX resuelve estos problemas al considerar que la luz está compuesta de partículas, ni es una onda.
- ▶ En esta teoría, la luz está formada por **fotones**, objetos que se comportan como ondas o partículas en diferentes situaciones:
 - ▶ Al ser emitidos o absorbidos por los átomos, lo hacen como partículas puntuales, con una cantidad fija de energía.
 - ▶ Al propagarse, los fotones lo hacen como ondas, con una frecuencia proporcional a la energía $E_\nu = \hbar f$.

Electrodinámica cuántica

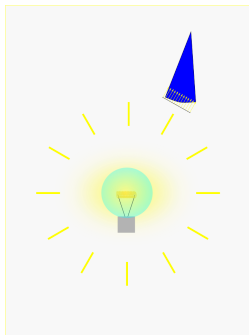
- ▶ La teoría de Maxwell presentaba problemas en lo que respecta a describir la emisión de radiación electromagnética por los sistemas atómicos, así como en la descripción del espectro de emisión de los cuerpos calientes.
- ▶ La introducción de la mecánica cuántica a principios del s XX resuelve estos problemas al considerar que la luz está compuesta de partículas, ni es una onda.
- ▶ En esta teoría, la luz está formada por **fotones**, objetos que se comportan como ondas o partículas en diferentes situaciones:
 - ▶ Al ser emitidos o absorbidos por los átomos, lo hacen como partículas puntuales, con una cantidad fija de energía.
 - ▶ Al propagarse, los fotones lo hacen como ondas, con una frecuencia proporcional a la energía $E_\nu = \hbar f$.



Luz y Radiación.

Radiación

- ▶ La luz es una forma de radiación, esto es, de emisión de energía.
- ▶ La **potencia irradiada** por una fuente de luz es la cantidad de energía que irradia por unidad de tiempo.
- ▶ Si la fuente es **isótropa**, la energía irradiada se distribuirá uniformemente en todas las direcciones.
- ▶ El efecto de esta radiación sobre el ojo, o el sistema físico con el que interactúe estará relacionado con la porción de la potencia radiada que incida sobre este.
- ▶ Esta porción dependerá del tamaño del sistema, así como de la distancia a la fuente.
- ▶ Llamamos **Irradiancia** E_{Rad} en un punto a la potencia recibida, por unidad de área, por un cuerpo situado en ese punto.



En el sistema MKS, la **Irradiancia** tiene unidades de

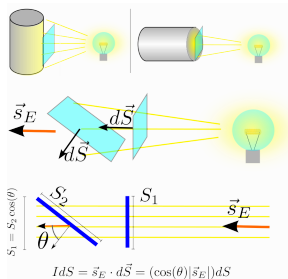
$$[E_{\text{Rad}}] = [\text{Watt}]/[\text{m}]^2$$

Irradiancia y Densidad de Flujo

- ▶ En la definición de irradiancia, debemos ser precisos respecto a qué área es la considerada.
- ▶ Consideramos superficies *diferenciales* planas $d\vec{S}$.
- ▶ Definimos la *Irradiancia* como el flujo máximo de energía, por unidad de área, respecto a todas las orientaciones de $d\vec{S}$:

$$E_{\text{Rad}} = \left. \frac{dP}{dS} \right|_{d\vec{S}_{\text{max}}} = \vec{s}_E \cdot d\vec{S}_{\text{max}}$$

- ▶ donde introducimos la magnitud *vectorial Densidad de flujo* $\vec{s}_E$ como el vector de magnitud igual a la *irradiancia*, y orientado en la dirección de $d\vec{S}_{\text{max}}$



- Integrando sobre cualquier **superficie cerrada** S que envuelve sólo a la fuente,

$$P_{total} = \oint_S \vec{s}_E \cdot d\vec{S}$$

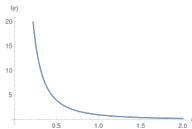
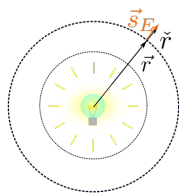
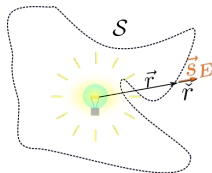
es la *Potencia total* radiada por la fuente.

- En presencia de más de una fuente, P_{total} es *aditiva*

$$P_{total} = \sum_i P_i$$

con P_i la potencia irradiada por la fuente i -ésima.

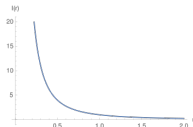
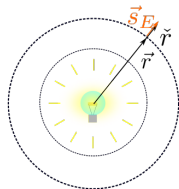
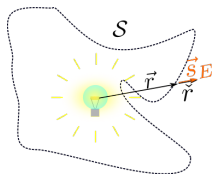
- Sin embargo, en general $\vec{s}_E \neq \sum_i \vec{s}_{E,i}$, debido a efectos de interferencia.



