

Tema I. Introducción a la propagación de la luz en medios homogéneos

Bibliografía

- E. Hecht y A. Zajac, “*Óptica*”, capítulos 3 y 4.
- G.A. Fry, “*Geometrical Optics*”, capítulos 1-3.
- J. Casas, “*Óptica*”, capítulo 1.



Tema I. Introducción a la propagación de la luz en medios homogéneos

- La naturaleza de la luz
- El espectro electromagnético
- Propagación de ondas electromagnéticas en medios dieléctricos y metales
- Rayos de luz



Propagación en medios homogéneos

La naturaleza de la luz

- Distintas formulaciones de la luz:
 - **Teoría Geométrica:** Reflexión y refracción
 - **Teoría Ondulatoria:** Interferencias y difracción
 - **Teoría Electromagnética:** Polarización
 - **Teoría Cuántica:** Interacción luz-materia
- Gracias a la Teoría Geométrica podemos estudiar de manera sencilla muchos procesos de **Formación de Imágenes**.



Propagación en medios homogéneos

La naturaleza de la luz

Fenómeno físico de la **emisión** y **propagación** luminosa:

- Consideramos una **carga eléctrica** en reposo.
- Esta carga genera un campo eléctrico estático.

Si la carga se mueve, se genera una **perturbación** en las líneas del campo eléctrico que se **propaga** en el **vacío**.

- Generación de un campo electromagnético, es decir, **LUZ**.
- Asumamos un movimiento oscilatorio armónico de la carga.



Propagación en medios homogéneos

La naturaleza de la luz

Estamos creando una onda electromagnética **monocromática**.

- **Campo eléctrico:** $E(z, t) = E_0 \cos \phi(z, t)$
- **Fase de la onda:** $\phi(z, t) = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda} \right)$
- **Longitud de onda:** λ **Periodo:** T **Amplitud:** E_0
- **Velocidad de fase:** $c = \lambda/T = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$



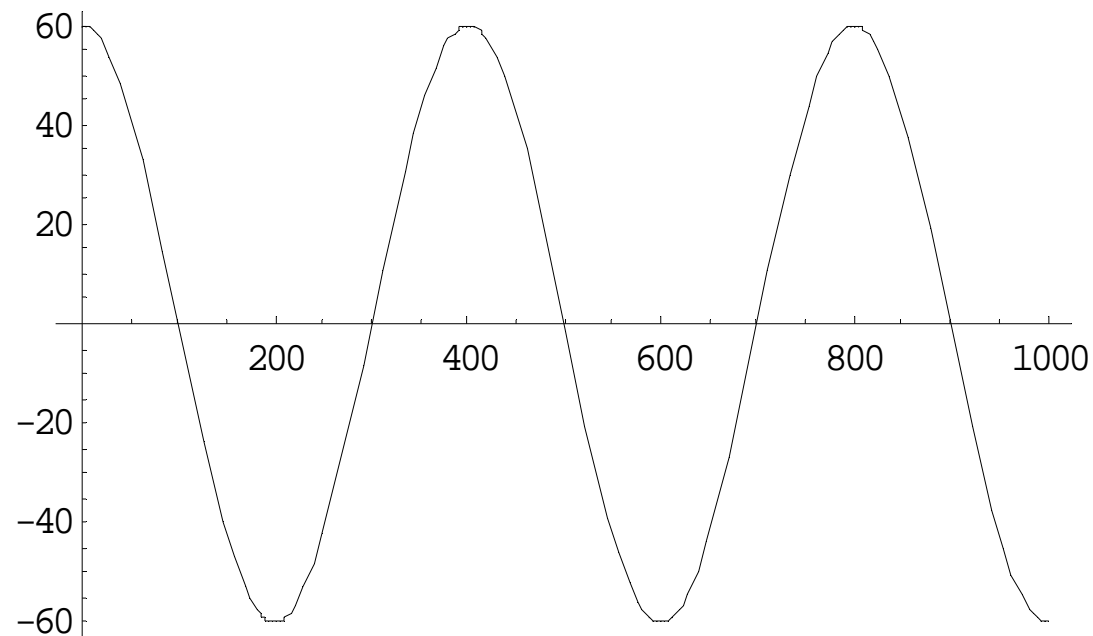
Propagación en medios homogéneos

La naturaleza de la luz

$$\lambda = 400 \text{ nm}$$

$$E_0 = 60 \text{ (u.a.)}$$

$E \text{ (u.a.)}$



$z \text{ (nm)}$



Propagación en medios homogéneos

La naturaleza de la luz

Veamos un ejemplo típico: Lámpara espectral de Sodio (Na).

