

SESIÓN 9:

POLARIZACIÓN POR REFLEXIÓN. INTERFERÓMETRO DE MICHELSON

TRABAJO PREVIO: POLARIZACIÓN POR REFLEXIÓN

○ CONCEPTOS FUNDAMENTALES

- **Luz natural**

Luz con el vector eléctrico vibrando en todas las direcciones del plano perpendicular a la dirección de propagación.

- **Estados de polarización de la luz**

Son los estados obtenidos por superposición de ondas electromagnéticas luminosas de la misma frecuencia cuyos vectores eléctricos vibran en direcciones perpendiculares. Clasificación de los estados puros de polarización:

- Luz linealmente polarizada

El vector eléctrico vibrando según una única dirección. Es equivalente a superposición de dos ondas luminosas de la misma frecuencia con vectores perpendiculares, desfasadas 0 o π radianes. Se adopta el convenio de cargar la fase sobre la componente y ($\Delta\Phi = \Phi_y - \Phi_x$). En la figura 9.1 se muestran una vista frontal de una luz linealmente polarizada cuya dirección de vibración forma un ángulo α con el eje x (izquierda) y una vista completa de una luz linealmente polarizada vibrando según el eje y (derecha).

Desfase 0 (vibración en 1º y 3º cuadrantes)

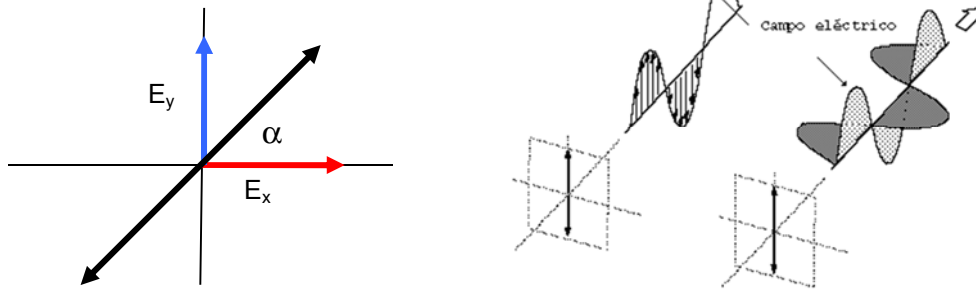


Figura 9.1. Luz linealmente polarizada.

➤ Luz elípticamente polarizada

Luz cuyo extremo del vector eléctrico describe una trayectoria elíptica. Es equivalente a la superposición de dos ondas luminosas de la misma frecuencia con vectores eléctricos perpendiculares desfasados un ángulo entre 0 y π (sentido horario o *dextrógiro* de giro sobre la elipse) o entre π y 2π (sentido antihorario o *levógiro* de giro sobre la elipse). En la figura 9.2 vemos tres fases consecutivas de movimiento en vista frontal para un desfase de $\pi/2$ (izquierda) y una vista completa de una luz polarizada elíptica con desfase de $3\pi/2$ (derecha).

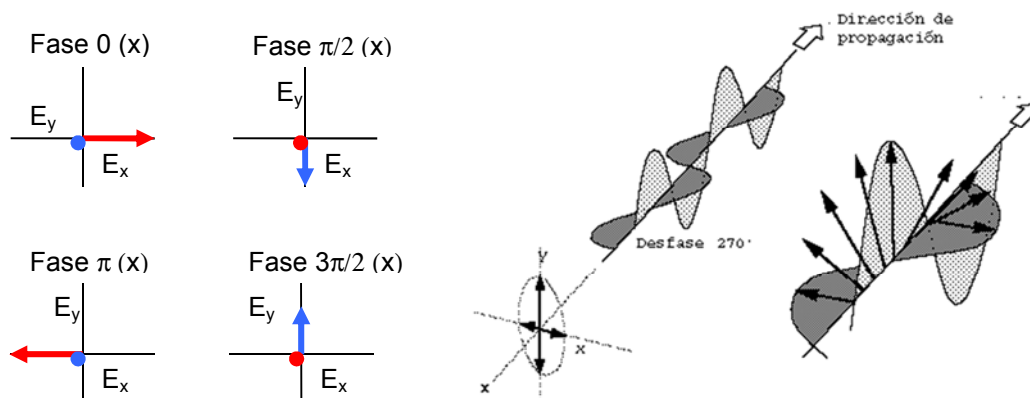


Figura 9.2. Luz elípticamente polarizada.

➤ Luz circularmente polarizada

Luz cuyo extremo del vector eléctrico describe una trayectoria circular. Es equivalente a la superposición de dos ondas luminosas de la misma frecuencia con vectores eléctricos perpendiculares de igual amplitud desfasados un ángulo $\pi/2$ (sentido horario o *dextrógiro* de giro) o $3\pi/2$ (sentido antihorario o *levógiro* de giro). Aunque el desfase sea $\pi/2$ ó $3\pi/2$, la luz será polarizada elíptica si las dos componentes no tienen igual amplitud, y circular si tienen igual amplitud.

La luz puede encontrarse en estados puros de polarización o con mezcla

de estados de polarización.

- **Obtención de luz polarizada: polarizadores lineales**

Los polarizadores (figura 9.3) son dispositivos que seleccionan una dirección particular de vibración de la luz sobre su *eje de transmisión*. Tras atravesarlos luz natural emerge luz linealmente polarizada en la dirección seleccionada mediante la orientación del eje de transmisión del polarizador. El eje perpendicular al de transmisión se denomina *eje de extinción*. Hay una variedad de métodos para conseguir esta selección, entre los que destacan la absorción selectiva por dicroísmo (más común), reflexión con ángulo de Brewster, o polarización por dispersión.



