

Duración: 2 + 2 sesiones (2 informes)

## Objetivos:

### Sesión 1-2

- Entender el concepto de polarización.
- Observar algunas materializaciones de este fenómeno (ley de Malus, ángulo de Brewster). Estudiar una lamina retardadora  $\lambda/4$ .

### Sesión 3-4

- Armar un polariscopio lineal y circular. Entender las ventajas de cada uno.
- Entender como se puede utilizar éstos para caracterizar substancias birrefringentes (películas de plástico) y materiales foto-elásticos.
- Medir la actividad óptica de una solución de azúcar.

## Bases teóricas

### Los materiales ópticos

Se puede considerar entre los materiales de interés en óptica, tres tipos de materiales transparentes:

- Los materiales de índice de refracción y coeficiente de absorción isotrópicos como el vidrio.
- Los materiales que tienen índices de refracción anisotrópicos. La velocidad con que se propaga la luz en estos materiales depende de la orientación del campo electro-magnético relativa a las direcciones preferenciales del material. Se nota una dirección de polarización **rápida** y una dirección de polarización **lenta** del material. Estos son los materiales **birrefringentes** (ver anexo). Para algunos de ellos, el índice de refracción depende de la tensión mecánica. Estos materiales llegan a ser birrefringentes cuando se les aplica esfuerzo mecánico. Los materiales que presentan esta característica son llamados **fotoelásticos**.
- Los materiales que presentan coeficiente de absorción anisotrópico. Estos materiales absorben selectivamente la componente de la onda electromagnética en una orientación específica. A estos materiales se les llama **polarizadores**.

### Concepto de polarización

Existen evidencias experimentales que han convencido a la física clásica, de que la luz puede tratarse como una onda electromagnética transversal. Una de estas evidencias es la polarización de la luz, bajo determinadas condiciones.

En rigor, una onda luminosa puede ser vista como superposición de varias ondas. Pero sin pérdida de generalidad, podemos considerarla como una superposición de dos ondas luminosas armónicas, perpendiculares, de igual vector de propagación y frecuencia (monocromáticas).

Recordemos que en este tipo de ondas, la función  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  varía sinusoidalmente con el tiempo en una dirección perpendicular a la dirección de propagación (aquí según el eje  $z$ ):

$$\vec{E}_x(z, t) = \vec{E}_{0x} e^{i\phi} \quad \text{donde: } \phi = \vec{k} \cdot \vec{z} - \omega t$$

Así los vectores constitutivos del campo eléctrico se pueden escribir:

$$\vec{E}_x(z, t) = E_{0x} e^{i(kz - \omega t)} \hat{i} \quad \text{y}$$

$$\vec{E}_y(z, t) = E_{0y} e^{i(kz - \omega t + \Delta\phi)} \hat{j}$$

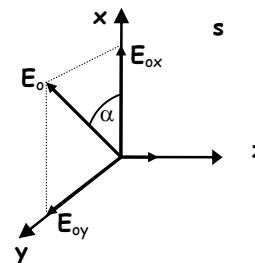


Figura G5-1 Superposición de dos ondas luminosas.

Entonces la onda resultante es:

$$\vec{E}(z, t) = \left[ \hat{i} E_{0x} e^{i\phi_x} + \hat{j} E_{0y} e^{i\phi_y} \right] \quad (1)$$

donde  $\phi_x$  y  $\phi_y$  son las fases respectivas de cada onda. Lo que también se puede expresar como.

$$\vec{E}(z, t) = E_{0x} \left[ \hat{i} + \hat{j} \frac{E_{0y}}{E_{0x}} e^{i\Delta\phi} \right] e^{i(\vec{k} \cdot \vec{z} - \omega t)} \quad (2)$$

Se puede considerar que  $E_{0x}$  y  $E_{0y}$  son las componentes de  $\vec{E}$ , desfasadas en  $\Delta\phi$ . Se dice que la onda  $\vec{E}$  está polarizada si:  $\phi_y - \phi_x \equiv \Delta\phi = \text{cte.}$  en el tiempo.

### Polarización Lineal

Si las dos ondas están **en fase** (diferencia de fases  $\Delta\phi = n\pi$ ,  $n = 0, +/-2, +/-4, \dots$ ), la resultante será una onda definida por un vector de dirección fija y de amplitud oscilante (Figura G5-2a). La onda se dice **linealmente** polarizada.