- **Longitud de onda:** $\lambda = 589.0 \text{ nm}$ ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)
- **Velocidad de fase:** $c = \lambda/T = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- **Periodo:** $T = \lambda/c = 1.96 \text{ fs}$ ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$)

En lugar de utilizar el *Periodo*, es habitual emplear la **Frecuencia**:

$$\nu = \frac{1}{T} = 500 \text{ THz} \quad (1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ s}^{-1})$$



Propagación en medios homogéneos

La naturaleza de la luz

Frente de Onda: Puntos del espacio que tienen la misma fase.

- Frente de ondas **esférico**: Región cercana a la fuente puntual
- Frente de ondas **plano**: Región lejana a la fuente puntual



Propagación en medios homogéneos

La naturaleza de la luz

Onda electromagnética **monocromática**: Tiene una variación espacio-temporal correspondiente a una sola λ .

- Se asocia a colores: Longitudes de onda de **Fraunhofer**
- Producidas por lámparas espectrales y láseres.

Onda electromagnética **policromática**: Tiene una variación espacio-temporal correspondiente a más de una λ .

- Luz **blanca** o mezcla de luces monocromáticas.
- Producidas por lámparas incandescentes y el Sol.



Propagación en medios homogéneos

El espectro electromagnético

Longitudes de onda de **Fraunhofer**:

Símbolo	Debido a ...	λ (nm)	Color
A - (banda)	O ₂	759.4 - 762.1	
B - (banda)	O ₂	686.7 - 688.4	Rojo
C	H	656.3	Rojo
a - (banda)	O ₂	627.6 - 628.7	Naranja
D - 1, 2	Na	589.6 & 589.0	Amarillo
E	Fe	527.0	Verde
F	H	486.1	Azul
f	H	434.0	Violeta
G	Fe & Ca	430.8	Violeta



Propagación en medios homogéneos

La naturaleza de la luz

La luz transporta **energía**:

- Suelen ser **cantidades pequeñas**: Con una lupa se puede concentrar luz (energía) y quemar papel.
- El transporte de energía se dirige en la **dirección de propagación** de la luz: Sobre las líneas de campo.
- Teoría **electromagnética**: $E \propto |E_0|^2$
- Teoría **cuántica**: Aparece el concepto de **fotón**, cuya energía es tanto mayor cuanto más alta es la frecuencia óptica: $E = h\nu$

$$\left. \begin{array}{l} h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \\ \nu = 500 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1} \text{ (Na)} \end{array} \right\} E = 2.0 \text{ eV} \quad (1 \text{ J} = 6.2 \cdot 10^{18} \text{ eV})$$



Tema I. Introducción a la propagación de la luz en medios homogéneos

- La naturaleza de la luz
- El espectro electromagnético
- Propagación de ondas electromagnéticas en medios dieléctricos y metales
- Rayos de luz



Propagación en medios homogéneos

El espectro electromagnético

Región espectral del **Infrarrojo**:

- Desde 300 GHz (1 mm) hasta 400 THz (780 nm)
 - IR cercano: 780 nm - 3000 nm (3 μm)
 - IR intermedio: 3 μm - 6 μm
 - IR lejano: 6 μm - 15 μm
 - IR extremo: 15 μm - 1 mm
- **Generadores y fuentes:** Osciladores moleculares que por agitación térmica irradian y absorben radiación IR (materiales calientes)
- **Detectores:** Sistemas que por absorción IR generan calor (bolómetro y películas fotográficas especiales)



Propagación en medios homogéneos

El espectro electromagnético

Región espectral del **Visible**:

- Desde 384 THz (780 nm) hasta 769 THz (390 nm)
- **Generadores y fuentes:** Rearreglo de los electrones exteriores en los átomos y moléculas (luz solar)
- **Detectores:** Retina ocular.