Figura 9.3. Polarizadores lineales.

Si sobre un polarizador lineal incide luz linealmente polarizada, la intensidad transmitida resulta:

$$I_t = I_o \cdot \cos^2 \alpha \quad (9.1)$$

donde α es el ángulo formado entre la dirección de vibración de la luz incidente y el eje de transmisión del polarizador. De la ecuación (9.1) se deduce que si colocamos dos polarizadores con sus ejes de transmisión formando 90° no habrá luz transmitida por el segundo polarizador.

Si sobre un polarizador incide luz circularmente polarizada, al girar el eje del polarizador la intensidad transmitida no varía.

- **Obtención de luz polarizada: láminas retardadoras**

Las láminas retardadoras (figura 9.4 izquierda) están formadas por materiales birrefringentes, generalmente medios cristalinos anisótrpos. Se tallan de forma que al incidir normalmente un haz de luz a su paso por la lámina las componentes que vibran según las *líneas neutras* de la lámina emergen con un cierto desfase entre ellas, que se calcula como:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) d \quad (9.2)$$

donde Δ es la diferencia de camino óptico en el interior de la lámina entre la componente que presenta índice de refracción n_e (onda extraordinaria) y la componente que presenta índice n_o (onda ordinaria). Estos dos ejes o líneas

neutras de la lámina también se denominan *eje rápido y lento*. El factor $n_e - n_o$ se denomina *birrefringencia* de la lámina (diferencia de índices de refracción entre las líneas neutras) y d es el espesor de la lámina.

Como se deduce de la ecuación (9.2), el desfase depende de la longitud de onda de la luz incidente. Los retardadores más habituales son las *láminas de $\lambda/4$* , que introducen un desfase de $\pi/2$ para una determinada longitud de onda. Si la luz incide vibrando según el eje óptico de la lámina (una de las líneas neutras) ésta se comporta como si fuera un medio homogéneo e isótropo con índice de refracción n_o .

Si sobre una lámina $\lambda/4$ incide luz natural, a la salida se obtiene luz natural, puesto que el desfase introducido entre las componentes ordinaria y extraordinaria no afecta al resto de direcciones de vibración de la luz incidente.

Si sobre una lámina $\lambda/4$ incide luz linealmente polarizada, a la salida se obtiene luz circularmente polarizada si la dirección de vibración de la luz incidente forma 45° con las líneas neutras de la lámina. En ese caso a la salida de la lámina se tendrá una luz con dos componentes iguales desfasadas 90° , que corresponde a luz circular.

Si sobre una lámina $\lambda/4$ incide luz linealmente polarizada según una de sus líneas neutras, la lámina no tendrá ningún efecto sobre la luz incidente.

Si sobre una lámina $\lambda/4$ incide luz linealmente polarizada formando cualquier ángulo diferente de 0° y 45° con las líneas neutras, a la salida se tendrá luz elípticamente polarizada.

Si sobre una lámina $\lambda/4$ incide luz elípticamente polarizada, a la salida se tendrá luz linealmente polarizada sólo cuando los ejes de la elipse coincidan con las líneas neutras de la lámina. En cualquier otro caso a la salida se tendrá luz elípticamente polarizada.

- **Reflexión y refracción en medios dieléctricos homogéneos e isótropos**

Para un haz de luz que incide sobre la interfase, o superficie de separación, de dos medios homogéneos e isótropos, generalmente se considera por separado el comportamiento de la componente del vector eléctrico paralelo y perpendicular al *plano de incidencia*. El plano de incidencia es el plano que contiene a la normal a la interfase, al rayo incidente y al refractado o reflejado. En la figura 9.4 se observa una onda incidente y la descomposición correspondiente en componentes paralelas (en verde) y perpendiculares (en azul) al plano de incidencia.

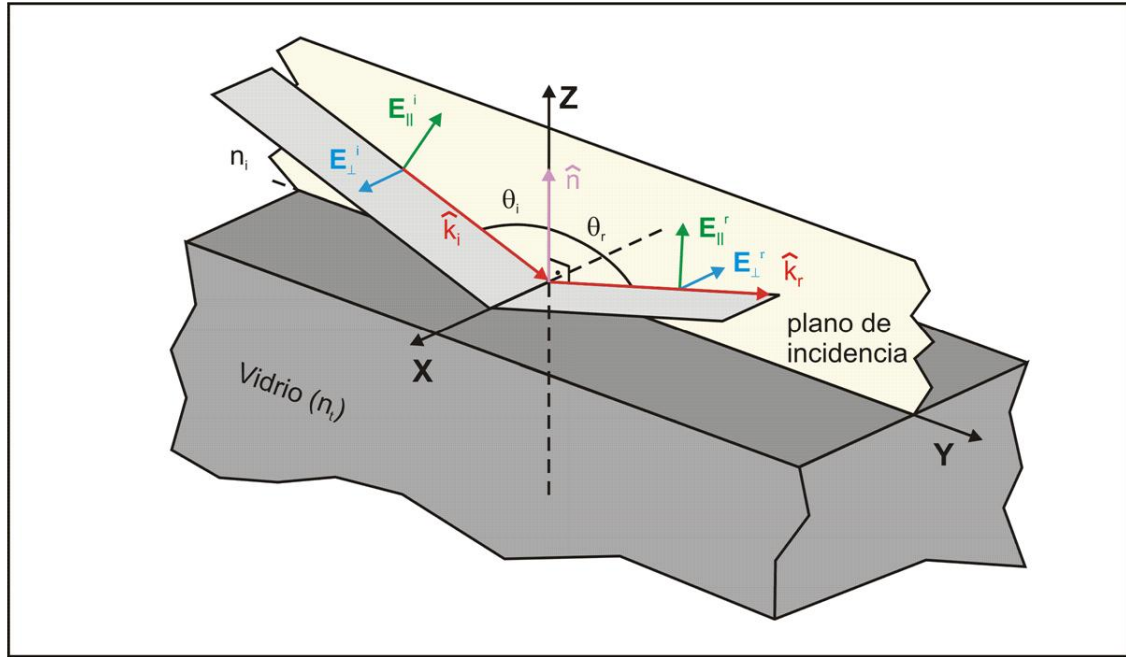


Figura 9.4. Interfase y componentes paralela y perpendicular del vector eléctrico.