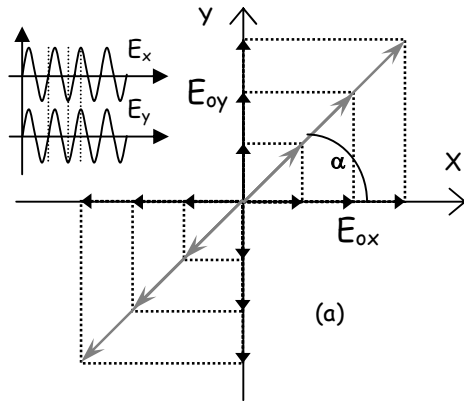


Figura G5-2a polarización lineales,  $E_x$  y  $E_y$  en fase con  $E_x = E_y$

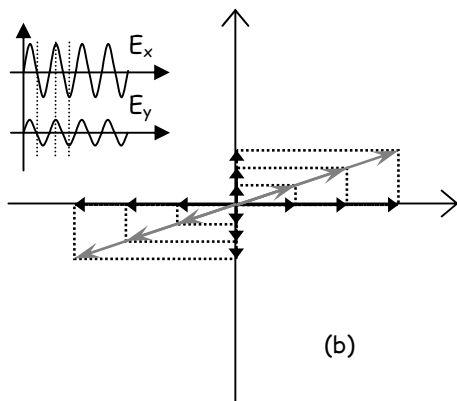


Figura G5-2b Polarización lineal,  $E_x$  y  $E_y$  en fase con  $E_x \neq E_y$

La orientación de la dirección de polarización en el plano  $(x,y)$  depende del coeficiente  $E_{oy}/E_{ox} \equiv \text{Tg}(\alpha)$  (Figura G5-2b).

Se debe notar que si  $\Delta\phi = n\pi$ , con  $n = (\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots)$ ; la nueva onda también está linealmente polarizada pero toma una dirección de polarización simétrica a la anterior relativa al eje  $i$ . Se dice que las ondas están en **oposición de fase** (Figura G5-2c).

### Polarización elíptica

Sin embargo, si la fase entre  $E_x$  y  $E_y$   $\Delta\phi \neq n\pi$  el vector resultante tendrá un comportamiento particular: su dirección cambia con el tiempo, girando en un plano perpendicular a la dirección de propagación. La polarización de la onda en este caso es elíptica (Figura G5-2d).

Se distingue la polarización derecha (horaria) y la polarización izquierda (antihoraria) según el sentido de rotación del campo electro-magnético.

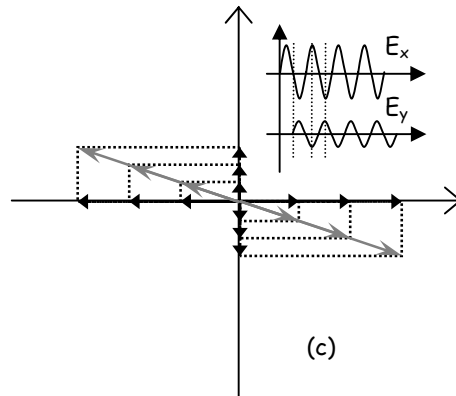


Figura G5-2c Polarización lineal en oposición de fase con  $E_x \neq E_y$

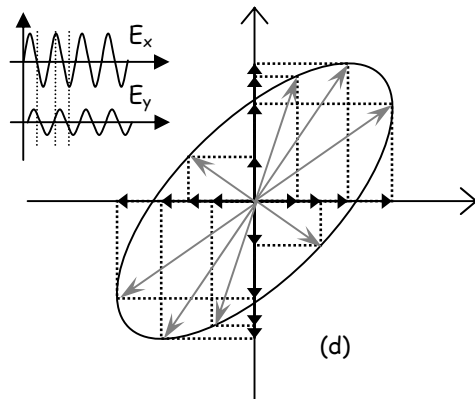


Figura G5-2d Polarización elíptica

### Polarización Circular

En particular, si la diferencia de fase es de  $\Delta\phi = \pi/2 + n\pi$  ( $n = 0, +/-1, +/-2, \dots$ ) y  $E_{ox} = E_{oy}$ , la polarización es llamada circular y el vector  $\vec{E}$  tendrá una amplitud constante (Figura G5-2e).

Aquí también, se distingue la polarización circular derecha y la polarización circular izquierda según el sentido de rotación del campo electro-magnético.

### Luz natural

Una fuente de luz ordinaria consiste en un gran número de emisores atómicos orientados aleatoriamente, emitiendo cada uno un tren de ondas polarizado durante un tiempo del orden de los  $10^{-8}$  s. Luego todas las de igual frecuencia se combinarán para formar una onda polarizada resultante que no perdurará en ese estado más de  $10^{-8}$  s. Así, constantemente se están emitiendo nuevos trenes de onda y el estado de polarización total cambia de forma totalmente impredecible.

