

## Capítulo 6

# Ondas electromagnéticas

Hasta ahora hemos trabajado con ondas mecánicas transversales (vibraciones en cuerdas) y longitudinales (ondas acústicas). En este capítulo, y durante la segunda mitad de la materia, trabajaremos con ondas electromagnéticas. Este tipo de ondas son esenciales en diversas aplicaciones cotidianas, desde la transmisión de señales de radio y televisión hasta el funcionamiento de dispositivos de comunicación inalámbrica y la luz que percibimos. En el espectro electromagnético (Fig. 6.1) se encuentran diversas categorías de radiación como radiofrecuencias, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Cada una de estas categorías tiene aplicaciones específicas y propiedades particulares que las hacen adecuadas para distintos usos tecnológicos, médicos, de comunicación y de investigación científica. En particular, en esta materia vamos a realizar experimentos empleando luz en la parte visible del espectro (o luz visible por los humanos), formada por la radiación electromagnética cuyas longitudes de onda se encuentran entre 400 y 700 nm.

Las ondas electromagnéticas son generalmente ondas transversales que se caracterizan por la propagación de energía a través del espacio, sin requerir un medio material para su transmisión, propagándose en vacío con una velocidad  $c \sim 3 \times 10^8 m/s$ . El vector de campo eléctrico puede oscilar de diversas formas en el plano perpendicular al vector de propagación, definiendo el estado de polarización (luz polarizada lineal, circular, elíptica, luz natural o luz parcialmente polarizada).

Las propiedades de propagación de la luz en materiales, están determinadas por la respuesta de los electrones en los mismos. En esta materia estudiamos solamente la respuesta lineal, pero también existen otros fenómenos muy interesantes asociados a la respuesta no lineal. El campo electromagnético que constituye a la onda interactúa con los electrones en los materiales ejerciendo fuerzas sobre estos. Los electrones en los átomos se ponen en movimiento en el campo oscilatorio de luz, desplazándose respecto a los núcleos que son

muy pesados y se mantienen quietos. El movimiento oscilatorio de los electrones genera dipolos (un desbalance de carga) oscilantes que re-irradian luz. La magnitud física que caracteriza macroscópicamente la interacción lineal con los electrones es el índice de refracción (por lineal se entiende que la polarización del material es lineal con el campo, y eso se traduce en que el desplazamiento de los electrones es proporcional al campo eléctrico de la luz).

Las propiedades de propagación más básicas son la absorción (A), transmisión (T), reflexión (R) y scattering (S), como se esquematiza en la Fig. 6.2. En general vale, por conservación de energía que  $I = R + T + A + S$ , donde  $I$  es la intensidad incidente.

Supongamos que un haz de luz incide con un ángulo  $\theta_i$  sobre una interfaz entre dos medios. Parte del haz se refleja en la superficie con un ángulo  $\theta_r$  y parte se transmite con un ángulo  $\theta_t$ . El valor de los ángulos  $\theta_t$  y  $\theta_r$  se obtienen a partir de las leyes de Snell

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_t) \quad (6.1)$$

$$\theta_r = \theta_t. \quad (6.2)$$



Figura 6.1: Esquema de los tipos de ondas y frecuencias que abarca el espectro electromagnético, donde solo una pequeña porción es visible para el ojo humano. Se muestran ejemplos de fuentes que generan esas ondas

Las ondas reflejadas y transmitidas se generan en respuesta a la oscilación de los electrones en el medio, que irradian luz al oscilar (dipolo oscilante) en presencia del campo

incidente. Al transmitirse, la luz incidente cambia de dirección porque su velocidad de propagación es menor segundo medio. Las las ondas con polarización paralela o perpendicular al plano de incidencia, se reflejan y transmiten con distinta eficiencia, que está dada por los coeficientes de Fresnel.

La absorción está relacionada con las transiciones electrónicas en los átomos. La luz puede promover electrones de un nivel energético inferior a otro de mayor energía. Luego de absorber fotones, los electrones en los átomos pueden decaer naturalmente a estados de menor energía (como siempre es conveniente), y lo pueden hacer emitiendo luz en una frecuencia distinta a la incidente (fluorescencia) o transformando esa energía en calor (o vibraciones en el material).

La dispersión de luz (scattering) sucede cuando en el medio hay partículas o moléculas cuyo tamaño es chico comparado con la longitud de onda, que provocan que la luz cambie su dirección. En el modelo microscópico de dipolos, cuando los dipolos son iluminados estos oscilan con la misma frecuencia que la luz, al estar oscilando estos emiten luz en todas las direcciones.

La luz transmitida es aquella que pudo atravesar el material, sin absorberse ni dispersarse.

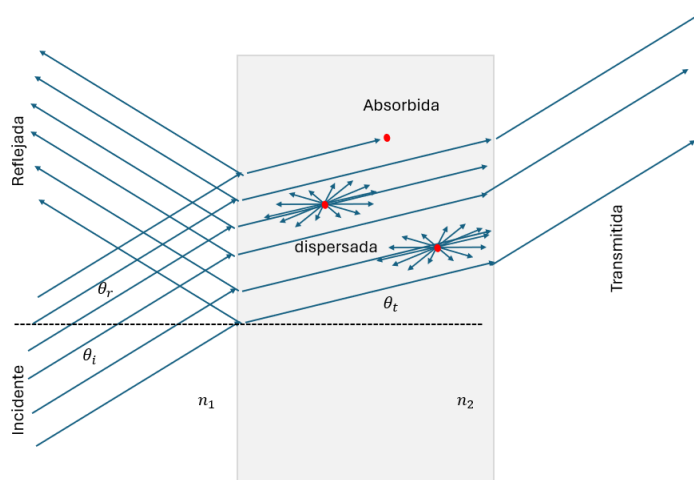


Figura 6.2: Un haz que incide en el material con un ángulo  $\theta_i$ , puede reflejarse, refractarse en su superficie. La luz refractada, puede dispersarse, absorberse o transmitirse.

## 6.1. Polarización de la luz

La luz es una onda electromagnética compuesta por campos eléctricos  $\vec{E}$  y magnéticos  $\vec{H}$  que oscilan perpendicularmente entre sí y, a su vez, éstos son perpendiculares a la

dirección de propagación, dada por el vector de ondas  $\vec{k}$ . Si la onda es monocromática (una única frecuencia) y se propaga en la dirección  $\vec{z}$ , podemos escribir al campo eléctrico como

$$\vec{E} = E_{0x} \cos(kz - wt)\hat{x} + E_{0y} \cos(kz - wt + \phi)\hat{y}. \quad (6.3)$$

En notación compleja, la ecuación anterior se puede re-escribir como

$$\vec{E} = E_{0x} e^{i(kz-wt)}\hat{x} + E_{0y} e^{i(kz-wt+\phi)}\hat{y} = e^{i(kz-wt)}(E_{0x}\hat{x} + E_{0y}e^{i\phi}\hat{y}). \quad (6.4)$$

Otra manera de visualizar esta ecuación es escribiendo las componentes cartesianas de manera vectorial, de la siguiente manera

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x} \\ E_{0y}e^{i\phi} \end{pmatrix} e^{i(kz-wt)}. \quad (6.5)$$