Propagación en medios homogéneos

El espectro electromagnético

Longitudes de onda de **Fraunhofer**:

Símbolo	Debido a ...	λ (nm)	Color
A - (banda)	O ₂	759.4 - 762.1	
B - (banda)	O ₂	686.7 - 688.4	Rojo
C	H	656.3	Rojo
a - (banda)	O ₂	627.6 - 628.7	Naranja
D - 1, 2	Na	589.6 & 589.0	Amarillo
E	Fe	527.0	Verde
b - 1, 2	Mg	518.4 & 517.3	Verde
c	Fe	495.8	Añil
F	H	486.1	Azul
d	Fe	466.8	Azul
e	Fe	438.4	Azul
f	H	434.0	Violeta
G	Fe & Ca	430.8	Violeta
g	Ca	422.7	Violeta
h	H	410.2	Violeta
H	Ca	396.8	Violeta
K	Ca	393.4	



Propagación en medios homogéneos

El espectro electromagnético

Región espectral del **Ultravioleta**:

- Desde 800 THz (390 nm) hasta $3 \cdot 10^5$ THz (1 nm)
- **Generadores y fuentes:** Electrones interiores y exteriores.
 - El sol emite radiación UV que ionizan los átomos de la atmósfera (ionosfera).
 - El ozono de la atmósfera absorbe esta radiación UV.
 - La radiación UV puede provocar cáncer.
- **Detectores:** Pantallas fluorescentes, emulsiones fotográficas y fotocélulas (fotomultiplicador fotoeléctrico)



Propagación en medios homogéneos

El espectro electromagnético

Existen dos tipos de **fuentes** de radiación electromagnética:

- **Fuentes de continuo.** Emiten radiación cuya intensidad varía de forma gradual con la longitud de onda (luz policromática).
 - *Filamento de metal incandescente:* La más común para la radiación ultravioleta es la del deuterio. En visible el tungsteno o wolframio, en infrarrojo un sólido incandescente.
- **Fuentes de línea.** Emiten un número limitado de bandas de radiación abarcando un intervalo muy reducido de longitudes de onda (monocromática).
 - Cabe destacar las *fuentes de láser* que son relativamente recientes (1960).
 - *Tubo de descarga gaseoso:* Descarga eléctrica a través de un tubo lleno de gas. Los átomos se excitan e irradian.



Propagación en medios homogéneos

El espectro electromagnético

Fuentes de radiación electromagnética:

Fuentes	λ	Tipo de radiación
Luz solar	UV, visible e IR cerc.	policromática
lámp. incandescent.	UV, visible e IR cerc.	policromática
lámp. descarga (Xe)	UV y visible	policromática
lámp. descarga (Na, Hg)	visible	monocromática
LEDs (GaAs)	visible e IR cerc.	monocromática
láser (He-Ne)	UV, visible e IR	monocromática



Propagación en medios homogéneos

El espectro electromagnético

Fuentes de radiación **láser** y aplicaciones:

Tipo	λ	Aplicaciones
Ar	458 - 515 nm	Coagulación retina; holografía
CO ₂	10.6 μ m	Cirugía
colorante(s)	350 nm - 1 μ m	Instrumentación
GaAs	850 - 950 nm	Comunicaciones ópticas
HeNe	632.8 nm	Instrumentación; holografía
Nd-YAG	1.06 μ m	Cirugía



Tema I. Introducción a la propagación de la luz en medios homogéneos

- La naturaleza de la luz
- El espectro electromagnético
- Propagación de ondas electromagnéticas en medios dieléctricos y metales
- Rayos de luz



Propagación en medios homogéneos

Ondas electromagnéticas en medios dieléctricos

Caracterización de los medios materiales:

- Medios **dieléctricos** (o aislantes): Ausencia de cargas libres (vidrio, agua, aire). No conducen la corriente eléctrica.
- Medios **conductores**: Existen cargas eléctricas libres. En el caso de los metales (cobre), estas cargas son electrones.
- Medios **semiconductores**: Material con cargas débilmente ligadas (Si, Ge). Funcionan como conductores en condiciones particulares pero actúan como medios aislantes en condiciones diferentes.



