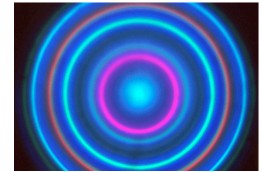


# SESIÓN 11. Parejas 1-6. Interferómetro de Fabry-Perot.



## 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 11.1).

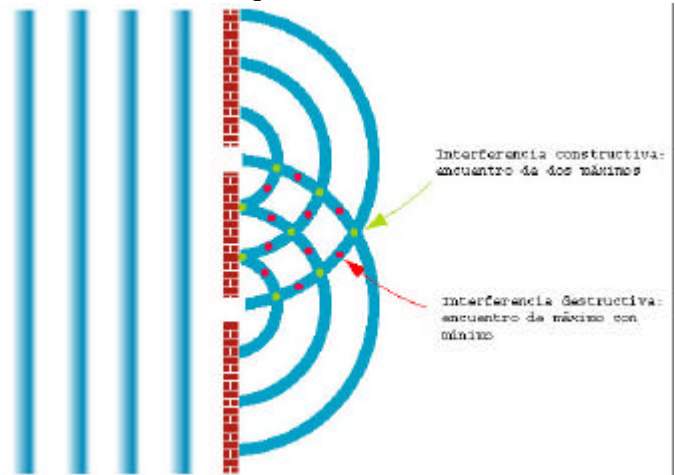


Figura 11.1

#### · 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

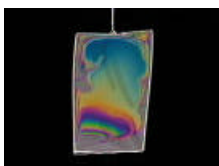
franjas claras indican interferencia constructiva y las oscuras indican interferencia destructiva de las dos ondas por las rendijas. La interferencia constructiva se produce en los puntos de la pantalla donde las longitudes de camino óptico difieren en un número entero de longitudes de onda de la luz 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:

$$I \propto 4A^2 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) = 4A^2 \cos^2\left(\frac{\pi\Delta}{\lambda}\right) \quad (11.1)$$

donde A es la amplitud de las ondas,  $\delta$  es el desfase y  $\Delta$  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*.

• **Interferencias en películas delgadas:**



Un ejemplo familiar de interferencia de la luz se logra por los efectos del color en películas delgadas, tal como en películas de jabón. Estos efectos se deben a la interferencia de las ondas de luz que se reflejan de las superficies frontal y posterior de la película.

• **Interferómetro de Fabry-Perot:**

Es un dispositivo para generar interferencias *por división de amplitud*. Fue presentado por primera vez en 1899. Consiste en una cavidad llena de aire u otro medio, limitada por dos superficies de alta reflectancia que dejan pasar una cierta cantidad de luz por transmisión. Las interferencias se producen debido a que se genera una diferencia de camino óptico entre los haces transmitido y reflejado doblemente en ambas caras de la cavidad del interferómetro (ver

Figura 11.2).

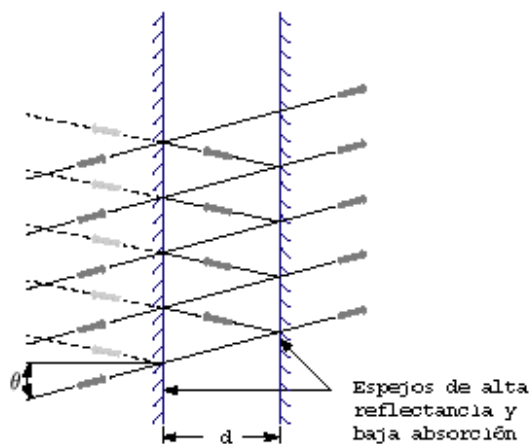


Figura 11.2

Si la fuente de luz que incide sobre la cavidad se propaga en múltiples direcciones (variando el ángulo  $\theta$  de incidencia sobre la misma), la diferencia de camino óptico entre dos haces que interfieren resulta, en función del espesor d de la cavidad, el índice  $n_c$  del medio que contiene en su interior y el ángulo de incidencia:

$$\Delta = 2n_c d \cos \theta \quad (11.2)$$

Si las superficies son de vidrio recubierto, por cada reflexión se introduce un salto adicional de fase de  $\pi$ , pero dado que hay dos reflexiones adicionales por cada pareja de haces los saltos de fase por reflexión no influyen sobre la configuración. De acuerdo con la ecuación (11.1), si esta diferencia de camino óptico es un múltiplo entero de la longitud de onda de la fuente, supuesta monocromática, ( $k\lambda$ ), se producirá un máximo interferencial, mientras que si es un múltiplo impar de semilongitudes de onda ( $(2k+1)\lambda/2$ ), se producirá un mínimo interferencial. Como podemos apreciar en la figura 1, todos los rayos que interfieren como resultado de una incidencia con un ángulo  $\theta$  salen de la cavidad paralelos entre sí y al de incidencia. Si recogemos el resultado de la interferencia para todos los ángulos