Tras reflejarse en una interfase de este tipo, la luz puede sufrir cambios de fase y modificar su amplitud de acuerdo a los coeficientes que obtuvo Fresnel para cada componente (*fórmulas de Fresnel*):

$$r_{\parallel} = \frac{A_{\parallel}^r}{A_{\parallel}^i} = \frac{\operatorname{tg}(\theta' - \theta)}{\operatorname{tg}(\theta' + \theta)} \quad (9.3)$$

$$r_{\perp} = \frac{A_{\perp}^r}{A_{\perp}^i} = \frac{\operatorname{sen}(\theta' - \theta)}{\operatorname{sen}(\theta' + \theta)} \quad (9.4)$$

donde A_{\parallel}^r es la amplitud de la componente paralela al plano de incidencia de la luz reflejada, A_{\parallel}^i es la componente paralela al plano de incidencia de la luz incidente y análogamente para las componentes perpendiculares al plano de incidencia.

Para una interfase que separa medios de índices n y n' , con $n < n'$, se produce un salto de fase de π en la luz reflejada para ambas componentes. También se producen cambios en la amplitud de las componentes según las ecuaciones (9.3) y (9.4). Por lo tanto, podemos deducir que si la luz incidente es linealmente polarizada, la reflejada será también linealmente polarizada pero con distinta dirección de vibración.

En el caso de la componente paralela, se da además una circunstancia de especial interés. Cuando el ángulo de incidencia y el de refracción son complementarios ($\theta + \theta' = \pi/2$). Como puede deducirse de aplicar (9.3) en este caso la componente paralela de la luz reflejada se anula. El ángulo de incidencia correspondiente se denomina *ángulo de Brewster*, y aplicando la ley de Snell podemos expresarlo en función de los índices de los medios que

separa la interfase:

$$\theta_B = \operatorname{arctg}\left(\frac{n'}{n}\right) \quad (9.5)$$

Si incidimos con luz natural y ángulo de Brewster, obtenemos luz reflejada linealmente polarizada, dado que se anula la componente paralela al plano de incidencia. Tenemos entonces un nuevo método de obtención de luz linealmente polarizada.

• Reflexión y refracción en medios metálicos

Para incidencia sobre un metal (denominado medio conductor), puede obtenerse una generalización de las fórmulas de Fresnel teniendo en cuenta que debido a la absorción en el interior del metal, el índice de refracción asociado es complejo, y por tanto también lo es el ángulo de refracción. Esto implica que en general las amplitudes reflejadas A_{\parallel}^r y A_{\perp}^r serán complejas.



Cuando incidimos con luz linealmente polarizada sobre un metal obtenemos en general luz reflejada elípticamente polarizada, salvo cuando la incidencia es normal o rasante. La razón de las dos componentes reflejadas puede expresarse en función del número complejo $(a-ib)$, que es el producto del índice de refracción complejo ($\tilde{n}=n-ik$) por el coseno del ángulo de refracción:

$$\frac{A_{\perp}^r}{A_{\parallel}^r} = \frac{A_{\perp}(a \cos \theta + \operatorname{sen}^2 \theta - ib \cos \theta)}{A_{\parallel}(a \cos \theta - \operatorname{sen}^2 \theta - ib \cos \theta)} \quad (9.6)$$

Del estudio de la luz reflejada en un metal pueden obtenerse los valores de las *constantes ópticas* de los metales, n y k (parte real e imaginaria del índice de refracción complejo), lo que se conoce como *elipsometría*.

○ CUESTIONES

- 1.- Especifique el estado de polarización y dirección de vibración de una luz cuyo campo eléctrico tiene las siguientes componentes:

$$E_x = 3 \operatorname{sen}(\omega t - kx)$$

$$E_y = 4 \operatorname{sen}\left(\omega t - kx + \frac{\pi}{3}\right)$$

- 2.- Calcule la intensidad transmitida por los siguientes dispositivos, iluminados por una fuente de Na de intensidad I_0 , linealmente polarizada a 45° con el eje x.

a) Polarizador lineal a 30° con el eje x.

- b) Lámina de cuarto de onda para el Na con las líneas neutras en los ejes x e y.
- 3.- Calcule las amplitudes de las componentes paralela y perpendicular para una luz de Na linealmente polarizada a 30° con el plano de incidencia, para una interfase aire-vidrio Crown ($n=1.523$) que incide con $\theta=45^\circ$. ¿Habrá salto de fase por reflexión?
 - 4.- Determine el ángulo de Brewster para luz láser de He-Ne en una interfase aire-agua (considere $n_{\text{agua}}=1.3296$).
 - 5.- Calcule el ángulo de refracción para luz de Na que incide con $\theta=40^\circ$ en una interfase aire-plata ($n=0.18$, $k=3.67$). ¿Cuál es el estado de polarización resultante en la luz reflejada para esta incidencia?

