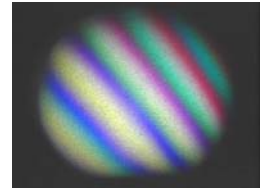


SESIÓN N° 9: INTERFERÓMETRO DE MICHELSON.



TRABAJO PREVIO

1. Conceptos fundamentales
2. Cuestiones

1. Conceptos fundamentales

• Interferencia óptica:

Cuando dos haces de luz se cruzan 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. 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 9.1).

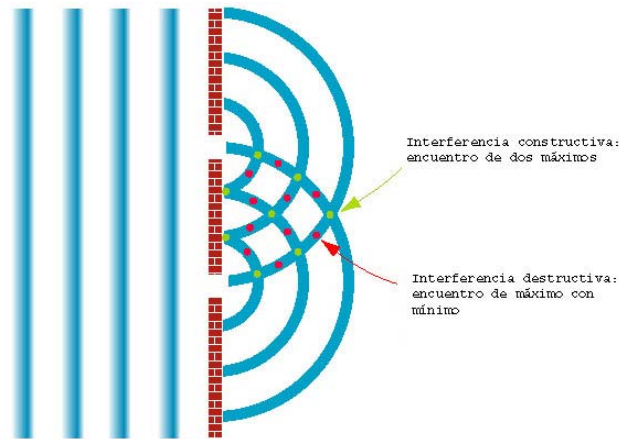


Figura 9.1

• 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. Para obtener luz coherente de una fuente así, se selecciona una parte reducida de la luz mediante un pequeño orificio o rendija. Si esta parte vuelve a separarse mediante una doble rendija, un doble espejo o un doble prisma y se hace que ambas partes recorran trayectorias de longitud ligeramente diferente antes de combinarlas de nuevo, 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. El experimento clásico que demuestra la interferencia de la luz fue realizado primero por Thomas Young 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 por las rendijas. La interferencia constructiva se produce en los puntos de la pantalla donde las longitudes de camino óptico difieren en un número entero de longitudes de onda de la luz y la interferencia destructiva ocurre si la diferencia es un número impar de media longitud de onda, como se deduce de la ecuación para la intensidad resultante de la superposición de las dos ondas que interfieren:

$$I \propto 4A^2 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = 4A^2 \cos^2\left(\frac{\pi\Delta}{\lambda}\right) \quad (9.1)$$

donde A es la amplitud de las ondas, δ es el desfase y Δ 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 Michelson:**

Es un dispositivo para generar interferencias *por división de amplitud*. Consiste en dos espejos de primera superficie colocados en ángulo recto, y una lámina divisora de haz formando 45° con ambos espejos. El dispositivo se ilumina con una fuente de luz casi-monocromática y si los dos brazos del interferómetro tienen distinta longitud, lo que se regula variando la posición de uno de los espejos, se genera una diferencia de camino óptico entre los haces que recorren cada uno de los brazos. La lámina de vidrio que podemos ver en la Figura 9.2 en el brazo del espejo M2 se introduce para compensar el recorrido adicional del haz que va a M1 en el interior de la lámina divisora de haz.