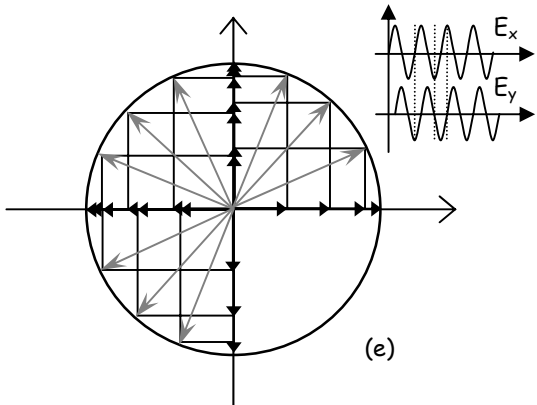


Figura G5-2e Polarización circular.

Estos cambios tienen lugar tan rápidamente que resulta imposible distinguir cualquier estado de polarización, nos referiremos a estas ondas como *luz natural*, que se puede describir matemáticamente en términos de dos ondas arbitrarias de igual amplitud linealmente polarizadas, ortogonales e incoherentes (es decir ondas para las cuales su diferencia relativa de fase varía rápidamente y al azar).

**Láminas  $\frac{\lambda}{2}$  y  $\frac{\lambda}{4}$  de onda - polarizadores**

Es posible alterar, definir o seleccionar el tipo de polarización de la luz con elementos de óptica constituidos de materiales especiales: materiales polarizadores y materiales birrefringentes.

**Láminas de  $\frac{\lambda}{2}$  y  $\frac{\lambda}{4}$  de onda.**

Las láminas de  $\frac{\lambda}{2}$  y  $\frac{\lambda}{4}$  de onda corresponden a láminas de material birrefringente. La luz polarizada en una dirección específica se propaga dentro de la lámina a una velocidad diferente que la luz polarizada perpendicularmente a esta dirección. Las láminas  $\lambda/2$  y  $\lambda/4$  tienen un espesor muy controlado introduciendo entre los ejes rápidos y lentos de polarización un retraso o desfase de  $\pi$  y  $\pi/2$  respectivamente entre cada componente. Así, una lámina de  $\lambda/4$  transforma una onda linealmente polarizada a 45 grados de sus ejes principales (rápidos y lentos) en una onda circularmente polarizada. Este tipo de lámina es de gran utilidad en algunas aplicaciones prácticas como polariscopios circulares.

**El polarizador:**

Los polarizadores son hechos de un tipo de material que absorbe la luz polarizada en una dirección específica: el eje de extinción. La luz saliendo del material será entonces linealmente polarizada en la dirección perpendicular al eje de extinción, llamado eje de transmisión (Fig. G5-3).

Una particularidad importante de los polarizadores es que cuando se disponen a lo largo de un eje óptico dos polarizadores con ejes cruzados, se produce una absorción total de la luz incidente. Esta configuración se llama configuración de extinción.

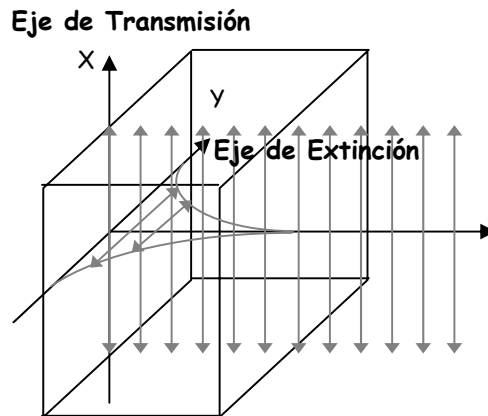


Figura G5-3 Principio de un material polarizador con su eje de transmisión paralelo a X y su eje de extinción paralelo a Y.