- Para una fuente isótropa, podemos deducir de esto que
 - $\vec{s}_E$ debe apuntar en la dirección radial desde la fuente.
 - Su magnitud sólo puede depender de la distancia. Luego,

$$\vec{s}_E = \frac{P_{total}\vec{r}}{4\pi r^2} \Rightarrow I(r) = \frac{P_{total}}{4\pi r^2}$$

de manera que la intensidad es *inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente*.

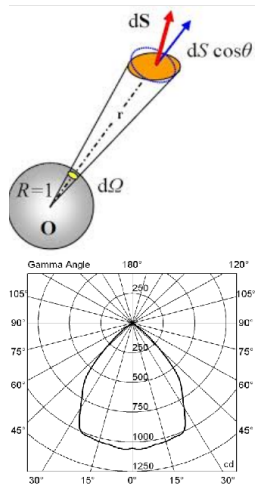


Densidad de flujo, rayos y haces de rayos

- ▶ La densidad de flujo de energía es un ejemplo de campo vectorial.
- ▶ Una representación gráfica más amigable se obtiene en términos de la noción de **líneas de flujo**.
- ▶ Se definen de manera que en todo punto, son tangentes al vector densidad de flujo.
- ▶ Podemos pensar a las líneas de flujo como las *trayectorias* de partículas que transportan la energía asociada a la radiación.
- ▶ En la descripción ondulatoria, son curvas normales a los **frentes de onda**.
- ▶ En el contexto de la óptica, nos referimos a estas como **rayos**.
- ▶ Llamamos *haz* de rayos al conjunto de rayos que intersectan un elemento de área dA .

Haces y Ángulos Sólidos

- ▶ El flujo de radiación a través de cualquier superficie simple que corte al haz es constante.
- ▶ Se introduce entonces la noción de **ángulo sólido** Ω , como el lugar geométrico de las rectas que pasan por un mismo punto y atraviesan una superficie S .
- ▶ La medida del ángulo sólido es *el área de su proyección sobre una esfera unitaria*.
- ▶ La *unidad* de ángulo sólido es el **estereorradián** ($[sr]$): $0 \leq \Omega \leq 4\pi$



Ángulos sólidos para algunas regiones esféricas

- ▶ El *elemento (diferencial) de ángulo sólido* viene dado por

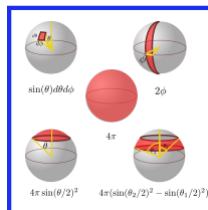
$$d\Omega = \frac{dA}{r^2}$$

con dA el *elemento (diferencial) de área transversal* a la dirección considerada.

- ▶ Para objetos distantes, el ángulo sólido que abarcan puede aproximarse por el cociente entre su área transversal y la distancia:

$$\Omega \approx \frac{A}{r^2}$$

- ▶ Para objetos de sección circular, estimamos el ángulo en términos de su *diámetro angular* δ : $\Omega \approx \pi \left(\frac{\delta}{2}\right)^2$



Intensidad Radiante

- ▶ Definimos entonces la **Intensidad Radiante** (I) como la *potencia irradiada por ángulo sólido*.
- ▶ Para una *fente localizada*, en un *medio homogéneo* la intensidad radiante es *independiente de la distancia*.
- ▶ Para una fente *isótropa* la *Intensidad Radiante* es

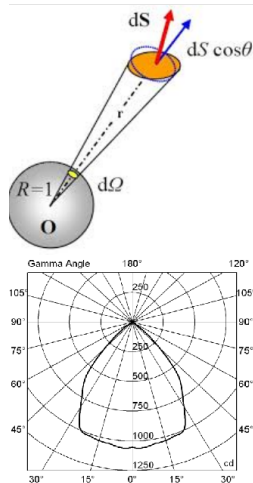
$$I = \frac{P_0}{4\pi}$$

con P_0 la potencia total irradiada.

- ▶ En general, para una fente lejana,

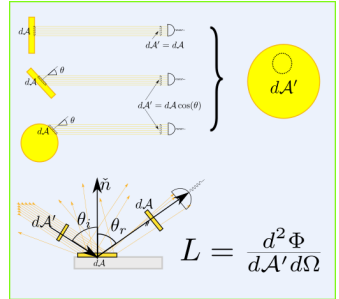
$$I \approx E_{rad} r_d^2$$

con r la distancia a la fente.



Radiancia (L)

- ▶ Para describir un cuerpo radiante, interesa saber cómo se distribuye esta sobre su superficie.
- ▶ El problema es que si el objeto es lejano, no podemos determinar la orientación espacial de la superficie.
- ▶ Por eso, definimos la **Radiancia** (L) como *la intensidad radiante (emitida o reflejada) por unidad de área aparente, en cierta dirección*.
- ▶ Es una medida del *brillo aparente* de una superficie, vista desde una dirección dada.
- ▶ Es constante para un haz que se propaga en un medio homogéneo, y en *sistemas ópticos perfectos* (que veremos en la clase 3).