GUIÓN DE LA SESIÓN: POLARIZACIÓN POR REFLEXIÓN

○ OBJETIVO

Caracterización del estado de polarización de la luz reflejada por superficies de vidrio y metálicas cuando incide sobre ellas luz linealmente polarizada. Medida del ángulo de Brewster para una interfase aire-vidrio.

○ ESPECTROGONIÓMETRO: PUESTA A PUNTO

Tras encender la fuente de Na y esperar unos minutos para que se estabilice, hemos de asegurarnos de ver nítido el retículo situado en el ocular del telescopio. Una vez conseguido, debemos enfocar el telescopio al infinito, o a un objeto muy lejano. Después, sin tocar el telescopio, se ha de poner a punto el colimador, con la rendija adosada tras la lámpara de descarga, modificando la distancia colimador-rendija mediante el correspondiente tornillo hasta que la rendija se vea nítida a través del telescopio. Finalizada la puesta a punto, no debe desplazar los tornillos ya sean del telescopio o del colimador.

Tras la puesta a punto del instrumento, se montan los polarizadores lineales acoplados al tubo del colimador y del telescopio. Compruebe que el que acople al telescopio sea el que ofrece mayor facilidad de desplazamiento del eje de transmisión. Los polarizadores se fijan a las monturas del colimador y telescopio por medio de los correspondientes tornillos.

○ COMPROBACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE POLARIZADORES

Tras haber montado los dos polarizadores, observamos la rendija a través del telescopio. Rotando el eje de transmisión del polarizador acoplado al telescopio, medimos el ángulo correspondiente a intensidad mínima transmitida por ambos polarizadores. Este mínimo, que en teoría debería ser nulo, corresponde a una posición tal que los ejes de transmisión de los dos polarizadores están cruzados (formando 90° entre si). En la práctica observamos que no es totalmente nulo, debido en parte a que la luz de la fuente no es completamente monocromática. Debe tomar este mínimo como cero y considerarlo un error de cero en las siguientes observaciones. Mida el ángulo de orientación del eje del polarizador que corresponde a este mínimo. Realice las oportunas deducciones sobre la orientación del eje de transmisión del polarizador acoplado al colimador.

○ **CARACTERIZACIÓN DE LA LUZ REFLEJADA EN UNA SUPERFICIE METÁLICA**

Se trata de determinar el estado de polarización de la luz reflejada en una superficie metálica, que será un espejo de primera superficie, cuando sobre ella incide luz linealmente polarizada. Coloque el espejo sobre la plataforma del espectrogoniómetro de forma que pueda incidir sobre su superficie con la luz linealmente polarizada proveniente del colimador. Moviendo el telescopio, busque el reflejo de la rendija en el espejo, y una vez localizado, gire el eje de transmisión del polarizador acoplado al telescopio. Debe determinar si su observación coincide con lo esperado según la teoría sobre el estado de polarización previsto para el haz reflejado.

❖ Tenga en cuenta que si el haz reflejado fuera linealmente polarizado, obtendría un mínimo casi nulo girando el segundo polarizador; si el haz reflejado fuera circularmente polarizado, no habría variaciones de intensidad; si el haz reflejado fuera elípticamente polarizado, encontraría un máximo y un mínimo no nulo de intensidad en direcciones que forman 90° (ejes propios de la elipse de polarización).

Tras realizar las pruebas pertinentes, anote las observaciones y deducciones sobre el estado de polarización del haz reflejado.

○ **CARACTERIZACIÓN DE LA LUZ REFLEJADA EN UNA SUPERFICIE DE VIDRIO**

Sustituyendo el espejo de primera superficie por la lámina plano-paralela de vidrio, opere como en el apartado anterior para localizar el haz reflejado en la primera cara de la lámina y caracterizar su estado de polarización. Discuta si concuerda con lo esperado según la teoría y especifique los ejes significativos del estado de polarización encontrado. También debe reflexionar sobre los cambios introducidos en dichos ejes y sus causas.

○ **MEDIDA DEL ÁNGULO DE BREWSTER PARA UNA INTERFASE AIRE-VIDRIO Y DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DEL VIDRIO**

Utilizamos para esta medida el hecho de que si incide luz natural con ángulo de Brewster sobre la lámina de vidrio, la luz reflejada será linealmente polarizada. Para que incida luz natural, desmonte el polarizador acoplado al colimador. A continuación varíe progresivamente el ángulo de incidencia comprobando el estado de polarización del haz reflejado, hasta conseguir una luz reflejada linealmente polarizada (mínimo nulo o casi nulo para una posición del eje de transmisión del polarizador acoplado al telescopio).

❖ Es interesante realizar una estimación previa del valor previsto para el ángulo de Brewster en una interfase aire-vidrio (con índice de refracción próximo a 1.5).

Tome la lectura angular de la escala para la posición del haz reflejado. Retire la lámina de vidrio del soporte y sin mover la plataforma de apoyo de la lámina mida la posición angular opuesta al haz incidente, o directamente la del haz incidente, como se muestra en la figura 9.5.

