

SESIÓN 6:

BIPRISMA DE FRESNEL

TRABAJO PREVIO

○ CONCEPTOS FUNDAMENTALES

- **Interferencia óptica**

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. 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 6.1).

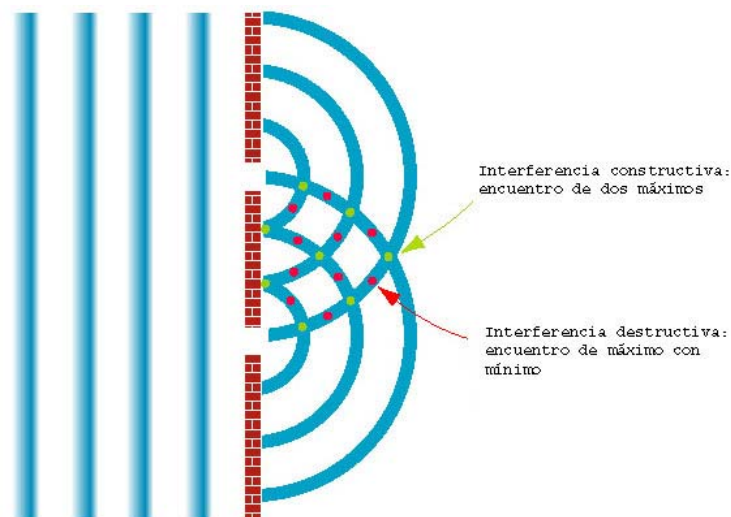


Figura 6.1. Interferencia de dos ondas.

- **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**



Thomas Young (Somersetshire, Gran Bretaña 1773 – Londres 10 de mayo de 1829). Médico y matemático británico. Nacido en el seno de una familia de cuáqueros, estudió Medicina en Londres (1792), Edimburgo y Gotinga, donde se graduó.

En 1797 pasó a ocupar una cátedra en la Universidad de Cambridge. De allí marchó a Londres (1799). En 1801-02 fue catedrático de Filosofía natural de la "Royal Institution"; a pesar de ello, hasta 1814 siguió ejerciendo la Medicina. Ostentó numerosos cargos. Debe su fama, sobre todo, a sus trabajos acerca de la óptica física y de la fisiológica. Los resultados de las investigaciones que llevó a cabo en tal campo se hallan expuestos en sus *Memorias sobre la luz y sobre el calor* (1800-02), donde aparecen formuladas por vez primera las teorías de la interferencia de la luz y de su naturaleza ondulatoria. Esta hipótesis, presentada ya en 1691 por Christian Huyghens provocó animadas protestas y discusiones, pues se hallaba en contraste con la teoría newtoniana, que dominaba. Young, que fue además un notable poliglota, alcanzó un mérito singular en un orden muy diverso de estudios e intereses: la egiptología, a la cual aportó una valiosa contribución, singularmente en cuanto a la lectura de los papiros y a la interpretación de los jeroglíficos, sobre lo que escribió numerosas obras.

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 (figura 6.2).

Pantalla



Distribución de intensidad

Figura 6.2. Patrón de interferencias.

Supongamos dos emisores puntuales coherentes, S_1 y S_2 que emiten ondas esféricas de igual frecuencia y estado de polarización, dadas por las expresiones:

$$\frac{a_1}{r} e^{i(kr - \omega t)} \quad \text{y} \quad \frac{a_2}{r} e^{i(kr - \omega t)} \quad (6.1)$$

Sea d la separación de las dos fuentes puntuales, D 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 6.3. Por comodidad, supondremos que el índice de refracción del medio es $n=1$.