Una propiedad relacionado con la luz es su polarización, que se refiere a la orientación preferencial de las oscilaciones del campo eléctrico. Ver que según las ecuaciones anteriores, las componentes en  $\hat{x}$  e  $\hat{y}$  del campo eléctrico pueden oscilar con distintas amplitudes y fases. Al vector que representa la forma en que oscila el campo eléctrico, se lo llama polarización. Si fijamos valores para las amplitudes y fases en valores particulares, podemos encontrar distintos tipos de polarización, como se muestra en la figura 6.3:

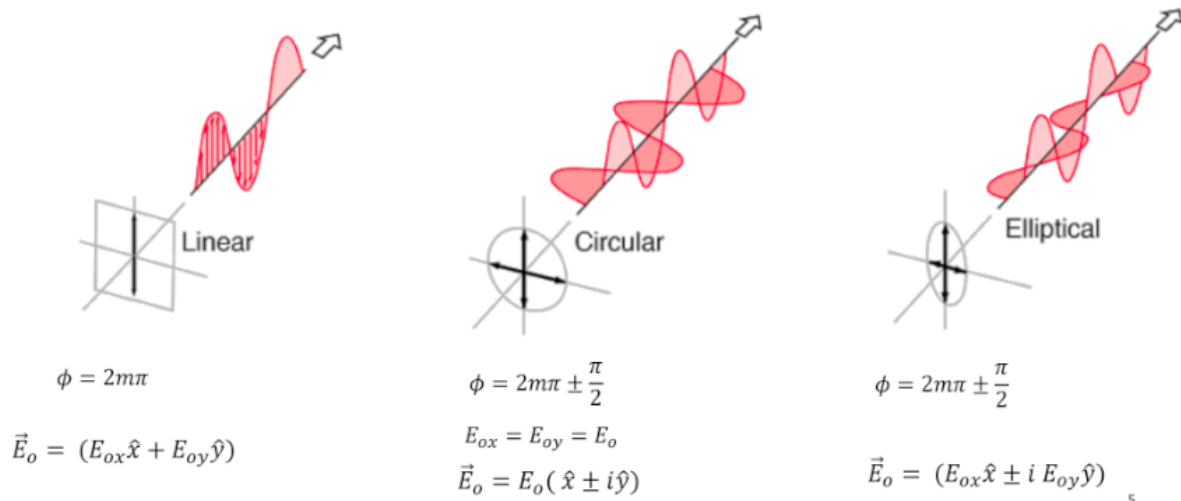


Figura 6.3: Onda electromagnética polarizada lineal, circular y elíptica, y sus respectivos vectores de polarización escritos en forma genérica.

- Polarización lineal: En la polarización lineal las oscilaciones eléctricas se realizan en un solo plano, lo que resulta en una onda que vibra en una dirección específica.

- Polarización circular: El vector de polarización oscila girando (en sentido horario o antihorario) describiendo un patrón helicoidal a medida que se propaga. En el plano perpendicular a  $\vec{k}$ , el vector de polarización describe un círculo.
- Polarización elíptica: La polarización elíptica es una combinación de la polarización lineal y circular. Las oscilaciones siguen una trayectoria elíptica a medida que se propagan. Este tipo de polarización puede ser tanto elíptica derecha como elíptica izquierda, dependiendo del sentido de giro. En el plano perpendicular a  $\vec{k}$ , el vector de polarización describe una elipse.
- Luz naturalmente polarizada (o no polarizada): Una onda electromagnética no polarizada se caracteriza por la vibración aleatoria del campo eléctrico, de manera que en los tiempos característicos de detección, no se puede determinar una dirección de oscilación particular. Ejemplos de luz naturalmente polarizada son el sol, el fuego, las lámparas de filamento y tungsteno, lámparas de gas, entre otras (ver Fig. 6.4). Por que sucede esto? porque las fuentes están compuestas por un número enorme de átomos que emiten luz. Cada átomo emite por un tiempo del orden de  $10^{-8}s$ , y el campo eléctrico emitido no tiene ninguna dirección de oscilación ni de propagación preferencial (es decir, difiere entre distintos átomos). La emisión de la fuente está formada por la superposición de las ondas emitidas por todos los átomos, con polarizaciones que cambian caóticamente, dando a lugar a un campo total que varía también aleatoriamente y se emite en todas las direcciones. Si la luz es parcialmente polarizada la amplitud en una dirección es significativamente mayor que en la otra.



Figura 6.4: Ejemplos de fuentes que producen luz natural

## 6.2. Fenómenos que polarizan la luz

La luz natural no está polarizada, pero hay ciertos fenómenos y materiales en la naturaleza que polarizan la luz. Un ejemplo son los materiales anisótropos, como la calcita.

La reflexión polariza la luz (esto es siempre cierto?). El scattering o dispersión de la luz también es un fenómeno polarizante.

### 6.2.1. Polarización por reflexión

Cuando las ondas de luz se reflejan en una superficie, pueden polarizarse parcial o totalmente según el ángulo de incidencia y las propiedades de la superficie. Supongamos que un haz de luz natural incide sobre una superficie con un ángulo de incidencia  $\theta_i$  respecto a la normal a la superficie, como se indica en la Fig.6.5a.

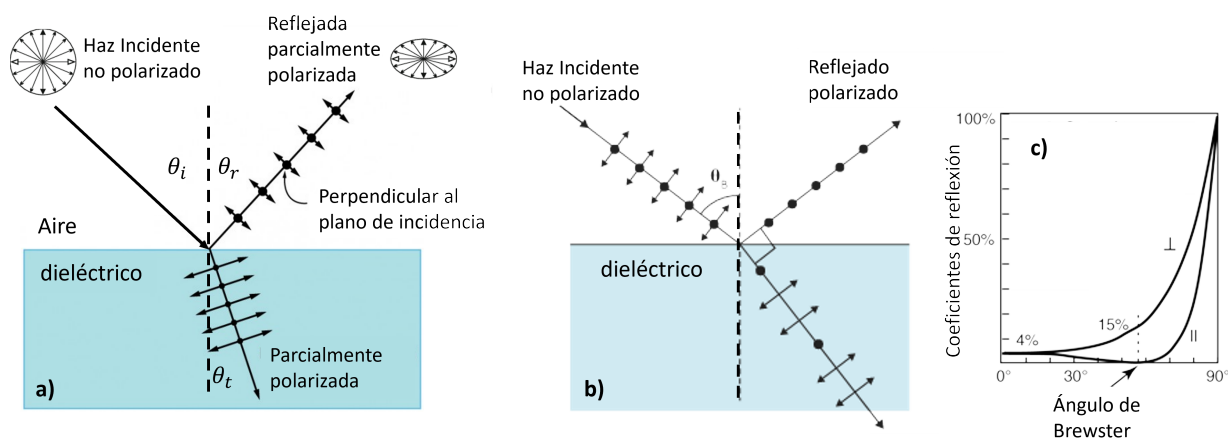


Figura 6.5: a) Esquema del plano de incidencia, indicando los ángulos intervinientes y la polarización de los haces. b) Esquema similar cuando el ángulo incidente es el de Brewster  $\theta_B$ . c) coeficientes de reflexión para las polarizaciones perpendicular y paralelas al plano de incidencia

El ángulo de Brewster ( $\theta_B$ ) es el ángulo de incidencia para el cual la luz reflejada se polariza completamente, como se muestra en la Fig. 6.5b. La polarización de la luz reflejada en ese caso es paralela a la superficie. Esto sucede debido al peculiar comportamiento de las ondas de luz y su interacción con los átomos en el material, que se ve manifestada en los coeficientes de reflexión de Fresnel (Fig. 6.5c).