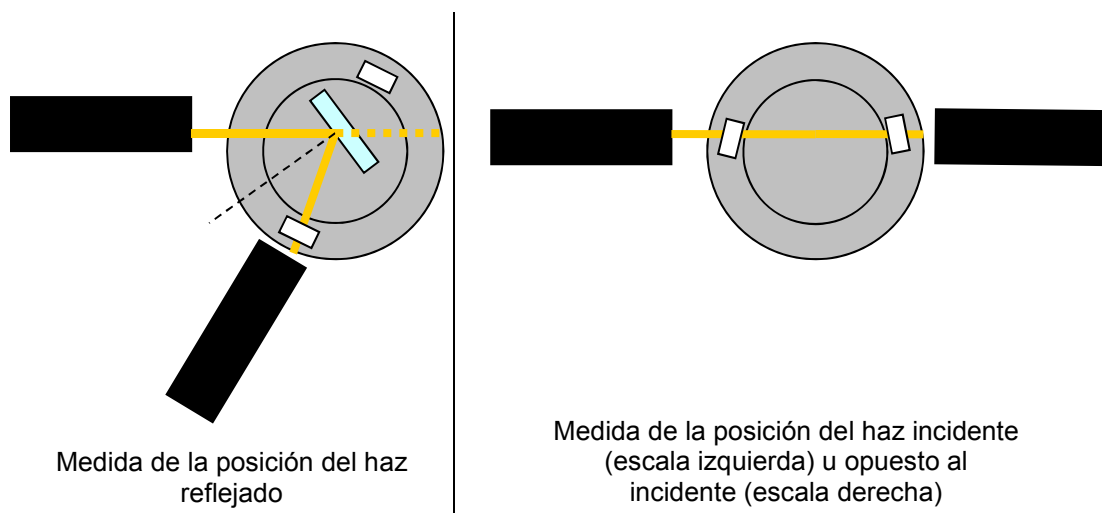


Figura 9.5. Esquema para la medida del ángulo de Brewster.

A partir de estos datos, es muy sencillo calcular, con su incertidumbre asociada, el ángulo de incidencia, que será el ángulo de Brewster. Utilizando la ecuación (9.5) puede calcular el índice de refracción del vidrio.

Nos planteamos ahora otro método alternativo para la medida del ángulo de Brewster sin desmontar el polarizador del colimador. Una vez pensado el procedimiento llévelo a cabo y compare el resultado con la medida obtenida con el método anterior.

TRABAJO PREVIO: INTERFERÓMETRO DE MICHELSON

○ CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Cuando dos haces de luz coinciden espacial y temporalmente pueden interferir, lo que afecta a la distribución de intensidades resultante. La coherencia de dos haces expresa hasta qué punto están en fase sus ondas. Si la relación de fase cambia de forma rápida y aleatoria, los haces son incoherentes, y la intensidad de la onda resultante será la suma de las intensidades. Si dos trenes de ondas son coherentes y el máximo de una onda coincide con el máximo de otra, ambas ondas se combinan produciendo en ese punto una intensidad mayor que si los dos haces no fueran coherentes. Si son coherentes y el máximo de una onda coincide con el mínimo de la otra, ambas ondas se anularán entre sí parcial o totalmente, con lo que la intensidad disminuirá (figura 9.6).

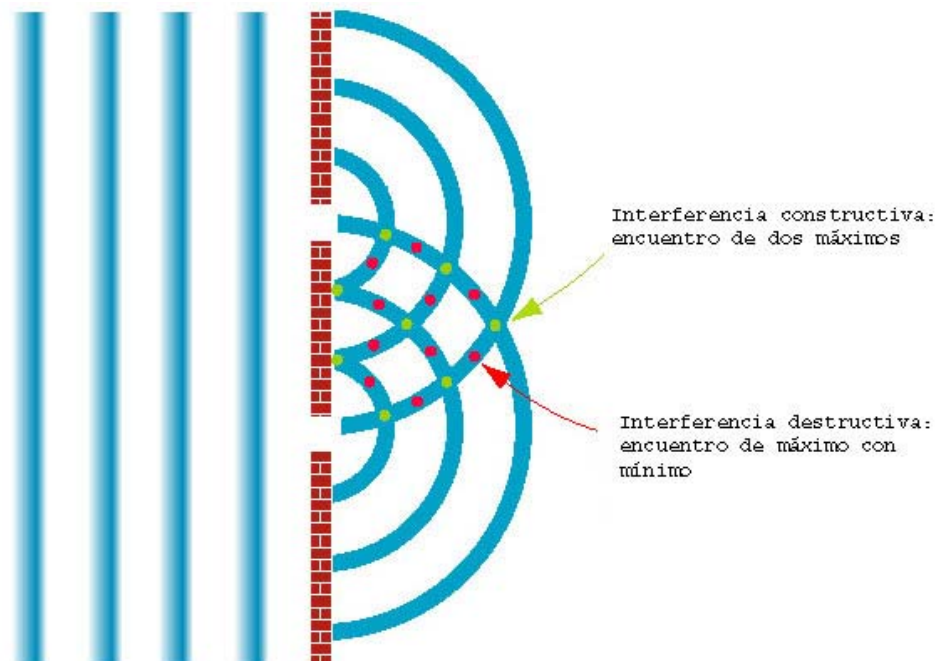


Figura 9.6. Interferencia de dos ondas.

• Condiciones de interferencia

Cuando las ondas son coherentes, puede formarse un diagrama de interferencia formado por franjas oscuras y claras. Para producir un diagrama de interferencia constante, ambos trenes de ondas deben estar polarizados en el mismo plano.

Los átomos de una fuente de luz ordinaria irradian luz de forma independiente, por lo que una fuente extensa de luz suele emitir radiación incoherente. Entonces, para obtener luz coherente de una fuente se selecciona una parte reducida de la misma mediante un pequeño orificio o rendija, la luz

procedente de esta parte se separa (mediante una doble rendija, un doble espejo o un doble prisma) y se hace que ambas ondas recorran trayectorias de longitud ligeramente diferente antes de combinarlas de nuevo. El resultado es una interferencia con luz coherente, por lo que se produce un diagrama de interferencias.