**Polarización por reflexión/refracción:**

**Ángulo de polarización de Brewster**

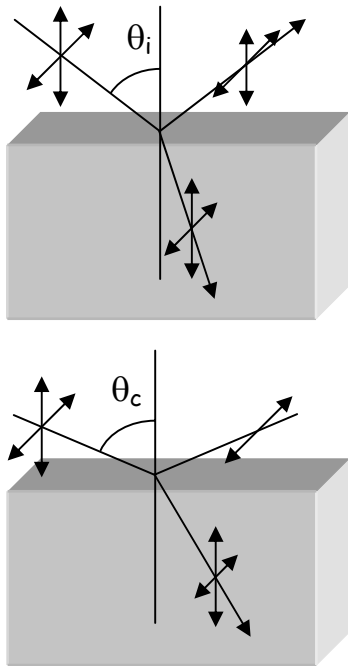
El fenómeno de reflexión a la superficie entre dos medios dieléctricos altera la polarización de la luz reflejada. Para un ángulo incidente específico, denominado Ángulo de Brewster ( $\theta_c$ ), la reflexión solo ocurre para una dirección de polarización en el plano de incidencia (formado por el haz incidente y la normal a la superficie) (Fig. G5-4). La polarización paralela al plano de incidencia (o sea, perpendicular a la superficie reflectante) no es reflejada. Este fenómeno ocurre cuando el ángulo entre los haces reflejados y refractados (transmitidos) es de  $90^\circ$ . Consecuentemente y de acuerdo a la ley de Snell, el ángulo de Brewster ( $\theta_c$ ) está relacionado con el índice de refracción del material dieléctrico.

En la incidencia de Brewster, la lámina dieléctrica corresponde a un polarizador de luz, apagando completamente una de las componentes de polarización de la luz incidente. Como aplicación, este fenómeno se utiliza para hacer ventanas ópticas de celda que transmiten la máxima intensidad de un haz polarizado y no producen pérdidas por reflexión.

**Aplicaciones:**

**El polariscopio lineal**

El polariscopio (Figura G5-5) es un instrumento que permite observar y medir el estado de polarización de objetos transparentes. Está compuesto de un polarizador lineal y de un analizador lineal. *En la práctica se distingue entre polarizador y analizador, aún que se trate de elementos ópticos idénticos: el primero, generalmente fijo, es el que define la dirección de polarización de la luz y el segundo, orientable, se utiliza para observar la rotación de la polarización.* El objeto de interés se pone entre ambos. Es conveniente cruzar los ejes de extinción del polarizador y del analizador a  $90^\circ$  para tener un fondo negro. Además, de esta forma, tenemos la certeza que los ejes de transmisión del polarizador y el analizador están perpendiculares entre sí.



**Figura G5-4** Reflexión y refracción sobre un dieléctrico. Condición de Brewster.

Un estudio cuidadoso muestra que dos condiciones llevan al fenómeno de extinción. La intensidad al salir del polariscopio se puede escribir:

$$I = I_0 \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3)$$

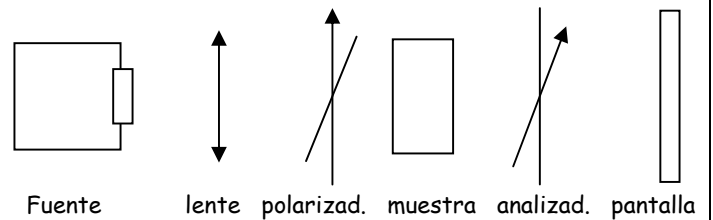
con  $\theta$  el ángulo entre el eje rápido del material birrefringente y el eje de transmisión del polarizador y  $\alpha$  el desfase angular entre las componentes rápidas y lentas de la onda.  $\alpha$  está relacionado con el retraso espacial  $\delta$  entre las componentes por:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_r - n_l) e \quad (4)$$

donde  $n_r$ ,  $n_l$  y  $e$  son los índices de refracción rápidos y lentos y el espesor del cuerpo birrefringente respectivamente.

Una condición de extinción (primer término de la relación) es independiente de la longitud de onda  $\lambda$  y produce franjas negras y claras llamadas "isoclinas".

La segunda condición (segundo término de la relación) depende del índice de refracción y consecuentemente de la longitud de onda. Las franjas de extinción de los diferentes colores aparecen en lugares distintos y son llamadas "isocromas".