En general los campos eléctricos de las ondas luminosas incidente, reflejada y transmitida, se pueden descomponer en componentes paralelas ( $E^{\parallel}$ ) y perpendiculares ( $E^{\perp}$ ) al plano de incidencia. En el ángulo de Brewster, la componente del campo eléctrico reflejado paralela al plano de incidencia  $E_R^{\parallel}$  se anula, dando como resultado una luz reflejada completamente polarizada. Por que sucede esto? Dijimos anteriormente que la luz incidente produce la oscilación de los electrones que forman dipolos en el segundo medio. Estos mismos dipolos oscilantes son los que generan la luz reflejada. Los dipolos oscilarán en la dirección de la polarización de la luz transmitida. Si la polarización de la luz transmitida  $E_T^{\parallel}$  es paralela a la dirección de propagación de la onda reflejada, estos dipolos no podrán

generar campo eléctrico reflejado con esa polarización (como veremos más abajo, los dipolos no generan radiación en la dirección de oscilación), por lo que la luz reflejada será polarizada  $E_R^\perp$ .

Entonces el efecto de polarización está influenciado por las propiedades del medio en que se propagan los haces, como su índice de refracción. En el ángulo de Brewster, el haz reflejado y transmitido forman un ángulo de  $90^\circ$ , y, esta condición junto a las leyes de Snell, permiten obtener

$$\theta_B = \arctan(n_2/n_1), \quad (6.6)$$

donde  $n_1$  es el índice de refracción del medio desde donde se incide (por ejemplo, aire) hacia el segundo medio de índice  $n_2$  (mayor que  $n_1$ ), en donde se transmiten los haces (por ejemplo, una superficie de vidrio o agua).

### 6.2.2. Polarización por dicroísmo

Los materiales dicroicos tienen la propiedad de absorber la luz de forma selectiva según sea su estado de polarización, permitiendo que solo pase la luz con una polarización específica. Principalmente existen dos tipos de materiales dicroicos según la polarización de la luz que manipulan: lineales (cuando hay una dirección lineal preferencial de absorción o transmisión) y circulares (cuando reaccionan diferente según sea la polarización circular izquierda o derecha).

Los materiales (polarizador lineal), en general, están formados por moléculas alineadas (mediante procesos de fabricación o propiedades inherentes del material) que absorben selectivamente la luz con una orientación particular del campo eléctrico (ver Fig. 6.6). La luz incide con polarización paralela al eje mayor de las moléculas es absorbida, por lo que la luz que emerge del material está polarizada en la dirección perpendicular a la de las moléculas. Quedan entonces definidos los ejes de absorción y transmisión del material. En la Fig. 6.7 se muestra el efecto de un polarizador lineal cuando sobre él incide luz natural. La luz que emerge, independientemente de la polarización incidente, es polarizada linealmente en la dirección del eje de transmisión.

En este contexto, cuando sobre el polarizador lineal incide luz linealmente polarizada (Fig. 6.8), es posible describir la relación entre la intensidad de la luz incidente y transmitida utilizando la ley de Malus

$$I = I_0 \cos^2(\theta) \quad (6.7)$$

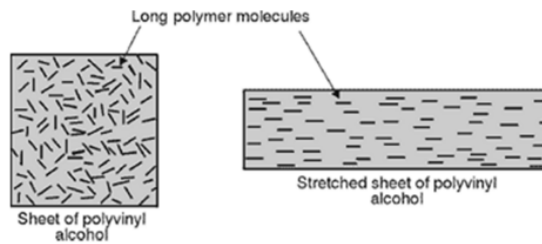


Figura 6.6: Al estirar una lámina de polyvinyl alcohol, sus moléculas se alinean generando una dirección preferencial para la absorción

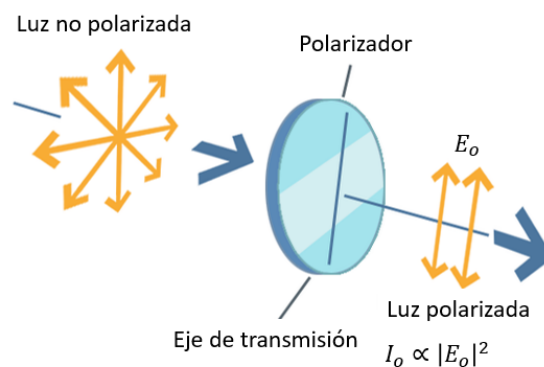


Figura 6.7: La luz naturalmente polarizada emerge del polarizador con polarización lineal, en la dirección perpendicular a la dirección de absorción

donde la intensidad de la luz transmitida ( $I$ ) es directamente proporcional a la intensidad de la luz incidente ( $I_0$ ), y un factor igual al coseno al cuadrado del ángulo ( $\theta$ ) entre la dirección de polarización del haz incidente y el eje rápido del polarizador (ver Fig.6.8).

Esta ley demuestra cómo un material dicróico lineal permite seleccionar y controlar la polarización de la luz. Por ejemplo, si el ángulo es  $\theta = 0$ , la intensidad se reduce a cero, bloqueando toda la luz que no está alineada con el polarizador. Del mismo modo, se pueden usar lentes de sol de polarizadores para anular las reflexiones que están polarizadas (aquellas cuyo ángulo de incidencia es cercano al de Brewster), como se esquematiza en la Fig. 6.9. Con este mismo truco, puedes salvarte de un ataque de cocodrilo ([ver link](#)).

**Para pensar:** Al expresar la ley de Malus, consideramos que los polarizadores son ideales, de modo que la absorción solo se da por el efecto dicróico. Como modificamos esta expresión para considerar un polarizador real? Quien debería ser  $I_o$ ?



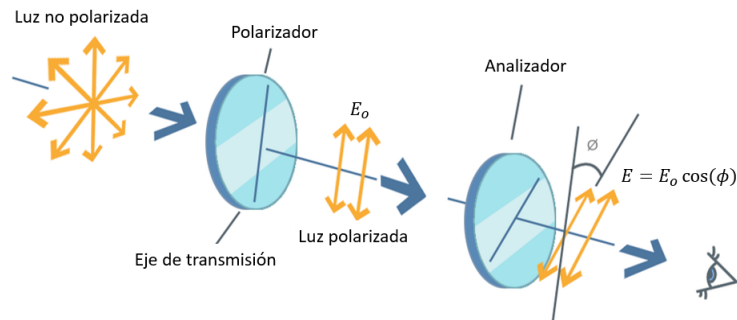


Figura 6.8: El haz incidente sobre el analizador, está linealmente polarizado en la misma dirección que el eje de transmisión del polarizador. El analizador está rotado en un ángulo  $\phi$  respecto del eje del polarizador.