- **Experimento clásico de Young**

El primero en mostrar un diagrama de interferencias fue el físico británico Thomas Young, en el experimento que lleva su nombre en 1801. Young dividió un haz muy estrecho de luz solar, conseguido mediante un orificio pequeño practicado en un panel colocado sobre una ventana, en dos partes. En la pared de frente a la ventana, colocada lejos de los haces, observó un patrón de bandas alternadas claras y oscuras llamadas franjas de interferencia. Las franjas claras indican interferencia constructiva y las oscuras indican interferencia destructiva de las dos ondas que pasan por las rendijas. La interferencia constructiva se produce en los puntos de la pantalla donde la diferencia de camino óptico es un número entero de veces la longitud de onda de la luz y la interferencia destructiva ocurre si la diferencia es un número impar de veces media longitud de onda, como se deduce de la ecuación para la intensidad resultante de la superposición de las dos ondas que interfieren:

$$I \propto 4A^2 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = 4A^2 \cos^2\left(\frac{\pi\Delta}{\lambda}\right) \quad (9.7)$$

donde A es la amplitud de las ondas, δ es el desfase y Δ es la diferencia de camino óptico entre las dos ondas.

El experimento de Young es un buen ejemplo de interferencias por *división del frente de onda*.

- **Interferómetro de**

Es un dispositivo que produce interferencias *por división de amplitud*, cuyo esquema se muestra en la figura 9.7. Consiste en dos espejos, de primera superficie, colocados en ángulo recto (M_1 y M_2) y una lámina divisora de haz (M) formando 45° con ambos espejos. El dispositivo se ilumina con una fuente de luz casi-monocromática. Si los dos brazos del interferómetro (distancia desde la lámina M hasta el espejo correspondiente) tienen distinta longitud se genera una diferencia de camino óptico entre los haces que recorren cada uno de los brazos. La distancia de la lámina a uno de los espejos (uno de los brazos del interferómetro) se regula mediante unos tornillos que varían la posición del espejo. La lámina de vidrio, L_2 , que se observa en la figura 9.7 en el brazo del espejo M_2 se introduce para compensar el recorrido adicional del haz que va a M_1 , pues recorre el interior de la lámina divisora de haz (M) tres veces.

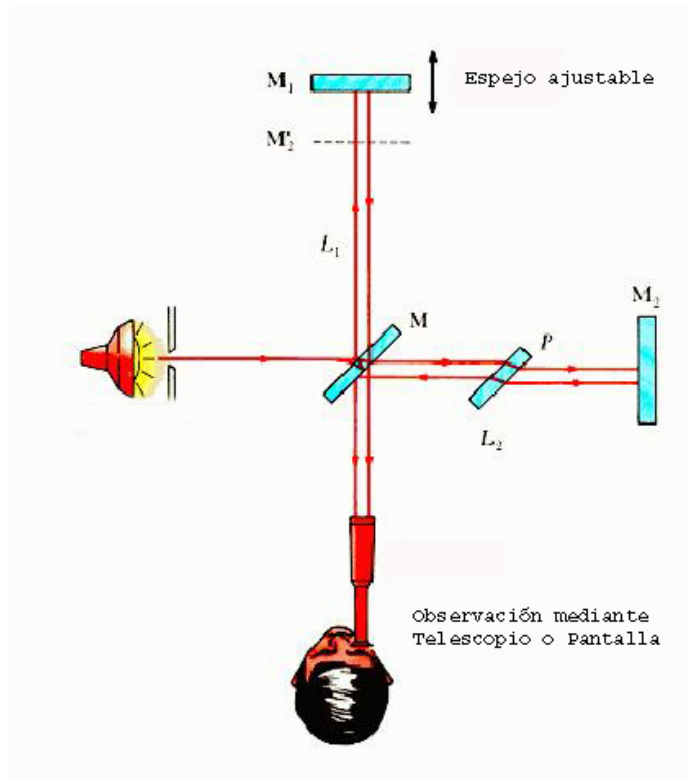


Figura 9.7. Esquema de un interferómetro de Michelson.



Albert Abraham Michelson (Strzelno, Polonia, 19 de diciembre de 1852 - Pasadena, Estados Unidos, 9 de mayo de 1931). Físico, conocido por sus trabajos acerca de la velocidad de la luz. Recibió el Premio Nobel de Física en 1907. A los 17 años entró en la Academia Naval de los Estados Unidos en Annapolis, Maryland, en donde aprendió más sobre la ciencia que del arte marítimo. Obtuvo el grado de oficial en 1873 y prestó servicios como instructor científico y literal en la Academia entre 1875 y 1878. Se interesó ya desde esa época al problema de tratar de determinar la velocidad de la luz. Tras dos años de estudios en Europa, dejó la Armada en 1881. En 1883 aceptó una plaza de profesor de Física en la Case School of Applied Science de Cleveland y proyectó allí un interferómetro mejorado. En 1889 aceptó una plaza de profesor de Física por la Clark University de Worcester, Massachusetts donde permaneció hasta 1892. Posteriormente fue Jefe del Departamento de Física de la nueva Universidad de Chicago, cargo en el que permaneció hasta que se jubiló en 1929. En 1907 se convirtió en el primer estadounidense que obtuvo el premio Nobel de Física. Entre 1923 y 1927 fue presidente de la Academia Nacional de Ciencias.