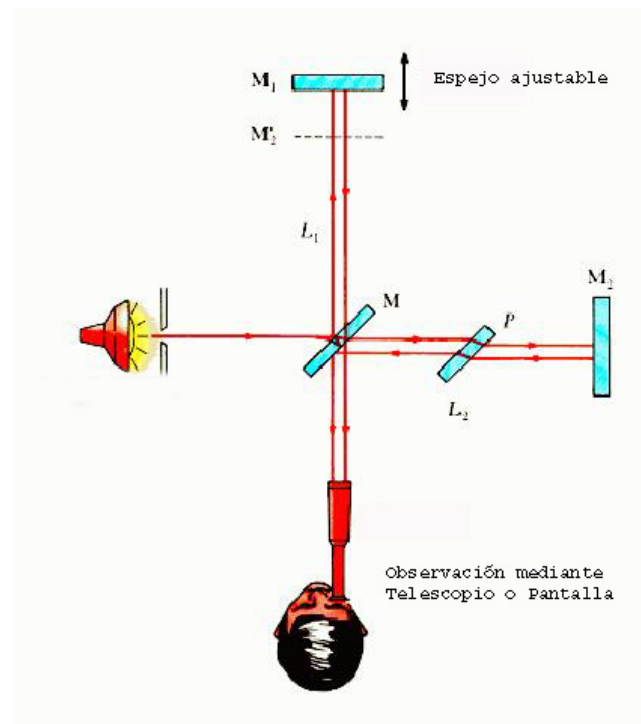


Figura 9.2

A la salida del interferómetro, los dos haces surgen paralelos y se recogen en una pantalla o se observan mediante un telescopio adicional. Para los dos haces representados en la figura 9.2, la diferencia de camino óptico resulta (con el interferómetro operando en aire):

$$\Delta = 2(L_1 - L_2) \quad (9.2)$$

El resultado de la superposición de ambos haces será un máximo interferencial si $\Delta = k\lambda$, de acuerdo con la ecuación (9.1), y será un mínimo interferencial (oscuridad) si $\Delta = (2k+1)\lambda/2$. Alejando progresivamente el espejo M1 pasaremos por diferentes máximos y mínimos interferenciales, al variar progresivamente Δ .

Si consideramos una incidencia no normal sobre los espejos (la fuente emite rayos no paralelos al eje), entonces la diferencia de camino óptico se expresa en función del ángulo θ que formen los rayos incidentes con la horizontal, como:



Figura 9.3

$$\Delta = 2(L_1 - L_2) \cos \theta \quad (9.3)$$

Si variamos θ de forma continua (permitiendo que la fuente emita en todas direcciones), obtendremos al recoger el conjunto de haces resultantes y 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 ve en la figura 9.3.

El círculo central (correspondiente a $\theta=0^\circ$) será máximo, mínimo o intermedio entre ambos según la diferencia de longitud entre los brazos del interferómetro. Su orden interferencial (número de veces que es múltiplo la diferencia de camino óptico de la longitud de onda, designado por k anteriormente) será el máximo de toda la configuración, ya que si aumentamos θ decrece la diferencia de camino óptico, según la ecuación (9.3), y por tanto el orden interferencial.

Si una vez lograda la configuración interferencial, disminuimos la diferencia de camino óptico entre los brazos moviendo uno de los espejos de forma que disminuya $L_1 - L_2$, entonces el orden interferencial del círculo central también deberá disminuir progresivamente. Esto implica que anillos que en la configuración inicial ocupaban posiciones de menor orden (periferia), pasen progresivamente a ocupar posiciones más centrales, y el efecto sobre la configuración es de una progresiva desaparición de anillos por el centro de la misma.

Si, por el contrario, aumentamos la diferencia de camino óptico entre los brazos, entonces deberá aumentar el orden interferencial del círculo central, que ya era máximo en la configuración inicial, por lo que necesariamente deberán surgir nuevos anillos por el centro y crear un desplazamiento de los anillos presentes hacia la periferia. Así pues, observando qué sucede en la configuración podemos deducir inmediatamente si está aumentando o decreciendo la diferencia de camino óptico en un interferómetro de Michelson. Además, sabemos que cada vez que surja o desaparezca un anillo por el centro estaremos variando el camino óptico en λ . Si observamos el anillo

central y controlamos cuándo pasa de máximo a mínimo, la diferencia inducida en camino óptico sería de $\lambda/2$, lo que implica que podemos medir desplazamientos del espejo móvil de hasta $\lambda/4$, lo que hace de este interferómetro un instrumento de gran sensibilidad para medir diferencias de longitud.

En muchas ocasiones, se incorpora al interferómetro en uno de sus brazos una cámara rellena de aire u otro gas, que puede vaciarse progresivamente mediante una bomba de vacío, que permite también invertir el proceso y llenar de nuevo la cámara. Dado que el índice de refracción varía con la presión del gas, esto proporciona un mecanismo adicional de variar de forma controlada el camino óptico para una configuración.