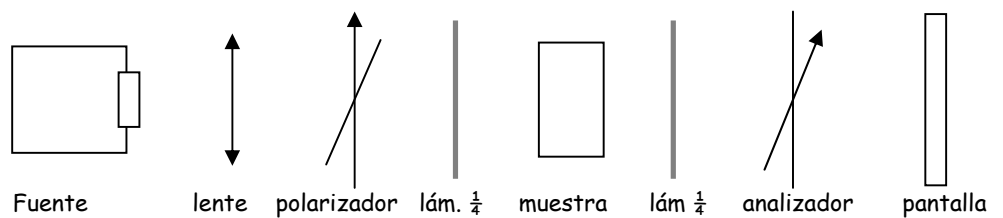


**Figura G5-5** Polariscopio lineal

**El polariscopio circular**

A diferencia del polariscopio lineal, el polariscopio circular (Figura G5-6) agrega entre los polarizadores, de cada lado de la muestra, una lamina retardadora de  $\frac{1}{4}$  de onda. De este modo, el haz que entra en la muestra estará circularmente polarizado. Las direcciones principales de las laminas  $\frac{1}{4}$  de onda deben ser orientadas a 45 grados de las direcciones de los polarizadores. Sin embargo, la imagen que se observa sigue negra cuando no hay efectos birrefringentes en la muestra. Este equipo permite una caracterización más precisa de la polarización.

En este caso, solo una condición lleva a la extinción. Solo se observan las isocromas y no más las isoclinas.



**Figura G5-6** Polariscopio circular

## Material a disposición

- 1 Lamp. De luz blanca,
- 1 láser,
- 2 Polarizadores,
- 2 laminas de  $\frac{1}{4}$  de onda,
- 1 luxómetro,
- 1 goniómetro,
- 1 cristal de calcita
- 1 bloque de vidrio,
- 1 sándwich de vidrio.

## Trabajo a efectuar

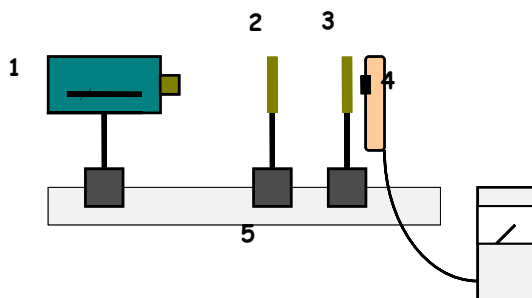
### Actividades preliminares

- Observación del estado de polarización de varios "objetos" o fuentes de luz a través de un polarizador

### Actividad 1 Polarización lineal

#### 1. Ley de Malus

Verifique la ley experimental de Malus en la forma  $I = I(\theta)$ , donde  $I$  es la irradiancia de la luz emergente del polarizador (analizador) y  $\theta$  es el ángulo entre las direcciones de transmisión de los dos polarizadores en el montaje que se muestra a continuación:



- 1 Fuente de luz natural
- 2 Polarizador
- 3 Analizador
- 4 Luxómetro
- 5 Banco óptico

#### 2. Ángulo de Brewster

Con el montaje que a continuación se presenta, observe y mida el ángulo de Brewster (usando un goniómetro) y analice la luz reflejada por una superficie dieléctrica (vidrio). Determinar la curva de polarización: intensidad de la luz polarizada (paralela y perpendicular) en función del ángulo de incidencia.

Luego reemplazar bloque de vidrio por una placa metálica (espejo metálico) y repita en la medida de lo posible lo anterior e intente una explicación de lo observado.

Por último reemplace la placa por un prisma y mida también el ángulo de Brewster, determine el índice de refracción utilizando la ley de Brewster, con sus respectivos errores y en el caso del prisma compare su resultado con el obtenido en la sesión anterior.

- Con la experiencia adquirida hasta ahora, desarrollar un montaje que le permita determinar la dirección de extinción de un polarizador lineal (Usted debe llegar con una idea de como lograrlo).
- Proponer un montaje para realizar un polariscopio lineal únicamente basado en el ángulo de Brewster.

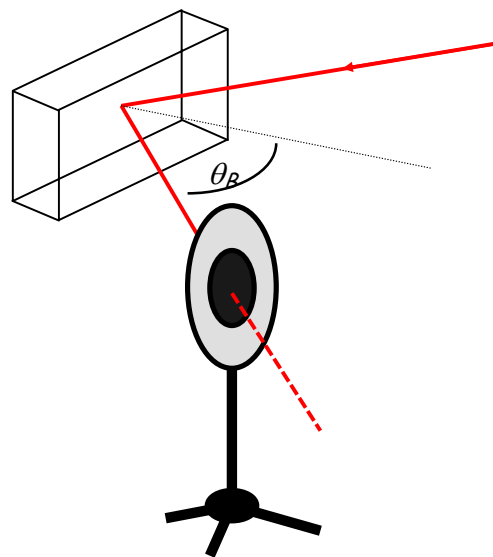


Figura G5-7 Determinación del ángulo de Brewster

### Actividad 2 Lamina $\frac{1}{4}$ de onda y polarización circular - Birrefringencia

- Armar un polariscopio lineal
- Observar los efectos de un cristal de calcita, estudiar el estado de polarización de la luz al salir de un cristal de calcita. Agregar un diafragma entre el polarizador y la calcita...
- Estudiar la birrefringencia de una lamina  $\frac{1}{4}$  de onda.
- Armar un polariscopio circular.
- Materiales birrefringentes

Observar a través de un polariscopio lineal varios materiales. Explicar los efectos en función del ángulo del material estudiado. Explicar los efectos en función del ángulo entre el polarizador y el analizador.