- ▶ En superficies regulares (planas) la radiancia por reflexión suele ser mayor para ángulos rasantes.
- ▶ Una superficie que emite/refleja radiación con radiancia constante se conoce como *emisor de Lambert*.



Johann Lambert
(1728-1777)

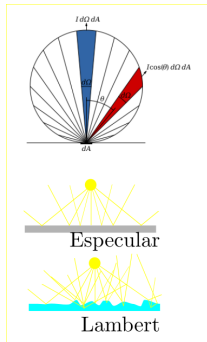
- ▶ En un *emisor de Lambert*, la *intensidad radiante* es proporcional al coseno del ángulo respecto a la normal:

$$I = I_0 \cos(\theta)$$

por lo que su *brillo* es independiente de la dirección de observación.

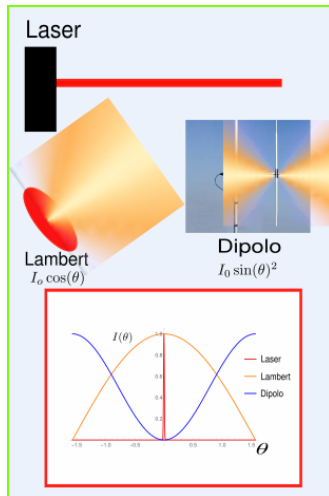
- ▶ Las superficies de Lambert suelen ser el resultado de la *difusión* de la radiación por *reflexiones múltiples*.
- ▶ El flujo total de radiación se relaciona con la radiancia según

$$\Phi_{total} = \pi S \int L dS$$



Modelos de emisores

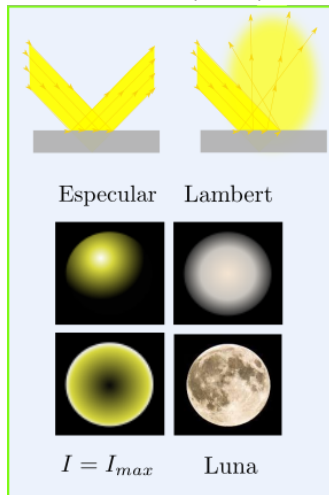
- ▶ *Emitancia*
 $M = \frac{d\Phi}{d\mathcal{A}} = \int L(\Omega) \cos(\theta) d\Omega.$
- ▶ Emisor direccional: $L \neq 0$ sólo en torno a una dirección determinada. Ejemplo: fuente laser.
- ▶ Emisor de Lambert:
 $L = \text{cte} = \frac{M}{\pi}$. Ejemplo: radiación térmica.
- ▶ Emisores dipolares:
 $I(\theta) \propto I_0 \sin^2(\theta)$. Ejemplo: antenas de microondas.



Modelos de superficies reflectantes

- ▶ Una superficie reflectante es aquella que reemite el flujo incidente.
- ▶ Si no hay *absorción*,
 $M = M_0 = E_{rad} \cos(\theta)$.
- ▶ En general, $M = \eta M_0$ con $0 \leq \eta \leq 1$ el *albedo* de la superficie.
- ▶ La superficie es *especular* si la radiancia es *direccional*. En ese caso, L se conserva.
- ▶ Caso contrario, la superficie es *difusiva*.
- ▶ La superficie es un *reflectante de Lambert* si $L = \frac{M}{\pi}$.
- ▶ En este caso, una superficie esférica iluminada de frente se ve más oscura en los bordes.

Oren & Nayar (1994)



Ejercicio de integración

Para un observador en la superficie de la tierra, la luna tiene un diámetro angular de $\delta \approx 9 \times 10^{-3} \text{rad}$ y se encuentra a una distancia de $\approx 383400 \text{km}$. Se observa que en luna llena, la irradiancia del satélite es de $\approx 2 \text{mW/m}^2$.

- ▶ ¿Qué ángulo sólido subtiende?
- ▶ ¿Cuál es el área transversal de la luna?
- ▶ ¿Cuál es su intensidad angular?
- ▶ Si la superficie de la luna fuese un *reflector de Lambert*, despreciando las pérdidas por la atmósfera, ¿cuál será la *radiancia* en la parte iluminada de la superficie de la luna?
- ▶ A partir del valor anterior, estimar el flujo total de potencia que refleja la luna.
- ▶ Si el radio de la tierra es de 6371km , ¿qué parte de ese flujo llega a la tierra?
- ▶ Si la irradiancia del sol en la órbita de la tierra es de 1361W/m^2 , estime el albedo de la luna.