

SESIÓN N° 7: BIPRISMA DE FRESNEL.



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 7.1).

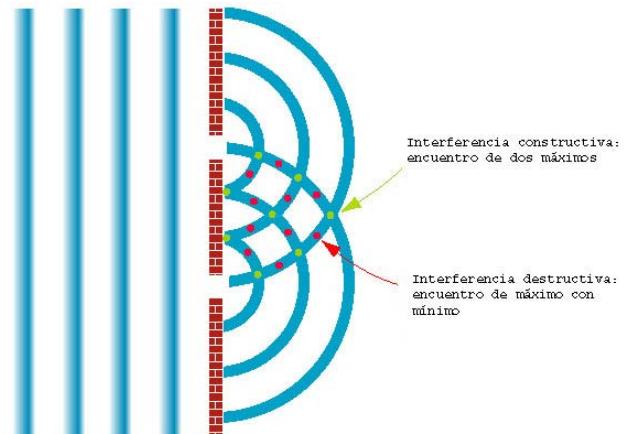


Figura 7.1

- **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 entero de media longitud de onda (figura 7.2).

Supongamos dos emisores puntuales coherentes, S_1 y S_2 que emiten ondas esféricas de igual frecuencia y estado de polarización. Sean estas dos ondas $\frac{a_1}{r} \exp\{ikr - \omega t\}$ y $\frac{a_2}{r} \exp\{ikr - \omega t\}$ y d la separación de las dos fuentes puntuales. D es la distancia entre el punto medio de las fuentes puntuales y el plano xy que contiene al punto de observación $P(x, y, 0)$ como se muestra en la figura 7.3. Por comodidad, supondremos que el índice de refracción del medio que rodea a nuestro esquema de trabajo es $n = 1$.



Figura 7.2

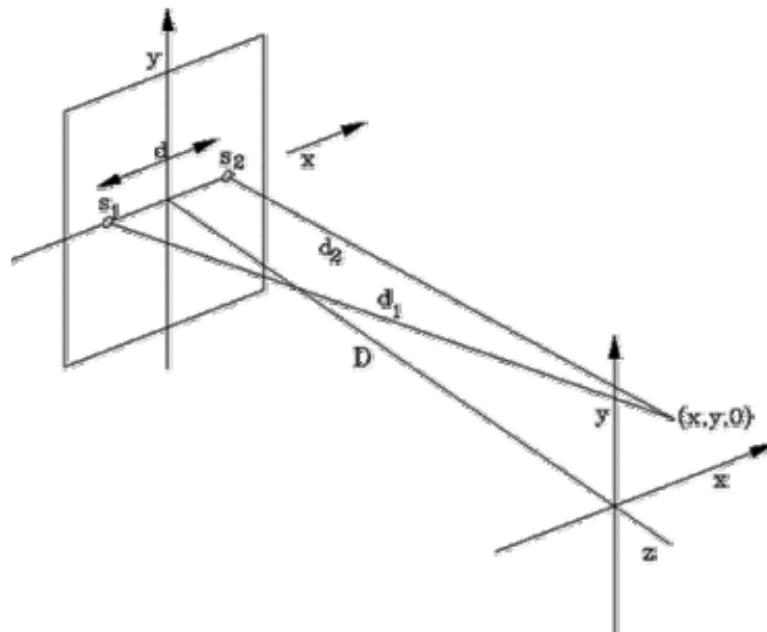


Figura 7.3. Esquema interferencial de dos ondas esféricas.

Aunque las distancias S_1P y S_2P son diferentes, si la diferencia entre las distancias que cada una recorre hasta llegar a P (d_1 y d_2) son grandes, las amplitudes en el punto P se pueden considerar iguales. Haciendo cálculos, podemos calcular la diferencia entre las distancias d_1 y d_2 de la forma:

$$d_1 - d_2 = \sqrt{\left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} - \sqrt{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} \quad (7.1)$$

donde d es la separación entre las fuentes puntuales.

En la experiencia de Young, la distancia de observación es mucho más grande que la distancia entre las fuentes, es decir, $d_1 - d_2 \gg d$, entonces, $d \ll D$ con lo que se puede aproximar $d_1 + d_2 \approx 2D$, por lo tanto, la diferencia queda:

$$d_1 - d_2 = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_1 + d_2} = \frac{2xd}{d_1 + d_2} \approx \frac{xd}{D} \quad (7.2)$$

por lo tanto, la intensidad es:

$$I \propto 4A^2 \cos^2\left(\frac{kxd}{2D}\right) = 4A^2 \cos^2\left(\frac{\pi xd}{\lambda D}\right) \quad (7.3)$$

donde k es el vector de onda y A la amplitud de la onda en el plano de observación $A = \frac{a_1}{d_1} = \frac{a_2}{d_2}$.