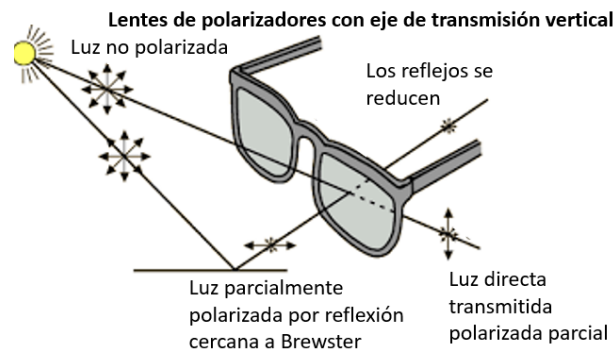


Figura 6.9: Los anteojos con vidrios polarizados permiten anular los reflejos polarizados

### 6.2.3. Polarización por dispersión (scattering)

Cuando la luz se propaga por un medio se dispersa. Si las partículas del medio tienen un tamaño comparable a la longitud de onda de la luz, este proceso se denomina dispersión o scattering de Rayleigh. Esencialmente cuando la luz incide sobre una molécula/átomo, los electrones que los constituyen oscilan con el campo electromagnético externo formando un dipolo oscilante. Este dipolo re-irradia luz, tal como lo haría una antena dipolar. Los medios en donde se dispersa la luz están compuestos por un número elevado de partículas. Debido a que las partículas están distribuidas en posiciones aleatorias, la luz dispersada por cada partícula llega al punto particular de observación con fases aleatorias, por lo tanto la radiación es incoherente y la intensidad resultante es la suma de las amplitudes al cuadrado de luz dispersada en cada partícula (sin término de interferencia). El scattering de Raileigh es inelástico, porque por las leyes de conservación la frecuencia de las ondas emitidas es igual a las incidentes. La expresión que corresponde al vector de Poynting (vector cuya dirección dice hacia donde fluye la energía, y su magnitud la intensidad) de

un dipolo oscilante es

$$\langle \mathbf{S} \rangle \sim \left( \frac{\mu_0 p_0^2 \omega^4}{32\pi^2 c} \right) \frac{\sin^2(\theta)}{r^2} \hat{\mathbf{r}}, \quad (6.8)$$

donde  $p_0$  es el momento dipolar y  $c$  la velocidad de la luz en vacío. Observemos algunas cuestiones importantes. En primer lugar, el módulo del vector de Poynting es directamente (inversamente) proporcional con la frecuencia (longitud de onda) a la cuarta. En segundo lugar, depende inversamente de la distancia al cuadrado y tiene simetría asimutal (no depende del ángulo asimutal polar). Además, depende del  $\sin^2(\theta)$ , o sea tiene una dirección de emisión preferencial: la emisión es máxima cuando  $\theta = \pi/2$ , mínima cuando  $\theta = 0$ , o sea en la dirección de oscilación del dipolo. En la Fig. 6.10 se observa el patrón de radiación de un dipolo, que se obtiene a partir de los campos electromagnéticos. Notar que, la emisión tiene simetría asimutal, y en la dirección de oscilación del dipolo (flechita) no hay emisión.

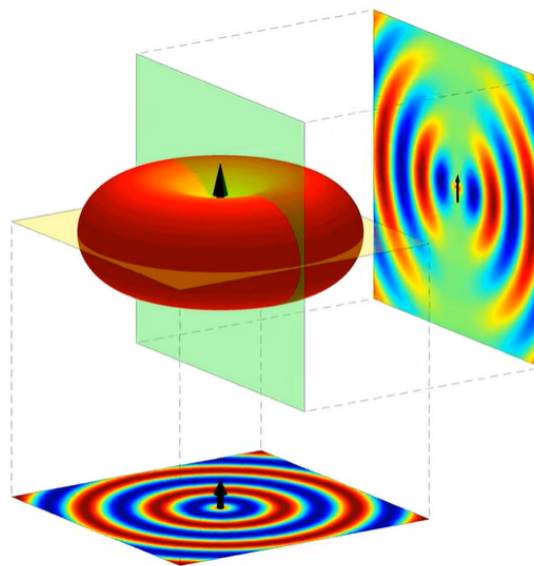


Figura 6.10: Simulación de el campo electromagnético irradiado por un dipolo. Se observa que no emite en la dirección de oscilación, tiene simetría acimutal, y emite preferencialmente en la dirección perpendicular a la de oscilación. Gráfico adaptado de [este video](#).

A partir de estos conceptos, podemos entender por ejemplo, cual es el color del cielo y cual es su polarización.

La dependencia de la longitud de onda ( $\sim 1/\lambda^4$ ) de este tipo de dispersión es responsable de los cielos azules y los atardeceres rojos, como se esquematiza en la Fig.6.11. Las longitudes de onda más cortas (azules) se dispersan mucho más que las largas (rojas). El

sol emite luz blanca (en todo el espectro visible) y la luz tiene que atravesar la atmósfera para llegar a nosotros. Cuando el sol está alto (por ejemplo al medio día) la luz recorre una capa relativamente angosta en la atmósfera. La mayor parte del espectro visible puede recorrer mayor distancia sin desviar su recorrido, pero las ondas en el espectro azul se dispersan en todas las direcciones. Por ese motivo vemos al sol casi blanco, y alrededor vemos al cielo celeste. En cambio al atardecer, el sol está en su posición baja, por lo que la luz recorre una distancia mucho mayor en la atmósfera. Los haces azules se dispersan cambiando su recorrido, pero la distancia que tienen que recorrer es tan grande, que prácticamente no llegan al observador. De este modo, vemos el cielo anaranjado.

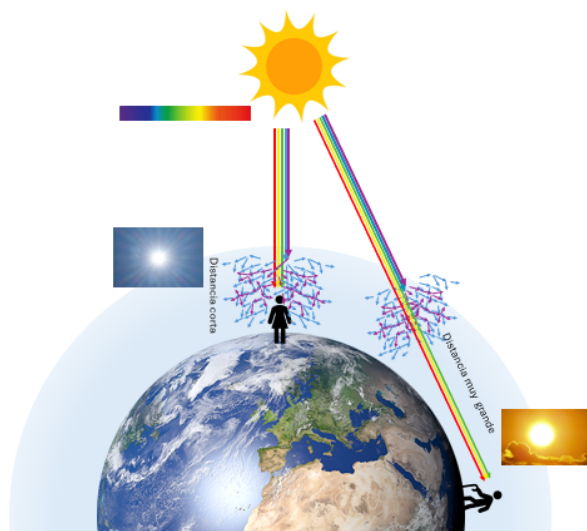


Figura 6.11: La dispersión de Raileigh es responsable de que veamos el cielo azul durante el día y naranja al atardecer

Consideremos ahora la polarización de la luz del sol (no polarizada) entrando a la atmósfera terrestre. La fuente está tan lejos que podemos considerar a los haces incidentes sobre la tierra paralelos, o casi paralelos (una onda plana no polarizada). Nuevamente consideremos dos situaciones esquematizadas en la Fig. 6.12. Los haces que entran a la atmósfera por el camino 1, inciden normalmente sobre el observador (gorro rojo). Como ya vimos lo haces azules se dispersan más que los rojos, pero en lo que respecta a la polarización, la luz continua siendo no polarizada. Los haces que recorren el camino 2, son observados perpendicularmente a su vector de propagación. Podemos descomponer a la polarización en dos direcciones, paralela a la dirección de observación (línea punteada roja) o perpendicular a la misma. Ahora recordemos, que al inicio de esta sección se mostró que la emisión dipolar es simétrica alrededor del dipolo, y que no hay emisión en la dirección del dipolo. Por ese motivo, la componente de polarización paralela a la

línea roja, no puede generar emisión de luz, mientras que la otra sí. De este modo, la luz dispersa, observada normal a la dirección de propagación del haz incidente, es polarizada. Estrictamente, la intensidad de la onda dispersada con la polarización indicada con la flechita (paralela al papel), disminuye como  $\cos^2\theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo de observación. Además, como hay un sin fin de centros de scattering, en realidad la luz será siempre parcialmente polarizada.