### Actividad 3 Películas scotch

Pegar una cinta scotch en una lámina de vidrio. Observar el efecto de polarización. Pegar otro pedazo de scotch por encima del primero, con otra inclinación. Calcular y/o deducir el efecto sobre la polarización de la luz.

### Actividad 4 Materiales foto-elásticos y ópticamente activos

Observar la polarización de materiales foto-elásticos en función de los esfuerzos mecánicos aplicados (ver anexo 2).

1. Realizar maquetas simples mostrando como se distribuyen las tensiones en el interior de un objeto en relación a esfuerzos externos.
2. Observar los cambios de polarización en objetos y/o soluciones ópticamente activos.

### Referencias

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

## Anexo 1 Materiales birrefringentes

Valores de los índices de refracción de algunos materiales birrefringentes (nr: índice rápido, ni: índice lento):

| Material         | $n_r$  | $n_l$  |
|------------------|--------|--------|
| Calcita          | 1.4864 | 1.6584 |
| Cuarzo           | 1.5443 | 1.5534 |
| Nitrato de Sodio | 1.3369 | 1.5854 |
| Hielo            | 1.309  | 1.313  |
| Turmalina        | 1.638  | 1.669  |
|                  |        |        |

## Anexo 2:

### Fotoelasticidad

Mas detalles en "Polarizacion y Fotoelasticidad"

Para algunos materiales (poliméricos), el valor del índice de refracción varia en función de las tensiones mecánicas locales o aplicadas. Se llaman estos materiales foto-elásticos. Como la tensión en cualquier punto del material es una granjeza con una orientación (vector), la tensión local en un material se define como un tensor  $\sigma_{ij}(\vec{I})$ . En consecuencia, el índice de refracción también es una granjeza tensorial. Se puede así definir un elipsoide de las tensiones y otro de los índices de refracción. Estos dos elipsoides se puede caracterizar por tres ejes principales  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$  y  $(n_1, n_2, n_3)$  y se relacionan por:

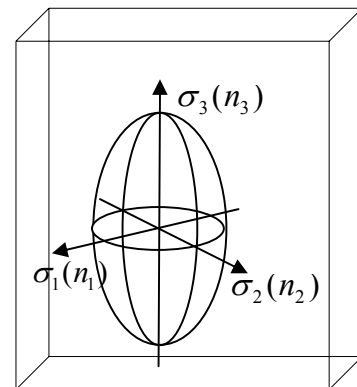
$$n_1 - n_2 = C(\sigma_1 - \sigma_2);$$

$$n_2 - n_3 = C(\sigma_2 - \sigma_3);$$

$$n_3 - n_1 = C(\sigma_3 - \sigma_1)$$

Aparece claramente que en ausencia de tensiones (aplicadas o internas), el material es ópticamente isotropito. Cuando hay tensiones, el material se torna birrefringente (termino  $\alpha$  de la ecuación 4). Hay que notar que tensiones internas, producidas por heterogeneidades o defectos del material genera localmente birrefringencia en los índices de refracción.

El material foto-elastico permite asi visualizar los esfuerzos mecánicos en una estructura.



### Anexo 3:

## Fotometría - observador patrón, Radiometría - radiador patrón

(Emiliano Galuppo)

La **radiometría** se refiere a los aspectos energéticos de la óptica. Las mediciones de las magnitudes, que en esta rama de la óptica aparecen, son obtenidas a través de la cuantificación de los efectos de la radiación en materiales sensibles (**fotosensores**). En cambio la **fotometría** se preocupa de los aspectos visuales de la óptica, siendo su aparato de medición el ojo humano. Para la visión normal, el observador patrón se caracteriza por una **curva de sensibilidad espectral**  $I(\lambda)$  (Figura G5-A1).