A la vista de esto, una vez fijada la geometría, es decir, una vez conocidas d y D y la longitud de onda, la intensidad es sólo una función de x , es decir, $I = I(x)$. Como puede verse, la intensidad no depende de la variable y , por lo que los puntos de igual densidad serán rectas paralelas al eje y . Como se desprende de la ec. (4), el perfil de intensidades varía con el coseno al cuadrado, una función que se hace máximo cuando $\frac{xd}{D} = m\lambda$ con $m \in \mathbb{Z}$ y se anula cuando $\frac{xd}{D} = \frac{2m+1}{2}\lambda$ con $m \in \mathbb{Z}$. Con lo visto hasta aquí, el máximo de orden m está en la posición:

$$x_m = m\lambda \frac{D}{d} \quad (7.4)$$

con lo que la distancia entre dos máximos consecutivos, es decir, la interfranja es:

$$x_m - x_{m-1} = \lambda \frac{D}{d} \quad (7.5)$$

• 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.

- **Algunos dispositivos:**

Existen muchos dispositivos para obtener las franjas interferences de Young. La clave está en conseguir dos fuentes emisoras de luz que sean puntuales y coherentes, es decir, que la fase aleatoria sea la misma, de esa forma, la diferencia de camino óptico es menor que la longitud de coherencia. La posibilidad más factible es conseguir dos emisiones de un mismo foco luminoso puntual de luz, veamos algunas posibilidades.

1.- Espejo de Lloyd

Se trata de colocar una fuente delante de un espejo. La imagen virtual de la fuente a través del espejo, actúa como segunda fuente coherente de la primera (real). Si el espejo es dieléctrico, el haz reflejado sufre un cambio de fase de π . El esquema se puede observar en la figura 7.4.

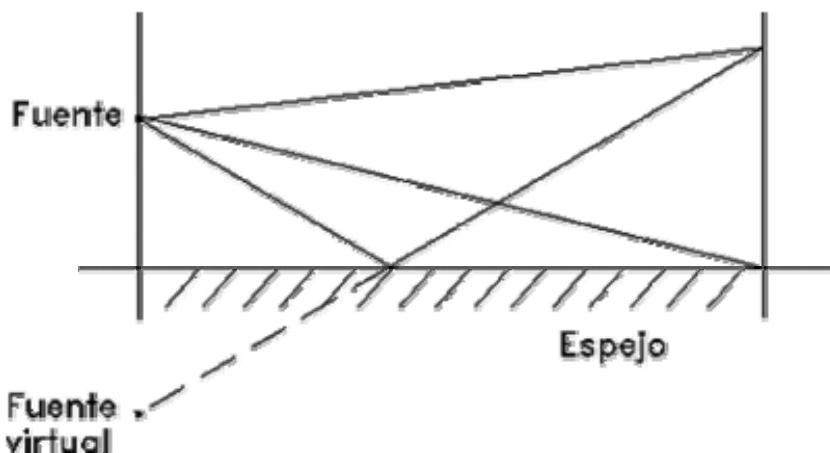


Figura 7.4. Espejo de Lloyd.

2.- Biprisma de Fresnel.

Otra posibilidad es el dispositivo del Biprisma de Fresnel. Consiste en el montaje de la figura 7.5. El ángulo α es muy pequeño, por lo que podremos utilizar las ecuaciones de los prismas delgados como buena aproximación.

Colocamos una fuente luminosa puntual a una distancia a del prisma, de esa forma, un observador situado en el otro lado (a la derecha de la figura) verá dos fuentes puntuales y coherentes correspondientes a las imágenes de la fuente a través del biprisma. En este caso, no hay diferencia de fase entre ambas fuentes, de esa forma, se puede comprobar que el patrón interferencial será el complementario de la deducida anteriormente, es decir, donde antes teníamos máximos, ahora tendremos mínimos y viceversa.