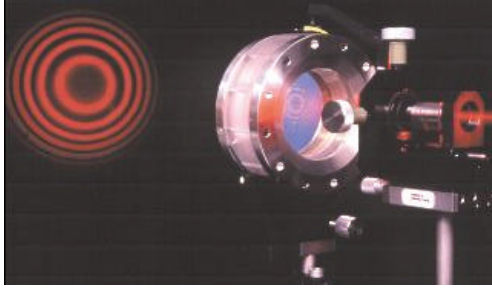


Figura 11.3

de incidencia en el plano focal imagen de una lente convergente, o bien por medio de un telescopio auxiliar, observaremos, dada la simetría circular del conjunto, una configuración con varios anillos claros y oscuros alternados, como se ve en la figura 11.3.

El círculo central (correspondiente a  $\theta=0^\circ$ ) será máximo, mínimo o intermedio entre ambos según el espesor de la cavidad y el índice de refracción del medio de su interior. Su orden interferencial o número de veces que la diferencia de camino óptico es

múltiplo de  $\lambda$  (anteriormente denotado por  $k$ ), será el máximo de toda la configuración, ya que si aumentamos  $\theta$  decrece la diferencia de camino óptico, según la ecuación (11.2), y por tanto el orden  $k$ .

Los interferómetros de Fabry-Perot están dotados de un tornillo de desplazamiento fino que permite variar el espesor de la cavidad, acercando o alejando los espejos entre sí. Un dispositivo muy similar al interferómetro pero que no ofrece esta posibilidad de desplazamiento de las superficies de la cavidad es el *etalón* de Fabry-Perot. Si alejamos los espejos entre sí, aumentamos la diferencia de camino óptico para todos los anillos, con lo cual el orden interferencial también deberá crecer. Si crece el orden interferencial, necesariamente deberán surgir nuevos anillos por el centro de la configuración (para que pueda crecer el orden del círculo central, que ya era máximo), y se producirá un desplazamiento hacia la periferia de los restantes anillos.

Si, por el contrario, acercamos los espejos entre sí, estaremos disminuyendo la diferencia de camino óptico y por lo tanto, forzando una disminución del orden interferencial de los anillos. Esto implica que anillos que antes eran periféricos (de menor orden que el central) pasarán progresivamente a ocupar la posición del círculo central, y desaparecerán anillos por el centro, produciéndose un desplazamiento general de la configuración hacia el centro de la misma.

· **Fuente de iluminación con varias longitudes de onda próximas entre sí:**

En caso de que la fuente de iluminación no sea monocromática, si no que por ejemplo emita principalmente en dos longitudes de onda próximas entre sí (doblete), al utilizarla para iluminar el Fabry-Perot obtendremos la superposición de dos configuraciones interferenciales correspondientes a las dos longitudes de onda del doblete. Aplicando la ecuación (11.2) al caso de máximos interferenciales ( $\Delta=k\lambda$ ), vemos que para la longitud de onda mayor del doblete corresponde un radio angular menor (mayor  $\cos \theta$  implica menor  $\theta$ ). En función del espesor de la cavidad, podremos tener varias posibilidades de superposición:

1) En *concordancia*, es decir, que los máximos de ambas configuraciones coincidan (con diferentes órdenes, obviamente). Esto implica que, para un anillo dado:

$$2d \cos \mathbf{q}_1 = k_1 \lambda_1 = 2d \cos \mathbf{q}_2 = k_2 \lambda_2 \quad (11.3)$$

y la configuración obtenida será similar a la descrita para luz monocromática.

2) En *discordancia*, o sea, que los máximos para una longitud de onda coincidan con mínimos para la otra, de nuevo con diferentes órdenes. Esto implica que:

$$2d \cos \mathbf{q}_2 = k_2 \lambda_2 = 2d \cos \mathbf{q}_1 = \left(k_1 + \frac{1}{2}\right) \lambda_1 \quad (11.4)$$

El aspecto de la configuración será entonces como si cada anillo estuviera dividido en dos, como puede verse en la figura 11.4.