Propagación en medios homogéneos

Ondas electromagnéticas en medios dieléctricos

Fenomenología de la **propagación** de una onda electromagnética (luz) a través de un medio **dieléctrico**:

- La velocidad de fase (v) varía con la frecuencia de la onda (**dispersión cromática**) y en general es diferente a c .
 - **Índice de refracción**: Magnitud adimensional que en la gran mayoría de los casos es mayor a la unidad: $n = c/v$
- La luz es absorbida parcial o totalmente por el medio (**absorción selectiva**), fenómeno que también depende de la frecuencia de la onda.



Propagación en medios homogéneos

Ondas electromagnéticas en medios dieléctricos

Índices de refracción $n = c/v$ para diferentes medios dieléctricos.
Cuando no se indica explícitamente, nos referimos a la longitud de onda de Fraunhofer correspondiente a la línea D.

Sustancia	Índice de refracción (n_D)
Azúcar	1.56
Diamante	2.417
Mica	1.56 - 1.60
Benceno	1.504
Glicerina	1.47
Agua	1.333
Alcohol etílico	1.362
Aceite de oliva	1.46



Propagación en medios homogéneos

Ondas electromagnéticas en medios dieléctricos

Fenomenología microscópica de la **dispersión cromática**:

- La **onda primaria** interacciona con la partícula (átomo, molécula, etc.)
- La partícula absorbe parte de la energía luminosa y vibra con la misma frecuencia, ν , creando una **onda secundaria**.
- La fase de la onda primaria y la onda secundaria no coincide.



Propagación en medios homogéneos

Ondas electromagnéticas en medios dieléctricos

Si consideramos todas las partículas del medio (**medio denso**):

- Las ondas primaria y secundaria se propagan en los **espacios interatómicos** con velocidad c .
- Existe un **desfase** entre la onda secundaria y la onda primaria que explica que $n \neq 1$

$$\left. \begin{array}{l} c = \lambda_0 \nu \\ \nu = \lambda \nu \end{array} \right\} n = \frac{c}{\nu} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

$$\lambda = \lambda_0 / n \Rightarrow \begin{cases} n > 1 \\ \lambda < \lambda_0 \end{cases}$$



Propagación en medios homogéneos

Ondas electromagnéticas en medios dieléctricos

Se distinguen los siguientes casos:

- $v < v_i \Rightarrow \frac{dn}{dv} > 0$ **Dispersión normal**
- $v > v_i \Rightarrow n < 1$ ($v > c$)

- En la región de dispersión normal se utiliza la **fórmula de Cauchy**:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$



Propagación en medios homogéneos

Ondas electromagnéticas en medios dieléctricos

Caracterización de la dispersión cromática en **vidrios refractivos**:

- **Número de Abbe:**

$$v_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad \left\{ \begin{array}{ll} \lambda_C = 656.3 \text{ nm} \Rightarrow n_C = n(\lambda_C) & \text{Rojo (H}\alpha\text{)} \\ \lambda_D = 589.3 \text{ nm} \Rightarrow n_D = n(\lambda_D) & \text{Amarillo (Na)} \\ \lambda_F = 486.1 \text{ nm} \Rightarrow n_F = n(\lambda_F) & \text{Azul (H}\beta\text{)} \end{array} \right.$$

- Los vidrios cumplen que $20 < v_D < 75$
- Se suelen clasificar en dos categorías:
 - Vidrios **Flint**: $v_D < 50$ (muy dispersivos)
 - Vidrios **Crown**: $v_D > 50$ (poco dispersivos)



Propagación en medios homogéneos

Ondas electromagnéticas en metales

Propiedades ópticas de los **medios conductores**:

- Presencia de **cargas eléctricas libres** (electrones en metales).
- **Conductor perfecto**: cargas excitadas por una onda armónica siguen las alteraciones del campo.