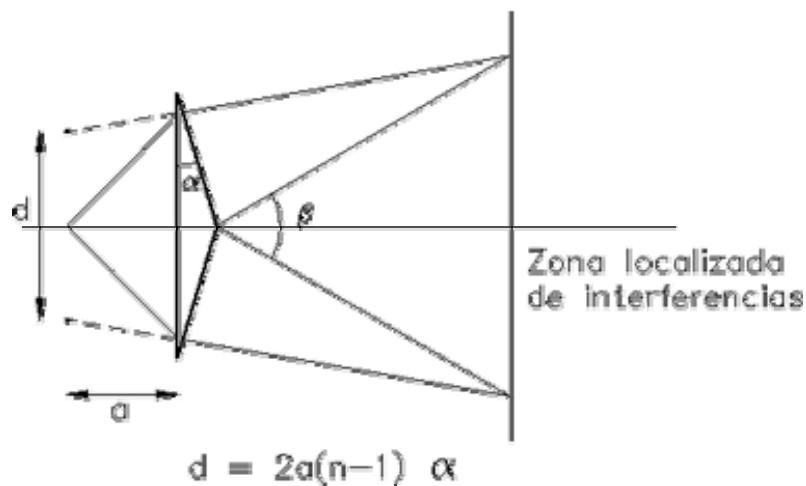


Figura 7.5. Biprisma de Fresnel.

• **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:

$$V = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m} \quad (7.6)$$

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 aprecian 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 7.3, con un pequeño desplazamiento entre ellas, provoca la pérdida de contraste.

2. Cuestiones

1. ¿Cuáles son las condiciones para que se produzcan interferencias estables en el tiempo?
2. ¿Qué diferencia existe entre la coherencia espacial y temporal?
3. ¿Se puede obtener interferencia con luces no monocromáticas?, ¿por qué?
4. ¿Es necesario que las luces que interfieren sean polarizadas?, ¿por qué?
5. ¿Cómo se puede conseguir que la diferencia de fase sea constante?
6. En un experimento de Young con $d=1$ mm, $\lambda=589$ nm y $D=5$ m, calcula la separación del centro del máximo de orden 12.



GUIÓN DE LA SESIÓN DE PRÁCTICAS N° 7

Objetivo de la práctica

Observación de las franjas de interferencias de Young y medida de la longitud de onda (aparentemente monocromática) de la radiación luminosa utilizada.

Realización del experimento

A) Puesta a punto del dispositivo.

Las dos rendijas de luz con las que trabajamos son las imágenes virtuales que un biprisma de Fresnel da de una rendija lineal iluminada por una lámpara de sodio que usamos como fuente de luz. Así es como se produce la división del frente de onda. Como las dos provienen de una misma fuente, sus vectores eléctricos son paralelos, son haces del luz coherentes, y su frecuencia y amplitud son iguales. Con todas estas condiciones nos aseguramos de que existirá el fenómeno de la interferencia.

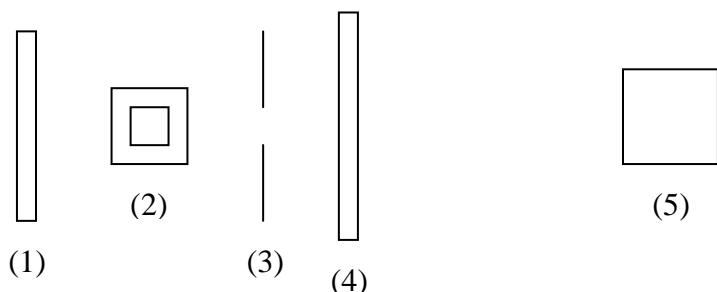


Figura 7.6. Esquema del montaje del biprisma de Fresnel. (1) Lámpara espectral (de sodio), (2) Condensador, (3) Rendija, (4) Biprisma de Fresnel y (5) Ocular Micrométrico¹.

La figura interferencial la observaremos con ayuda de un ocular micrométrico, que nos permitirá medir con precisión la separación de las rendijas y de las franjas de luz y penumbra. El retículo actuará de pantalla, y nos permitirá medir con precisión tanto la separación de las franjas como la separación de las rendijas.

El dispositivo experimental queda montado sobre el banco óptico como indicamos en la figura 7.6. Para realizar la puesta a punto del montaje, alineamos el biprisma con la rendija de modo que se observe la máxima luminosidad o claridad en la imagen a través del ocular. Esto se puede llevar a cabo moviendo el tornillo que tiene el jinetillo que aguante al biprisma, y nos permite el movimiento transversal. El biprisma estará entonces cerca de la rendija con su arista vertical paralela a ésta, lo conseguiremos mediante el giro de la rendija. Si hemos llevado a cabo dicho alineamiento correctamente, encontraremos las franjas de luz equiespaciadas al mirar a través del ocular, en