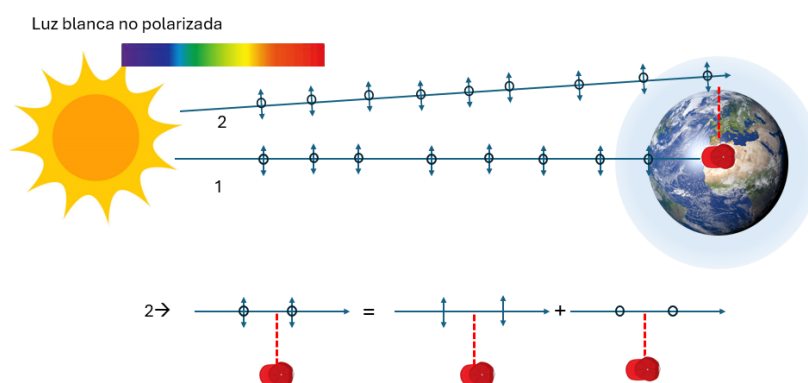


Figura 6.12: Análisis de la polarización de la luz dispersada. En incidencia normal sobre nuestros ojos, la luz tiene polarización natural. Si miramos perpendicular a la dirección de propagación, la luz es polarizada.

#### 6.2.4. Polarización por birrefringencia

La birrefringencia, o doble refracción, es un fenómeno que se presenta en cristales no cúbicos como la calcita o en plásticos sometidos a tensión. Debido a su estructura atómica estos materiales son anisótropos y la velocidad de la luz depende de su dirección de propagación a través del material. El rayo incidente al pasar por la calcita se separa en dos rayos, llamados ordinario ( $o$ ) y extraordinario ( $e$ ), el rayo  $e$  se desvía más que el  $o$  (Fig. 6.13a).

El eje óptico en cristales uniaxiales está dado por el eje de simetría del cristal. El plano principal es el plano que contiene al eje óptico (Fig. 6.13a en gris). Supongamos un haz que incide perpendicular a la superficie del cristal. Podemos separarlo por polarización según sea paralela o perpendicular al plano principal, como se muestra en la Fig. 6.13a,b. El haz ordinario, viaja con su polarización perpendicular al plano principal (y por lo tanto perpendicular al eje óptico), no se desvía y viaja con velocidad  $v_{\perp} = c/n_o$ . En cambio el haz extraordinario, tiene polarización paralela al plano principal. Entonces, el campo

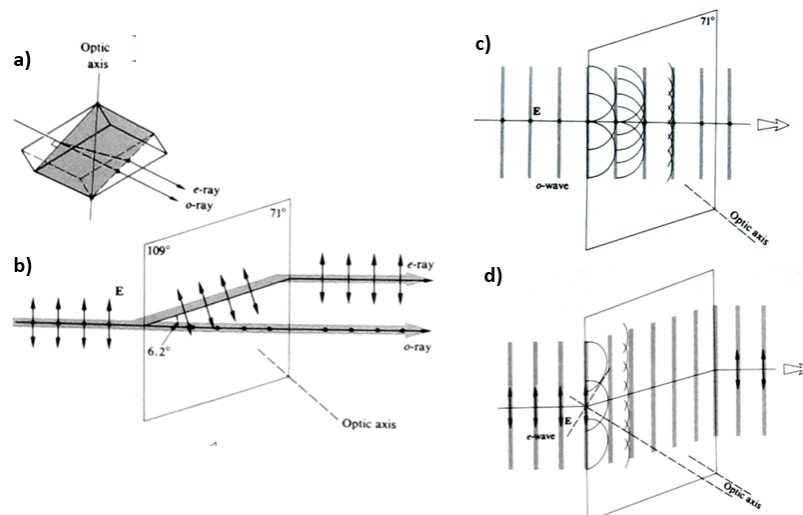


Figura 6.13: Esquema de la lámina birefringente uniaxial, en donde se observa el plano principal (a), y la refracción de los haces ordinario y extraordinario (b), mostrando además los casos separados para el haz ordinario (c) y extraordinario (d).

eléctrico se puede descomponer según sea paralelo o perpendicular al eje óptico. Si es perpendicular al eje óptico, viaja con  $v_{\perp} = c/n_o$ . Si es paralelo al eje óptico viaja con  $v_{\parallel} = c/n_e$ . Por ello, se desvía. Como consecuencia, al colocar una calcita sobre un papel escrito, se producen imágenes dobles, polarizadas perpendicularmente (Fig. 6.14).

**Para pensar antes de la clase:** En la clase vas a tener disponibles calcitas y polarizadores y algunos objetos por descubrir. Te proponemos pensar en algunos experimentos:

- Que experimento podés hacer para estudiar la polarización por reflexión? - Como determinarías cual es el eje de transmisión del polarizador?
- Que experimento podes hacer para estudiar si la luz dispersada es parcialmente polarizada?.
- Como están polarizados los haces ordinario y extraordinario en la calcita?



Figura 6.14: Dobles refracciones en la calcita

### 6.3. Detectores de luz

Existen numerosos dispositivos capaces de detectar luz, y convertirla en señales eléctricas. Entre ellos encontramos a los fotodiodos, fotoresistencias, fototransistores, cámaras CCD/CMOS, etc (Fig. 6.15). En la segunda parte de la materia usaremos fotodiodos y CCDs (detectores 2D que contienen NxM fotodiodos).



Figura 6.15: Ejemplos de distintos detectores de luz

Los fotodiodos son detectores que se basan en la tecnología de los semiconductores. Al absorber un fotón de luz con determinada energía, electrones que están en la banda de valencia del material son promovidos a la banda de conducción. Esos electrones pueden ahora transportarse en el circuito eléctrico de medición generando de una corriente que es posible medir. La relación  $R = P/I$  entre la potencia lumínica absorbida  $P[W]$  (energía/tiempo) y la corriente generada  $I[A]$  se conoce como responsividad, fotosensitividad, respuesta espectral, etc, depende de la longitud de onda (energía de los fotones) y del material del fotodiodo (Fig. 6.16). Como se puede observar en la figura, existen fotodiodos con respuesta en diversos rangos espectrales según el material del que estén constituidos.