Conclusión: Cuando una onda incide sobre un metal, ésta se extingue en el medio conductor. Sin embargo, existe una reflexión de prácticamente toda la energía luminosa.



Tema I. Introducción a la propagación de la luz en medios homogéneos

- La naturaleza de la luz
- El espectro electromagnético
- Propagación de ondas electromagnéticas en medios dieléctricos y metales
- Rayos de luz



Propagación en medios homogéneos

Rayos de luz

- Un **rayo de luz** es una línea en el espacio que corresponde a la dirección de propagación del flujo radiante.

Propagación de los rayos luminosos:

- **Ley de Malus:** En un medio homogéneo e isótropo, los rayos de luz son líneas normales a los frentes de onda en cada punto de intersección.
- **1ª ley de la Óptica Geométrica:** En un medio homogéneo e isótropo los rayos de luz tienen una trayectoria rectilínea.
- **Propiedad:** La separación espacial entre dos frentes de onda medida a lo largo de cualquier rayo luminoso debe ser la misma.

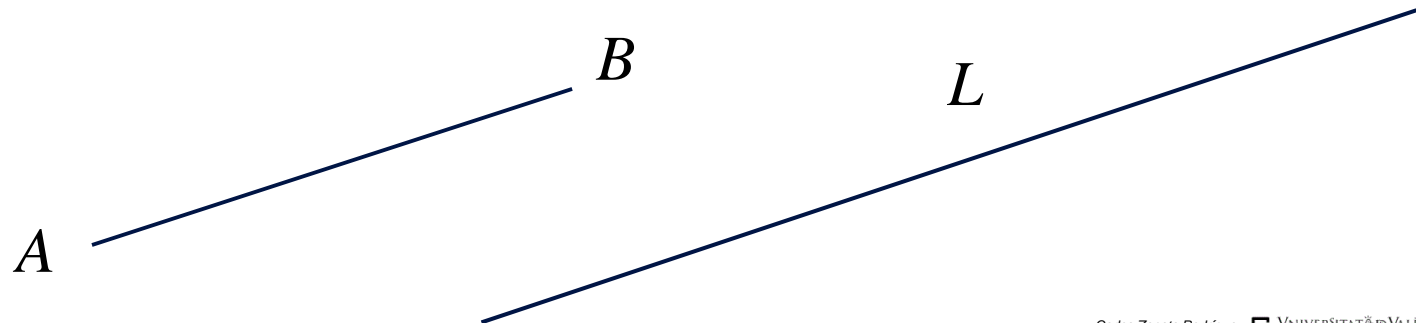


Propagación en medios homogéneos

Rayos de luz

- El **camino óptico** entre dos puntos, A y B, pertenecientes a un rayo de luz que se propaga en un medio homogéneo es la distancia equivalente en el vacío.
- Las dos distancias son equivalentes en el sentido de que la luz tarda el mismo tiempo en recorrer ambas distancias:

$$\left. \begin{array}{l} \text{- dieléctrico: } v = \overline{AB} / t_0 \\ \text{- vacío: } c = L / t_0 \end{array} \right\} L = \frac{c}{v} \overline{AB} = n \overline{AB}$$



Propagación en medios homogéneos

Rayos de luz

- Si un grupo de rayos es tal que podemos encontrar una superficie que sea ortogonal a todos y cada uno de ellos, se dice entonces que forma una **congruencia normal**.
- Los rayos que emanan de una fuente puntual son perpendiculares a una esfera centrada en la fuente y, consecuentemente, forman una congruencia normal.
- Consideramos una **congruencia óptica** al conjunto de rayos que proceden de un mismo punto emisor.



Propagación en medios homogéneos

Rayos de luz

- Considerada una congruencia óptica, es posible hallar la superficie envolvente de todos los rayos, que denominamos **cáustica**.
- En ella se observa siempre una fuerte concentración de luz, y en la mayoría de los casos, también de calor -radiación IR-, de ahí su nombre.