A la salida del interferómetro, los dos haces surgen paralelos y se recogen en una pantalla o bien se observan mediante un telescopio adicional. Para los dos haces, representados en la figura 9.7, la diferencia de camino óptico, con el interferómetro operando en aire, es:

$$\Delta = 2(L_1 - L_2) \quad (9.8)$$

El resultado de la superposición de ambos haces será un máximo interferencial si $\Delta = m\lambda$, de acuerdo con la ecuación (9.7) y será un mínimo interferencial (oscuridad) si $\Delta = (2m+1)\lambda/2$. Por tanto, si alejamos progresivamente el espejo M1 pasaremos por diferentes máximos y mínimos interferenciales, al ir variando progresivamente Δ .

Si consideramos incidencia no normal sobre los espejos, pues la fuente también emite haces de luz no paralelos al eje, entonces la diferencia de camino óptico se expresa en función del ángulo θ que forman los rayos incidentes con la horizontal, mediante la ecuación:

$$\Delta = 2(L_1 - L_2) \cos \theta \quad (9.9)$$

Si θ varía de forma continua, lo que significa que la fuente emita en todas las direcciones, al recoger el conjunto de haces resultantes se obtendrá, dada la simetría circular del conjunto, una configuración de anillos alternativamente claros y oscuros correspondiendo a las posiciones angulares de máximos y mínimos interferenciales en función de θ , como se observa en la figura 9.8.



Figura 9.8. Configuración interferencial de un interferómetro de Michelson.

El círculo central, que corresponde a $\theta=0^\circ$, corresponderá a un máximo, a un mínimo o a una intensidad intermedia según la diferencia entre la longitud de los brazos del interferómetro. El orden interferencial del círculo central será el máximo de toda la configuración, ya que cuando aumenta θ decrece la diferencia de camino óptico, según la ecuación (9.9), y por tanto decrecerá también el orden interferencial.

❖ El orden interferencial es el número de veces que la diferencia de camino óptico es múltiplo de la longitud de onda, designado por m anteriormente.

Si una vez lograda la configuración interferencial, se disminuye la diferencia de camino óptico entre los brazos el orden interferencial del círculo central también disminuirá. Se consigue moviendo uno de los espejos de forma que disminuya la diferencia L_1-L_2 . Esta situación implica que los anillos que en la configuración inicial ocupaban posiciones de menor orden (localizados en la periferia), pasen progresivamente a ocupar posiciones más centrales. El efecto sobre la configuración es de una progresiva desaparición de anillos por el centro de la misma, que visualmente actúa como un sumidero para los anillos.

Si, por el contrario, aumenta la diferencia de camino óptico entre los brazos, entonces aumenta el orden interferencial del círculo central. En la configuración inicial el orden interferencial del máximo central era el máximo, por lo que necesariamente su localización se desplazará hacia la periferia y deberán surgir progresivamente nuevos anillos por el centro. Visualmente el efecto es de brotar anillos desde el centro.

Por tanto, observando qué sucede en la configuración se puede deducir inmediatamente si está aumentando o decreciendo la diferencia de camino óptico en un interferómetro de Michelson. Además, cada vez que surja o desaparezca un anillo por el centro estará variando la el camino óptico en λ . Entonces, cuando el anillo central pasa de máximo a mínimo la diferencia inducida en el camino óptico será de $\lambda/2$. Por tanto se pueden medir desplazamientos del espejo móvil de hasta $\lambda/4$, lo que hace de este interferómetro un instrumento de gran sensibilidad para medida de diferencias de longitud de gran precisión.

❖ Recuerde que el haz de luz recorre dos veces cada brazo, por lo que una diferencia de camino óptico de $\lambda/2$ corresponden a una diferencia de $\lambda/4$ en la longitud de los brazos.

En muchas ocasiones, se incorpora al interferómetro en uno de sus brazos una cámara susceptible de ser llenada o vaciada de un gas. Dado que el índice de refracción varía con la presión del gas, durante el proceso de llenado o vaciado se estará variando la diferencia de camino óptico, que podremos medir contando el número de anillos que aparecen o desaparecen.

• Coherencia espacial

En la vida real no existen las fuentes puntuales de luz, pues por pequeñas que sean tienen dimensiones. Por tanto, se define un parámetro llamado *contraste de franjas* o *visibilidad* de la forma siguiente:

$$V = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m} \quad (9.10)$$

donde I_M e I_m son las intensidades máximas y mínimas en la distribución de interferencias. En el experimento ideal de doble rendija de Young el contraste de las franjas será siempre óptimo, y por tanto $V=1$. Sin embargo, si las amplitudes de las dos ondas que interfieren son diferentes, como es el caso real, $I_m \neq 0$ y en este caso $V < 1$. En el caso en el que $I_m = I_M$, entonces $V=0$ y no se apreciarán interferencias.

Si la fuente de luz que ilumina el sistema no es puntual, el factor de visibilidad también puede ser inferior a 1, incluso verificándose estrictamente las cuatro condiciones para obtener imágenes de interferencias estables. El fenómeno de la pérdida de contraste en las franjas a consecuencia de las dimensiones de la fuente está relacionado con el concepto de *coherencia espacial*. El estudio de este fenómeno se hace considerando que cada punto de la fuente es un emisor puntual que genera su sistema de franjas de interferencia. Se puede demostrar que cada uno de estos emisores elementales genera un sistema de franjas con un origen diferente (posición del máximo $m=0$). La superposición de los diferentes términos \cos^2 de la ecuación (9.7), con un pequeño desplazamiento entre ellas, provoca la pérdida de contraste o visibilidad.