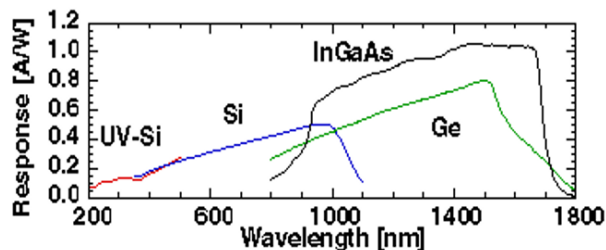


Figura 6.16: Responsividad típica en A/W para distintos materiales en función de la longitud de onda

La mínima corriente que puedo medir, se conoce como corriente de oscuridad ( $I_{dark}$ ), y está generada esencialmente por el movimiento térmico de los electrones. Por otra parte, la relación entre la potencia lumínica  $P(W)$  o la intensidad  $I(Wcm^{-2})$  y la señal medida en el fotodiodo, depende del circuito al que este esté conectado, pero típicamente tiene un comportamiento lineal y una saturación ( $I_{sat}$ ) (6.17).

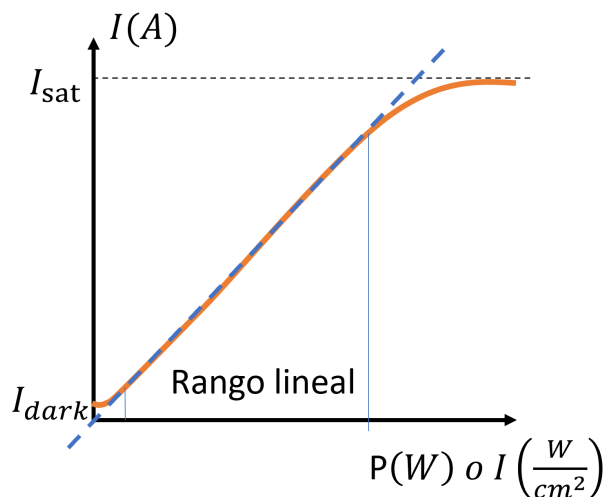


Figura 6.17: Esquema de la corriente (en A) típica medida en un fotodiodo, en función de la potencia o intensidad incidente

**Pensar un experimento:** Si queremos hacer experimentos con los fotodiodos detectando variaciones de intensidad y queremos hacer estudios comparativos, necesitamos saber como es la calibración de corriente en función de intensidad de luz. Para esto necesitamos generar variaciones conocidas de intensidad. Que fenómeno

o elementos ópticos podés usar para variar la intensidad controladamente? Como harías entonces el experimento?

## 6.4. Características de los láseres

En esta parte de la materia vamos a estudiar algunas características de los láseres. La palabra láser es en realidad un acrónimo que significa Light Amplification by Stimulated Emission Of Radiation. En líneas generales, un láser está compuesto por un medio activo o de amplificación, un bombeo y una cavidad resonante, como se esquematiza en la Fig. 6.18. El bombeo, puede ser eléctrico (como en los punteros láser) u óptico (una lámpara flash u otro láser). Su función es proveer energía al medio activo. El medio activo es típicamente un material que es capaz de amplificar luz. La conservación del momento de los fotones hace que las ondas que se generan en el medio estén en fase con las ondas incidentes, por lo que la radiación láser resulta **coherente**. Además, como solo algunos niveles de energía del material son capaces de generar amplificación, la emisión es muy **monocromática**.

La cavidad resonante, es una cavidad óptica, como por ejemplo una cavidad de Fabry Perot que está formada por dos espejos (uno de ellos tiene alta reflectividad, el otro deja salir un porcentaje pequeño de la luz presente en la cavidad). La cavidad se usa principalmente para acumular energía hasta que las condiciones de laseo se cumplan y el láser empiece a funcionar: esto es que la ganancia que provee el medio activo, supere las pérdidas dentro de la cavidad (reflectividad en los espejos, absorción en los materiales). La luz puede reflejarse sucesivas veces solo en la dirección perpendicular a los espejos, un haz que está desviado respecto a esa dirección, va a salir de la cavidad luego de algunas reflexiones. Es por esto, que la amplificación se da principalmente en esa dirección, y por lo tanto el láser sale de la cavidad **colimado**, con una divergencia muy pequeña ( $< 10\text{mrad}$ ). En la Fig. 6.19a, podemos ver un esquema de un láser en donde se observa que el haz láser y se va expandiendo a medida que se propaga. La **polarización** en los láseres típicamente se obtiene poniendo una ventana (vidrio con gran calidad óptica y transparente) en ángulo de Brewster dentro de la cavidad o usando como bombeo un láser polarizado.

Tal como vimos en las prácticas de ondas estacionarias (cuerdas y tubos), en una cavidad óptica también tenemos modos porque la luz está confinada entre dos espejos; en este caso hablamos de modos longitudinales. Los modos longitudinales que pueden propagarse en la cavidad son aquellos que además tengan frecuencias en el espectro de



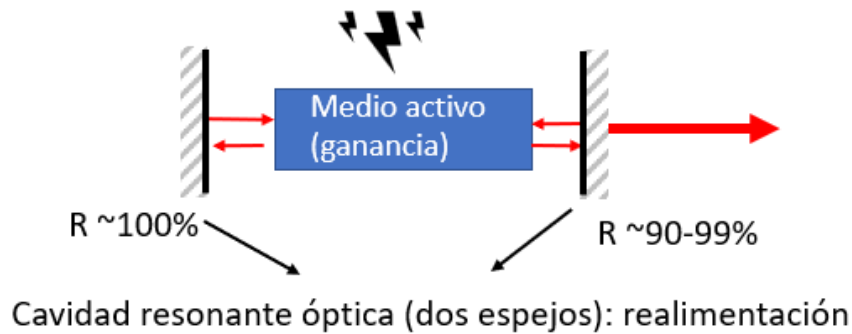


Figura 6.18: Esquema simplificado de un láser, en donde se muestra una cavidad óptica formada por dos espejos, un medio activo o amplificador. El haz láser emerge de la cavidad colimado.

ganancia del medio activo, las ondas con frecuencias fuera del espectro de ganancia no son amplificadas. Además, como los espejos tienen un tamaño finito, la luz también está confinada en la dirección perpendicular a la de la cavidad. Por tal motivo, aparecen también los modos transversales, que son quienes le dan la estructura a la distribución de intensidad en el plano perpendicular a la dirección de propagación. El modo más bajo, se conoce como  $TEM_{00}$  y tiene forma de una función gaussiana (modo gaussiano). Por esta razón, si ponemos un papel en frente del láser vemos una distribución espacial de intensidad como la que se observa en la Fig. 6.19b. Si graficamos la intensidad sobre un corte de esa figura (línea blanca), observamos que la forma funcional es gaussiana, como se muestra en la Fig. 6.19c.