Tema II. Sistemas ópticos con superficies planas

Bibliografía

- E. Hecht y A. Zajac, “*Óptica*”, capítulos 4 y 5.
- A. Moussa y P. Ponsonnet, “*Cours de physique I. Optique*”, capítulos 2, 3, 5 y 6.
- S.A. Cotter, “*Prismas ópticos: aplicaciones clínicas*”, capítulo 1.
- J. Casas, “*Óptica*”, capítulos 2 y 5.



Tema II. Sistemas ópticos con superficies planas

- Refracción y reflexión en una interfase plana
- Teoría geométrica de la reflexión y refracción. Leyes de Descartes
- La interfase plana como sistema óptico formador de imágenes
- Lámina de caras planoparalelas
- Refracción en prismas ópticos
- El prisma como sistema formador de imágenes. Prismas oftálmicos
- Dispersión en prismas
- Combinaciones de prismas: prismas acromáticos y prismas de visión directa
- Prismas reflectores
- Espejos dobles



Sistemas con superficies planas

Refracción y reflexión en una superficie plana

Propagación a través de interfases:

- Una **interfase** es una superficie que separa dos medios de diferentes propiedades eléctricas y magnéticas.
 - Estamos interesados en interfases que separan **dos dieléctricos** con distinta n , e interfases que separan **un dieléctrico y un conductor** (metal).
- Experimentalmente se observa que cuando una onda llega a una interfase plana, parte de la densidad de flujo incidente se transforma en un **onda reflejada** y parte del flujo se transmite como **onda refractada** (transmitida)



Sistemas con superficies planas

Refracción y reflexión en una superficie plana

Modelo de **construcción** del nuevo frente de ondas

- **Principio de Huygens (1629-1695):** Cada punto de un frente de ondas primario sirve como fuente de ondas esféricas secundarias tales que el frente de ondas primario un momento más tarde es la envolvente de estas ondas secundarias. Además, estas ondas avanzan con una velocidad y frecuencia igual a la onda primaria en cada punto del espacio.



Sistemas con superficies planas

Refracción y reflexión en una superficie plana

Modelo de **construcción** del nuevo frente de ondas

- **Problema:** Según el principio de Huygens, debería existir una onda posterior avanzando hacia la fuente -no se ha observado-
- Esto es debido a que se consideran las partículas emisoras de luz pertenecientes exclusivamente al frente de ondas. Si se tiene en cuenta **todo el volumen** del medio, en especial las partículas que distan menos de $\lambda/2$, la onda que avanza hacia la fuente se extingue.



Sistemas con superficies planas

Refracción y reflexión en una superficie plana

- En **escala submicroscópica**, los átomos de la interfase (y cercanos) interaccionan con el haz incidente y crean ondas secundarias que se superponen y combinan entre si.
- Este proceso es responsable de la aparición de ondas reflejadas y refractadas que se propagan a lo largo de **ciertas direcciones** del espacio.
- La reflexión es un **efecto de superficie**, pues involucra átomos en una capa de alrededor $\lambda/2$ de profundidad.
 - Los objetos que nos rodean los *vemos* por la luz reflejada sobre sus **superficies** (interfases).



Sistemas con superficies planas

Refracción y reflexión en una superficie plana

Ley de **Snell** y de la **reflexión**: Consideremos una onda plana monocromática que incide sobre una interfase plana que separa dos medios dieléctricos de índices de refracción n y n' .

- La onda reflejada y la onda transmitida tienen la misma frecuencia, pero se propagan con velocidades diferentes.
- Ley de la reflexión:

$$\theta = \theta''$$

- Ley de la refracción de Snell:

$$n \sin \theta = n' \sin \theta'$$



Sistemas con superficies planas

Refracción y reflexión en una superficie plana

- En una interfase entre **dos dieléctricos**, cuando los ángulos θ , θ' y θ'' tienen valores pequeños (incidencia cuasi-normal), gran cantidad del flujo luminoso incidente es **refractado**. Consecuencia: Obviamos la reflexión.
- Si consideramos la interfase de un **dieléctrico** con un medio **conductor** (metal), podemos asumir que toda la energía radiante se **refleja** en la superficie plana. Consecuencia: Nos olvidamos de la refracción.