• **Coherencia espacial:**

En la vida real, no existen las fuentes puntuales de luz, por pequeñas que sean, tienen dimensiones. Debido a esto, tendremos que definir un parámetro llamado **contraste de franjas** o **visibilidad** de la forma siguiente:

$$V = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m} \quad (9.4)$$

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, por lo tanto, el contraste de las franjas será siempre óptimo, $V=1$. 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, $V < 1$. Si no se apreciaran interferencias, tenemos el caso en el que $I_m = I_M$, entonces $V = 0$. 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 (9.1), con un pequeño desplazamiento entre ellas, provoca la pérdida de contraste.

2. Cuestiones

1. Calcula 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 encontramos el máximo más próximo en la configuración interferencial? ¿y el mínimo más próximo?
2. En un interferómetro de Michelson con la cámara de aire situada en el brazo más corto, discute qué ocurre en la configuración interferencial cuando extraemos progresivamente el aire de la cámara. ¿Y si la cámara está en el brazo más largo?
3. Calcula el orden del máximo central para un interferómetro de Michelson que opera con láser de He-Ne ($\lambda=632.8$ nm) y una diferencia en la longitud de sus brazos de 0.22 μm .
4. ¿Qué crees que le ocurriría a la configuración interferencial de un Michelson si aumentamos mucho la diferencia de camino óptico entre los brazos, considerando efectos de coherencia espacial de la fuente?
5. ¿Puede conseguirse un patrón interferencial de un Michelson con luz blanca? Discute la respuesta.

GUIÓN DE LA SESIÓN DE PRÁCTICAS Nº 9

Objetivo de la práctica

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



Realización del experimento

A) Puesta a punto del dispositivo.

El interferómetro de Michelson del montaje experimental funciona con una fuente láser de He-Ne (máximo de emisión a 632.8 nm), acoplada a un objetivo de microscopio que tiene la misión de abrir el haz láser para obtener diferentes ángulos con la horizontal para el haz incidente sobre la lámina divisora de haz. En primer lugar, debemos asegurarnos 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, actuaremos 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.



Figura 9.4

Una vez realizada esta operación, si fuera necesaria, normalmente deberá observarse la configuración interferencial sobre la pantalla (algo similar a lo mostrado en la Figura 9.4). Si no ocurre así, es que los espejos no forman ángulo recto o bien no forman 45° con la lámina divisora de haz. También puede ocurrir que haya demasiada diferencia de camino óptico entre ambos, lo que ocasiona problemas de coherencia y disminuye la visibilidad de las franjas. 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 lo más posible y centrarlos con respecto a la lámina. Después, se coloca el objetivo de microscopio, cuidando la alineación con el láser y la lámina divisora, y con muy ligeros toques a los tornillos deberemos obtener una configuración de franjas inicialmente y luego 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.

B) Observación del comportamiento de la configuración al extraer e introducir aire en la cámara.

Una vez obtenida la configuración interferencial, se observa qué ocurre en la misma cuando extraemos 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). Podemos observar también cómo disminuye la presión en el interior de la cámara controlando la pantalla de cristal líquido del manómetro digital acoplado a la misma. Realizaremos 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.

C) Estudio de la variación del índice de refracción del aire con la presión atmosférica.

Partimos de 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 estabilice en valores de presión atmosférica normal).

Se va entonces produciendo gradualmente el vacío accionando poco a poco la palanca de vacío de la bomba, de forma que podamos 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, pueden tomarse lecturas de presión cuando surjan o desaparezcan 1, 2, 3, 4, 5 y 6 anillos. La variación de camino óptico podemos expresarla en función de la variación en el número de anillos de la siguiente forma:

$$2l\Delta n = \Delta k \cdot \lambda \quad (9.5)$$

donde l es la longitud de la cámara (10 mm en nuestro caso), podremos calcular Δn para cada una de las medidas de presión atmosférica tomadas, y representar Δn en función de la presión atmosférica. Realizando el correspondiente ajuste por mínimos cuadrados, obtendremos la pendiente de la relación entre presión y variación del índice de refracción para el aire.