¹ El tornillo micrométrico en el ocular tiene una sensibilidad de $\pm 5\mu$ ó 0,01mm, por lo que los errores de las medidas tomadas con él, tendrán 10μ ó 0.01mm por ser diferencias de dos medidas.

ese momento, tendremos el principio de la alineación. Una vez llegado aquí, alejamos el ocular del prisma, con cuidado de no perder de vista dichas franjas. Si no fuera así, y a medida que desplazamos el ocular el patrón interferencial salen del campo de visión del ocular, habría que actuar sobre el tornillo de desplazamiento transversal para volver a introducir el patrón en el campo. Una vez conseguido, la distancia entre ocular y biprisma debe ser superior a cuatro veces la focal de una lente que luego usaremos (para poder así encontrar las posiciones de Bessel).

Como explicamos en el trabajo previo, la rendija ha de ser lo suficientemente estrecha para que no perdamos coherencia espacial, pero lo suficientemente ancha para dejar pasar la cantidad de luz suficiente para permitirnos observar el patrón interferencial. Esto lo conseguiremos accionando el tornillo que permite la abertura de la rendija.

B) Medida de la interfranja.

Con el ocular micrométrico, medimos la separación de las franjas. La media de estas medidas será el triple de la separación entre franjas de luz para disminuir el error en la medida. El montaje experimental es el mostrado en la figura 7.7, y a partir de la ec. (7.5) del trabajo previo, obtenemos la expresión siguiente:

$$s = x_{k+3} - x_k = 3\lambda \frac{D_1 + D_2}{d} \quad (7.7)$$

La separación entre máximos y mínimos dependerá, como se sabe, de la separación "d" entre las dos fuentes, de la distancia "D" de éstas al lugar de interferencia y de la longitud de onda de la radiación utilizada como se muestra en la figura 7.7.

Para la realización práctica de la medida de la interfranja actuaremos de la siguiente forma. Fijamos el ocular a una distancia del biprisma algo superior a cuatro veces la focal de la lente (como ya indicamos anteriormente) y llevamos mediante el tornillo micrométrico el hilo vertical móvil del retículo

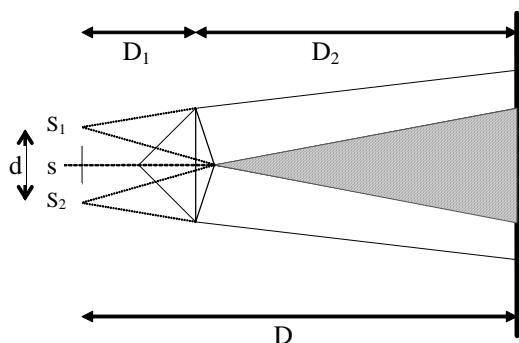


Figura 7.7. Esquema del montaje de la práctica del biprisma de Fresnel encontrada en el laboratorio.

para que coincida con una de las franjas brillantes. Tomamos la lectura del ocular y a continuación desplazamos de nuevo el hilo vertical del retículo hasta que coincide con la tercera franja brillante más próxima a la de partida. Tomamos la lectura del micrómetro y la diferencia de lecturas nos dará el valor de las tres interfranjas.

Repetimos esta operación, al menos tres veces (en principio, una vez hechos los cálculos, nos daremos cuenta de que necesitamos más medidas), intentando medir de tres en tres franjas a lo largo de todo el campo visual, así podremos promediar mejor y podremos hacer el cálculo de errores correspondiente.

C) Medida de la distancia entre rendijas.

Sin alterar el montaje que tenemos, introducimos una lente convergente entre el biprisma y el ocular micrométrico. Desplazamos dicha lente hasta

encontrar las dos posiciones de Bessel y observar la doble rendija a través del ocular. La distancia entre rendijas "d" vendrá dada por

$$d = \sqrt{d'_1 d'_2} \quad (7.8)$$

siendo d'_1 y d'_2 (ambas de signo contrario a d) las distancias entre rendijas en cada una de las posiciones de Bessel, que mediremos con ayuda del tornillo de desplazamiento del ocular micrométrico.

D) Medida de la distancia entre las rendijas y el ocular micrométrico.

Podemos calcular D de la ecuación:

$$D = f' \left(2 - \frac{d^2 + d'^2_1}{dd'_1} \right) \quad (7.9)$$

donde f' es un valor conocido y dado en el laboratorio.

Ahora estamos en condiciones de sustituir todos los datos en la ec. (7.7) para calcular la longitud de onda utilizada en nuestro dispositivo (y su correspondiente error).