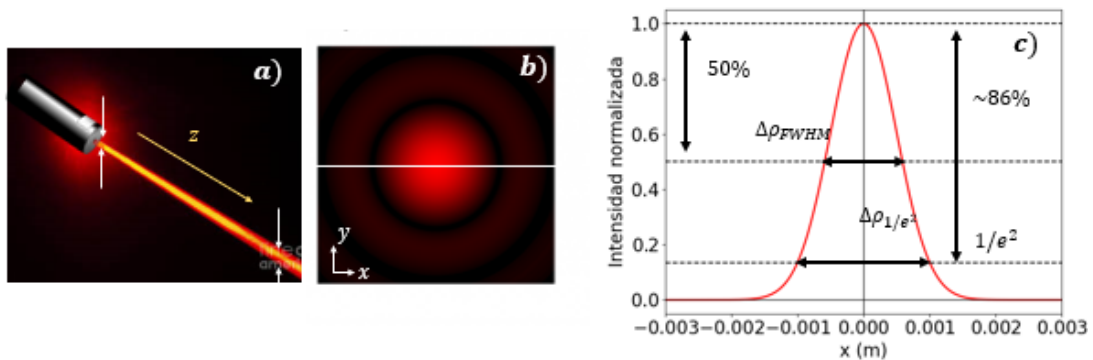


Figura 6.19: Esquema de un láser que se propaga (a), y como lo observaríamos cuando este incide normalmente sobre una pantalla b). c) Perfil sobre la línea blanca de la figura b)

La expresión de la intensidad de un haz gaussiano que se propaga en la dirección  $z$  se puede escribir como

$$I(r, z) = I_o \left( \frac{\omega_o}{\omega(z)} \right)^2 e^{-\frac{2r^2}{\omega(z)^2}} \quad (6.9)$$

donde  $I_o$  la intensidad máxima cuando  $z = 0$ ,  $\omega_o$  es el tamaño de la cintura del haz (el tamaño transversal más chico del haz),  $r^2 = x^2 + y^2$  es la distancia medida desde el centro del haz, y  $\omega(z)$  el tamaño del haz a medida que este se propaga, y viene dado por la expresión

$$\omega(z) = \sqrt{1 + \frac{z_r}{z}} \quad (6.10)$$

donde  $z_r = \pi\omega_o/\lambda$  se conoce como parámetro de Rayleigh o confocal, que es la distancia longitudinal en la que el haz se mantiene enfocado. En la Fig. 6.20a se observa un corte a lo largo de la dirección  $z$ , en donde se esquematizan los parámetros mencionados. Además se observa en los perfiles de intensidad en distintas posiciones a lo largo del eje  $z$  (Figs. 6.20b-d) que a medida que nos alejamos de la posición en donde se encuentra la cintura (Fig.6.20b), el haz gaussiano se achata en intensidad y se ensancha. Se puede hallar una expresión para la divergencia dada por  $\theta = \lambda/\pi\omega_o$ , pero experimentalmente conviene usar otras formas de medir, como se verá más adelante.

Podemos definir algunos parámetros para caracterizar el ancho de la distribución de intensidad. Una forma es a partir de medir el ancho de la gaussiana a la mitad de su altura (ancho mitad altura (FWHM)), es decir el ancho cuando  $I(r, z) = I_{max}/2$ , donde  $I_{max}$  es la intensidad máxima, obteniéndose

$$\Delta\rho_{FWHM} = \frac{1}{2}\sqrt{2\ln(2)}\omega(z) \quad (6.11)$$

Otra forma puede ser medir el ancho cuando la intensidad cae en  $1/e^2$ , que representa aproximadamente el 86 % de la intensidad, es decir cuando  $I(r, z) = I_{max}/e^2$ , a partir de lo que se obtiene que

$$\Delta\rho_{1/e^2} = 2\omega(z) \quad (6.12)$$

En resumen, los láseres se caracterizan por ser:

- Direccionales
- Colimados (divergencia 1-10 mrad)
- Monocromáticos
- Coherentes
- Polarizados (la mayor parte de los casos)

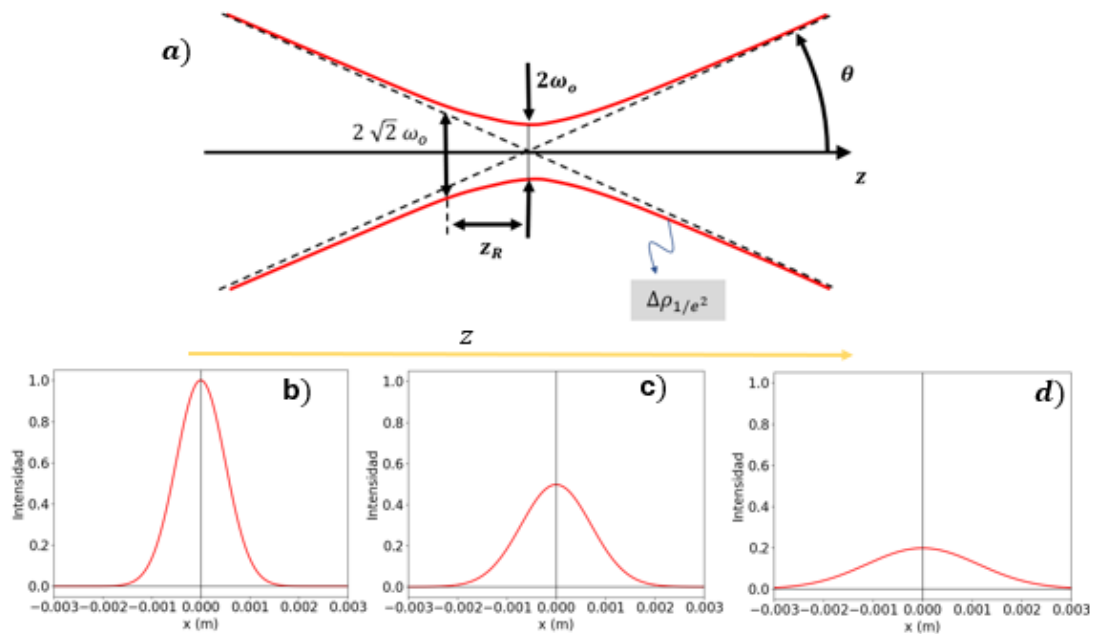


Figura 6.20: a) Corte longitudinal de un haz gaussiano, en donde se muestra la cintura de tamaño  $\sim 2\omega_0$ , divergencia  $\theta$  y parametro de Raileigh  $z_r$ . b-d) Perfil del haz para posiciones que se alejan de la cintura.

- Típicamente gaussianos.
- Estabilidad temporal (esta es nueva :))

En consecuencia de la direccionalidad y colimación, toda su potencia ( $P$ ), está concentra en un área  $A$  pequeña, y en un ángulo sólido  $\Omega$  que es también muy pequeño. Por ese motivo, tiene gran brillo

$$B = \frac{P}{A\Omega} \left[ \frac{W}{cm^2 sr} \right]. \quad (6.13)$$

Veamos como caracterizar algunas de las magnitudes descriptas anteriormente: colimación, polarización, distribución espacial de intensidad, estabilidad temporal, divergencia. Dejamos para más adelante la coherencia y monocromaticidad (espectro).