### 3) Superposición intermedia entre concordancia y discordancia.



Figura 11.4

Variando el espesor de la cavidad, si partimos de una posición inicial de discordancia, pasaremos sucesivamente por una concordancia y de nuevo por la discordancia sucesiva, para la cual se verifica:

$$2d' \cos \mathbf{q}_2 = k'_2 \mathbf{I}_2 = 2d \cos \mathbf{q}_1 = (k'_1 + \frac{1}{2}) \mathbf{I}_1 \quad (11.5)$$

Para el círculo central de ambas, restando (11.4) de (11.5), tendremos, pues, una igualdad del tipo:

$$2(d' - d) = (k'_2 - k_2) \mathbf{I}_2 = (k'_1 - k_1) \mathbf{I}_1 \quad (11.6)$$

A partir de (11.6) es inmediato obtener que:

$$(k'_2 - k_2) = \frac{2(d' - d)}{\mathbf{I}_2} \quad (11.7)$$

$$(k'_1 - k_1) = \frac{2(d' - d)}{\mathbf{I}_1}$$

Si las dos discordancias son inmediatas una de otra, se verifica que  $(k'_1 - k_1) - (k'_2 - k_2) = 1$ . Restando las dos ecuaciones (11.7) y aproximando  $\lambda_1 \lambda_2 \sim \lambda^2$ , siendo  $\lambda$  el punto medio del doblete (recordemos que ambas longitudes de onda están muy próximas), obtenemos:

$$\Delta \mathbf{I} = \mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{I}^2}{2(d' - d)} \quad (11.8)$$

Esta ecuación permite obtener la distancia entre las dos longitudes de onda que conforman el doblete conociendo su punto medio (que podemos medir con otro dispositivo aunque no llegue a separar el doblete) y el desplazamiento de uno de los espejos entre las dos posiciones inmediatas de discrepancia.

#### · Poder resolutivo del interferómetro:

Podremos distinguir si hay presentes una o dos configuraciones para un doblete siempre que las dos longitudes de onda no estén demasiado próximas entre sí. El mínimo intervalo que es capaz de separar un interferómetro de Fabry-Perot para una longitud de onda central dada (poder resolutivo) depende de la reflectancia de sus espejos de la siguiente forma:

$$\Delta_r \mathbf{I} = \frac{\mathbf{I}(1-R)}{pm\sqrt{R}} \quad (11.9)$$

donde  $m$  es el orden interferencial correspondiente (si se trata del círculo central, será  $2d/\lambda$ ). Como criterio para determinar la distancia mínima apreciable se toma el de coincidencia de los valores de intensidad a mitad de pico de las distribuciones de intensidad correspondientes a  $\lambda$  y  $\lambda + \Delta\lambda$ . La dependencia con  $R$  surge porque la intensidad para una configuración de

interferencias con ondas múltiples generadas en láminas depende de la reflectancia de las mismas.

· **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:

$$V = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m} \quad (11.10)$$

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, 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 11.1, 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  $\lambda$  que interfieren con una diferencia de camino óptico de  $7\lambda/3$ . ¿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 Fabry-Perot que opera con un espesor de aire de 2 mm para luz láser de He-Ne ( $\lambda = 632.8$  nm), calcula el orden interferencial del círculo central.
3. ¿Qué crees que le ocurriría a la configuración interferencial de un interferómetro Fabry-Perot si reemplazamos progresivamente el aire de la cavidad por vapor de agua? Razona tu respuesta.
4. Calcula el intervalo espectral de un doblete centrado en 550 nm para el que el desplazamiento entre dos discordancias adyacentes en un Fabry-Perot es de 121  $\mu\text{m}$ .
5. Para una longitud de onda central  $\lambda$  y una cavidad de espesor 4 mm, calcula cuál es el límite teórico para el mínimo intervalo espectral que seríamos capaces de medir con el interferómetro mediante discordancias sucesivas (parámetro denominado *Rango espectral libre*). Si los espejos tienen una reflectancia de 0.95, calcula el poder resolutivo del interferómetro para el círculo central y el centro del doblete de Na (589.3 nm). ¿Resolvería el doblete este interferómetro? El intervalo espectral del doblete del Na es 0.6 nm.