○ CUESTIONES

- 6.- Calcule la intensidad, salvo constantes de proporcionalidad, para dos ondas de amplitud A y longitud de onda λ que interfieren con una diferencia de camino óptico de $5\lambda/4$. ¿Para qué diferencia de camino óptico se tendrá el máximo más próximo en la configuración interferencial? ¿y el mínimo más próximo?
- 7.- En un interferómetro de Michelson con la cámara de aire situada en el brazo más corto, discuta qué ocurre en la configuración interferencial cuando se extrae progresivamente el aire de la cámara. ¿Y si la cámara está en el brazo más largo?
- 8.- Calcule el orden del máximo central para un interferómetro de Michelson que opera con un láser de He-Ne ($\lambda=632.8$ nm) y una diferencia en la longitud de sus brazos de 0.22 μm .
- 9.- ¿Qué cree que le ocurriría a la configuración interferencial de un Michelson si aumenta mucho la diferencia de camino óptico entre los brazos? Considere efectos de coherencia espacial de la fuente.
- 10.- ¿Puede conseguirse un patrón interferencial de un Michelson con luz blanca? Discuta y razone la respuesta.

GUIÓN DE LA SESIÓN: INTERFERÓMETRO DE MICHELSON

○ OBJETIVO

Observación de la configuración interferencial producida por un interferómetro de Michelson y estudio de la variación del índice de refracción del aire con la presión atmosférica.

• Puesta a punto del interferómetro de Michelson

El interferómetro de Michelson del montaje experimental, figura 9.9, funciona con una fuente láser de He-Ne acoplada a un objetivo de microscopio para abrir el haz láser con la idea de obtener diferentes ángulos con la horizontal para el haz incidente sobre la lámina divisora de haz (ver figura 9.7).

❖ El láser de He-Ne tiene un máximo de emisión en 632.8 nm.



Figura 9.9. Interferómetro de Michelson.

En primer lugar, debe asegurarse de que el láser está perfectamente alineado con el objetivo de microscopio y la lámina divisora de haz, de forma que la luz llega a ésta a su misma altura y centrada. De no ser así, ha de actuar con gran delicadeza sobre el soporte del láser colocado en el banco óptico junto al objetivo de microscopio hasta conseguir una buena alineación de los tres elementos.

Una vez alineado el láser debería observar la configuración interferencial sobre la pantalla. Si no ocurre así, podría ser que los espejos no forman un ángulo recto entre ellos o bien no forman 45° con la lámina divisora de haz.

También puede ocurrir que la diferencia de camino óptico entre ambos espejos sea demasiado grande, lo que ocasiona problemas de coherencia y disminuye la visibilidad de las franjas. Todos estos posibles problemas se solucionan accionando con extremo cuidado y delicadeza los tornillos del espejo móvil del interferómetro. Hay que tener en cuenta que un desplazamiento muy pequeño de los tornillos puede hacer que desaparezca completamente la configuración interferencial, por lo que su manipulación requiere una buena dosis de calma y lentitud. Para tener una referencia de hacia dónde debemos mover los tornillos, una buena forma de proceder es quitar el objetivo de microscopio, observar sobre la pantalla los puntos luminosos correspondientes a las reflexiones en los espejos y la lámina divisora de haz, e intentar aproximarlos y centrarlos con respecto a la lámina lo más posible. Después, se coloca el objetivo de microscopio, cuidando la alineación con el láser y la lámina divisora, y con toques muy ligeros a los tornillos deberá obtener inicialmente una configuración de franjas y posteriormente de anillos.

❖ Todas las operaciones de puesta a punto del interferómetro son muy delicadas, por lo que es aconsejable que el profesor esté presente para supervisarlas y asegurar que el proceso sea lo más corto posible. Por ello, se aconseja consultar al profesor antes de manipular cualquier control del interferómetro y verificar en primer lugar si podemos observar la configuración sin necesidad de realizar ajuste alguno.

- **Observación de la configuración al extraer e introducir aire**

Una vez obtenida la configuración interferencial, se observa qué ocurre en la misma cuando se extrae aire de la cámara por medio de la bomba de vacío conectada a la misma. Es decir, si surgen o desaparecen anillos por el centro de la configuración. Puede observar también cómo disminuye la presión en el interior de la cámara controlando la pantalla del manómetro digital acoplado a la misma. Realice las oportunas deducciones sobre si la cámara está emplazada en el brazo más largo o más corto del interferómetro según el comportamiento observado en la configuración al extraer aire de la cámara.

- **Variación del índice de refracción del aire con la presión atmosférica**

Comience con la cámara de aire totalmente llena. Para llenarla se acciona la palanca de entrada de aire de la bomba de vacío, y se espera hasta que la lectura del manómetro se establezca en valores de presión atmosférica normal. En ese momento accione poco a poco la palanca de vacío de la bomba para ir produciendo gradualmente el vacío en la cámara. Debe realizar esta operación lentamente de forma que pueda controlar la lectura de presión atmosférica en el momento en que van surgiendo o desapareciendo un número determinado de anillos brillantes por el centro de la configuración interferencial. Por ejemplo, puede tomar lecturas de presión cuando surjan o desaparezcan 1,2,3,4,5 y 6 anillos. La variación del camino óptico en función de la variación en el número de anillos puede expresarse de la siguiente forma:

$$2l\Delta n = \Delta m \cdot \lambda \quad (9.11)$$

donde l es la longitud de la cámara (10 mm en nuestro caso) y m es el orden interferencial.

Mediante la ecuación (9.11) podrá calcular Δn para cada una de las medidas de presión atmosférica tomadas, y posteriormente representar Δn en función de la presión atmosférica. Realizando el correspondiente ajuste por mínimos cuadrados, obtendrá la pendiente de la relación entre presión y variación del índice de refracción para el aire. Además, determine si es posible a partir del ajuste el valor del índice de refracción del aire cuando la cámara está llena (a presión atmosférica).