### 6.4.1. Polarización

Para estudiar la polarización del láser, podemos emplear un polarizador lineal y caracterizar el **contraste o grado de polarización**. Supongamos que tenemos una fuente de luz, cuya polarización es quasi lineal (una elipse con su eje mayor mucho más grande que el menor). Si usamos al analizador podemos determinar dos intensidades:

1. La intensidad máxima  $I_{max}$  que corresponde al eje del analizador paralelo al eje mayor.

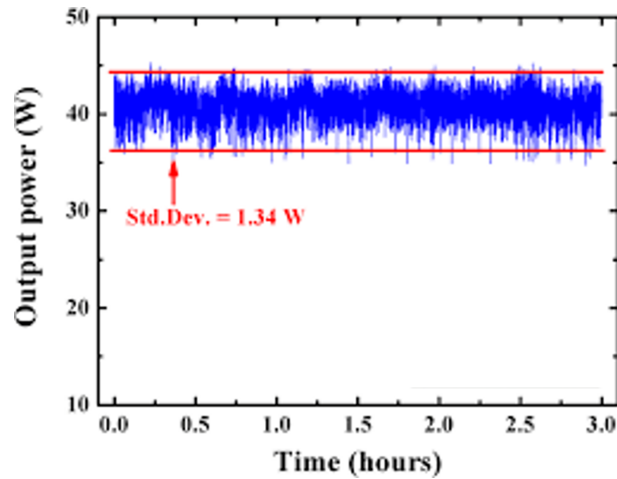


Figura 6.21: Medición típica de la potencia del láser en función del tiempo

2. La intensidad mínima  $I_{min}$ , que corresponde aleje del analizador paralelo al eje menor.

A modo de cuantificar la linealidad en la polarización, definimos como contraste de polarización a

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}. \quad (6.14)$$

Cuanto más cercano a 1 sea ese número, más lineal es la polarización.

### 6.4.2. Estabilidad Temporal

La estabilidad temporal en un láser continuo, significa que su potencia o intensidad se mantiene estable en el tiempo. Las causas de falta de estabilidad del láser pueden ser externas como las variaciones de temperatura, humedad, vibraciones, fluctuaciones de la fuente de alimentación; como internas, como la competencia de modos, la realimentación, el desgaste por años de uso.

Si tenemos un detector de luz con resolución temporal adecuada, simplemente podemos medir en el tiempo como fluctúa la señal medida durante un tiempo determinado. Supongamos que medimos algo similar a lo que se observa en la Fig. 6.21. Podemos caracterizar estas fluctuaciones con su amplitud rms ( $\Delta V_{RMS}$ ) respecto a la amplitud media. La estabilidad pico a pico se refiere a la diferencia porcentual entre el valor máximo y mínimo de la potencia o energía de salida y el valor promedio de la potencia o energía. También podemos caracterizar las fluctuaciones de la señal  $\Delta V$  en comparación con el valor medio  $V$ , para saber si estas son importantes o no, definiendo la relación señal-ruido

$$SNR = \frac{V}{\Delta V} \quad (6.15)$$

### 6.4.3. Distribución espacial de intensidad

Para caracterizar como es la distribución de intensidad en la dirección transversal a la propagación, podemos usar varias técnicas. Ambas necesitan de detectores calibrados en intensidad.

**Cámara.** Se puede usar una cámara para tomar una foto de la distribución espacial de intensidades. Se puede sacar la foto del láser incidiendo sobre un papel y tomar una escala para calibrar pixel en distancia. Si quiero hacer mediciones comparativas en intensidad, además necesito hacer una calibración en intensidades. Como lo harías?

**Método de la gillete o del borde filoso.** Se puede determinar como varía la intensidad en una dirección empleando un dispositivo como el que se muestra en la Fig. 6.22. Un borde filoso interrumpe el haz, dejando pasar otra parte del mismo que es colectada en un detector. Para asegurar que toda la luz sea colectada, también se puede usar una lente entre el borde filoso y el detector. El borde filoso se encuentra ubicado sobre un posicionador con tornillo micrométrico (unidad de traslación), de manera que es posible desplazarlo a través del haz y medir la intensidad en cada posición.

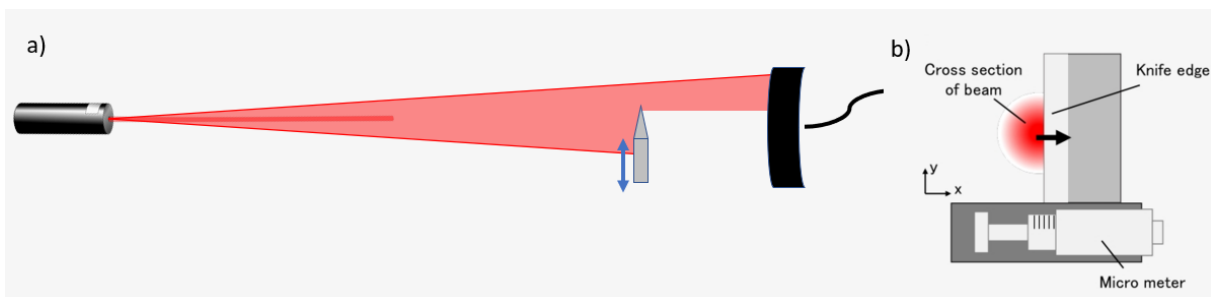


Figura 6.22: Esquema experimental para la medición del perfil del haz empleando la técnica del borde filoso.

La cuestión está ahora en entender cual es el resultado de esa medición. En primer lugar observamos que si tenemos totalmente tapado el haz, no medimos señal. A medida que vamos destapando el haz cada vez medimos una señal mayor, hasta que está totalmente destapado y medimos la señal máxima. Este procedimiento, por el cual se va sumando acumulativamente la intensidad para posiciones en aumento del borde filoso, es justamente lo que hace la operación integral. Es decir, lo que estamos midiendo, es la integral del perfil de intensidad. Por lo tanto podemos escribir a la señal medida como la integral de una gaussiana

$$P(x) = \frac{P_{max}}{2}(1 - erf(\sqrt{2}x/\omega)) \quad (6.16)$$

y tomando la derivada  $dP(x)/dx$  obtenemos  $I(x) = I_{max}exp(-2x^2/\omega)$

**Pensar:** Desde el punto de vista del análisis de datos, conviene derivar los datos o ajustar por la expresión integral? Por que?

#### 6.4.4. Divergencia

La divergencia es el ángulo con el cual el haz se abre a medida que se propaga. Como vimos anteriormente este ángulo se relaciona con el tamaño de la cintura del haz: cuanto más chica la cintura, mayor divergencia (te suena difracción?). El problema que tenemos con los láseres, es que es difícil determinar en donde está la cintura, ya que el parámetro confocal es muy largo (sino no estaría casi colimado por distancias muy largas). Para determinar la divergencia, entonces necesitamos realizar dos mediciones muy distantes del tamaño del haz y emplear argumentos geométricos. Como lo harías?

##### **Resumen de la clase 1 óptica:**

- Tendrás disponibles polarizadores, cristales birrefringentes, polímeros deformados, filtros, etc.
- Podrás analizar con dichos elementos los fenómenos que polarizan la luz.
- Caracterizarás la respuesta de detectores de luz en función de la intensidad incidente.
- Caracterizarás un láser: polarización, distribución espacial de intensidad, estabilidad temporal, divergencia.