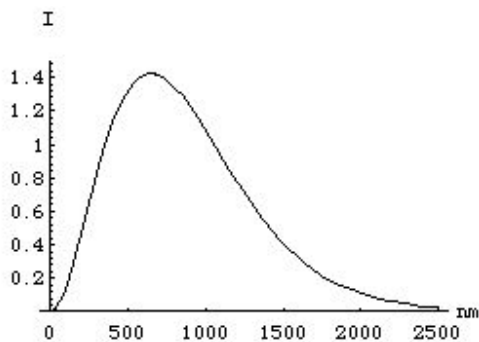


Figura G5-A1 Curva de sensibilidad del ojo humano (según [A1])

Todo cuerpo que produce energía, visible o invisible, es un radiador. Los que producen radiación propia reciben el nombre de **radiadores primarios**. Los que esparcen o difunden toda o parte de la energía recibida se llaman **radiadores secundarios**.

Las mediciones de la radiación de un cuerpo se realizan por lo general mediante comparación con los llamados **radiadores patrón**.

El único radiador del cual se sabe con exactitud como radia y su reparto energético espectral es el **cuerpo negro** o radiador completo. De este cuerpo se puede conocer su espectro completo con solo conocer su temperatura (ley de radiación de Plank [A2].)

No todo el espectro electromagnético puede ser abarcado por un solo radiador patrón. Cada rango de frecuencias (o longitud de onda) tiene sus radiadores patrón apropiados, que es el cuerpo negro a una temperatura bien determinada. La determinación experimental de estas características es bastante compleja y está debidamente normada por los organismos internacionales de pesas y medidas.

### Determinación de algunas unidades propias de la radiometría y fotometría

**Candela Internacional (cd):** La candela es una de las unidades primarias de sistema internacional de unidades (S.I.). Su definición ha sufrido múltiples modificaciones. La última, dada por la Conferencia General de Pesas y Medidas dice: "La Candela es la intensidad luminosa, en una dirección dada de una fuente que emite radiación monocromática, de frecuencia  $540 \cdot 10^{12}$  Hz y cuya intensidad energética en dicha dirección es de  $(1/683) \text{ W sr}^{-1}$ ".

**Lumen Internacional (lm):** La Conferencia General de Pesas y Medidas ha acordado la siguiente definición: "Lumen (lm) es el flujo luminoso de la radiación monocromática caracterizada por una frecuencia de  $540 \cdot 10^{12}$  Hz y por un flujo radiante de  $(1/683)$  vatios.

La frecuencia  $540 \cdot 10^{12}$  Hz equivale a una longitud de onda en aire, ( $n=1,0028$ ),  $\lambda=555 \text{ nm}$  y es la radiación de máxima eficiencia visual,  $V_{555}=1$ . Esta misma definición establece el equivalente mecánico del lumen:  $1 \text{ W}_{555} = 683 \text{ lm}$ .

#### Unidades

|                     |                         |
|---------------------|-------------------------|
| Intensidad luminosa | Candela, cd             |
| Flujo:              | Lumen, lm = cd*sr       |
| Energía:            | Lumen segundos          |
| Irradiancia:        | Lux = lm/m <sup>2</sup> |
| Luminancia:         | cd/m <sup>2</sup>       |
| Ángulo sólido       | Steradian, sr.          |

#### Equivalencias:

Nit (nt), Stilb (sb), Lambert (Lb)

$$1 \text{ nt} = 1 \text{ cd m}^{-2} ;$$

$$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} ;$$

$$1 \text{ Lb} = \pi^{-1} \text{ sb}$$

$$1 \text{ tb} = 1 \text{ lm s} ;$$

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm m}^{-2}$$

#### References:

[A1] [www.physics.uq.edu.au/ph128/6d.html](http://www.physics.uq.edu.au/ph128/6d.html)

[A2] [hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html)

**Magnitudes Radiométricas**

| Nombre                                  | Símbolo           | Relación  | Unidades S.I.                      |  |
|---|-------------------|---|------------------------------------|--|
| Energía radiante                        | $Q_e$             | Energía total ( $Q_e$ ) de la radiación está dada por:<br>$Q_e = \int_{\Delta t} \phi_e dt$     | J                                  | Energía radiante: toda aquella energía que se propaga por el espacio, ya sea considerando la forma de propagación como fotones ó como ondas electromagnéticas  |
| Corriente de radiación o flujo radiante | $\phi_e$          | $\phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$  | Watt<br>W                          | Flujo de energía o energía por unidad de tiempo<br>Propagación: "potencia emitida" ó "potencia transportada"<br>Detección: "flujo incidente"   |
| Densidad de flujo radiante              | $M_e$             | $M_e = \frac{d\phi_e}{dA^*}$  | W m <sup>-2</sup>                  | <i>Exitancia</i> radiante: Emisión o difusión de una superficie<br>Irradiancia: Recepción o detección de una superficie<br>Incidencia normal o "intensidad": en caso que la superficie del detector sea perpendicular a la radiación incidente |
| Intensidad Radiante                     | $I_e$             | $I_e = \frac{d\phi_e}{d\omega_d^\dagger}$   | W ,sr <sup>-1</sup>                | Magnitud que toma en cuenta la dependencia de $M_e$ con la posición, superficie y orientación del detector   |
| Radiancia                               | $L_e$             | $L_e = \frac{dI_e}{dS_n^\ddagger} = \frac{d\phi_e}{d\omega_f dA_n} = \frac{dM_n^\S}{d\omega_f}$ | W sr <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> | Cantidad que permite caracterizar, tomando en cuenta la dependencia de la intensidad que emite la fuente extensa, el elemento de área de esta y su orientación, respecto a un detector   |
| Exposición                              | <i>Exposición</i> | $Exp. = M_n \Delta t_{exp}$   | J m <sup>-2</sup>                  | Corresponde a la cantidad de energía radiante $Q_e$ recibida en cada unidad de área de la superficie detectora, proyectada sobre un plano perpendicular a la dirección de la radiación incidente   |

\* A : área de la superficie emisora o detectora

†  $d\omega_d = dA_n/r^2$  Ángulo sólido del detector visto desde la fuente.  $r$  es la separación fuente-detector

‡  $dS_n = dS \cos \theta_f$  ,  $\theta_f = \gamma$  : ángulo entre la normal del elemento de volumen y la dirección de propagación

§  $M_n$  : irradiancia normal, medida en el detector,  $\omega_f$  ángulo sólido subtendido desde la fuente vista desde el detector

**Magnitudes Fotométricas**

| Nombre                                 | Símbolo      | Relación  | Unidades S.I   |   |
|--|--------------|---|--|---|
| Intensidad luminosa                    | $I_v$        | $I_v = \frac{d\phi_v}{d\omega_d}$   | candela (cd) =<br>1 lm/ 1 sr                           | En general la intensidad es función de $\theta_f$ entre la normal externa a la superficie de la fuente y la dirección de emisión, en un emisor ideal se cumple la ley de Lambert:<br>$I_v(\theta_f) = I_v(0)\cos\theta_f$ |
| Flujo luminoso                         | $\phi_v$     | $\phi_v = \int I_v d\omega_d$<br>$= C \int \phi_{e\lambda} V_\lambda d\lambda^{**}$ | lm = 1cd*1 sr =<br>1 tbs <sup>-1</sup>                 | La eficiencia luminosa en general es función de la composición espectral y permite caracterizar las fuentes   |
| Eficiencia luminosa relativa espectral | $V(\lambda)$ | $V(\lambda) = K(\lambda)/K_{max}$   |  | El comportamiento del ojo humano como detector queda caracterizada por la grafica de $V(\lambda)^{\dagger\dagger}$  |
| Densidad de flujo luminoso             | $M_v$        | $M_v = d\phi_v/dS$  | lux = lm m <sup>-2</sup>                               | Cuando la superficie S se refiere al emisor (o difusor) $M_v$ se suele llamar "Exitancia luminosa", en cambio cuando S corresponde a la superficie que recibe el flujo luminoso, se habla de "Iluminancia"                |
| Radiancia luminosa o luminancia        | $L_v$        | $L_v = \frac{dI_v}{dS_n^{\dagger\dagger}}$<br>$= \frac{dM_v^{ss}}{d\omega_f}$       | nit (nt) = cd<br>m <sup>-2</sup> = lx sr <sup>-1</sup> | Si la fuente es Lambertiana $L_v = dI/dS$ , por lo tanto la luminancia no depende de la dirección en que se recibe el flujo luminoso, además se cumple $M_v = \pi L_v$ , con $M_v$ la iluminancia normal medida           |

\*\*  $\lambda$ : longitud de onda de la fuente, C: cte que depende del sistema de unidades

†† Una superficie emisora que se comporta como radiador cuerpo negro, a la temperatura de solidificación del Pt y a la presión de 101325 Pa presenta el valor  $V(\lambda_o) = 1$ , con  $\lambda_o = 550 \text{ nm}$

†† Ahora  $dS_n$  es un elemento de área de la fuente proyectada sobre un plano normal a la dirección de la radiación

ss  $M_v$ , Iluminancia normal medida con el detector, y  $\omega_f$  ángulo sólido subtendido desde la fuente extensa vista desde el detector