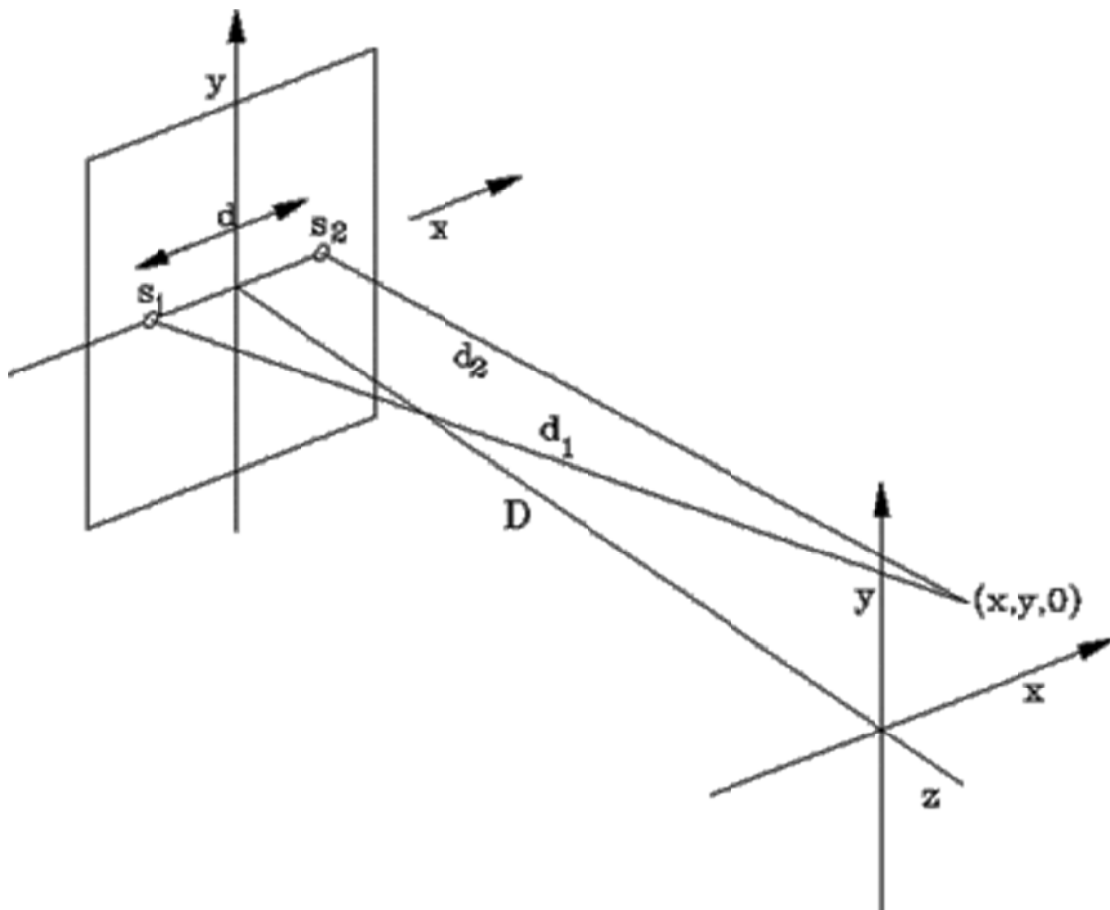


Figura 6.3. Esquema interferencial de dos ondas esféricas.

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

$$d_1 - d_2 = \sqrt{\left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} - \sqrt{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + y^2 + D^2} \quad (6.2)$$

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:

$$d_1 - d_2 = \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_1 + d_2} = \frac{2xd}{d_1 + d_2} \approx \frac{xd}{D} \quad (6.3)$$

Entonces, la intensidad es:

$$I \propto 4A^2 \cos^2\left(\frac{kxd}{2D}\right) = 4A^2 \cos^2\left(\frac{\pi xd}{\lambda D}\right) \quad (6.4)$$

donde k es el vector de onda y A la amplitud de la onda en el plano de observación, que viene dada por:

$$A = \frac{a_1}{d_1} = \frac{a_2}{d_2} \quad (6.5)$$

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 ecuación (6.4), el perfil de intensidades varía con el coseno al cuadrado, una función que se hace máxima cuando $xd/D=m\lambda$ (con $m \in Z$) y se anula cuando $xd/D=(2m+1)\lambda/2$ (con $m \in Z$). Por tanto, el máximo de orden m estará en la posición:

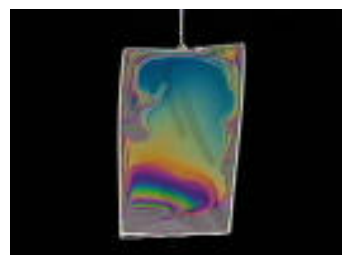
$$x_m = m\lambda \frac{D}{d} \quad (6.6)$$

La interfranja, distancia entre dos máximos consecutivos, será:

$$x_m - x_{m-1} = \lambda \frac{D}{d} \quad (6.7)$$

• 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 o en manchas de aceite sobre la calzada. Estos efectos se deben a la interferencia de las ondas de luz que se reflejan de las superficies frontal y posterior de la película.



- **Biprisma de Fresnel**



Augustin Fresnel (Broglie, 10 de Mayo de 1788 - Ville d'Avray, 14 de Julio de 1827). Físico francés. Cursó estudios en Caen y en la Escuela Politécnica de París. Miembro de la Academia de Ciencias francesa y de la Royal Society. Consagrado al estudio de la Óptica, demostró experimentalmente la naturaleza ondulatoria de la luz y explicó los fenómenos de polarización y de doble refracción. Fresnel demostró que dos rayos de luz polarizada en diferentes planos no muestran efectos de interferencia, deduciendo que el movimiento ondulatorio de la luz no era longitudinal, si no transversal. Inventó el biprisma de franjas (biprisma de Fresnel), con el que se pueden estudiar los fenómenos de interferencia, y el sistema formado por dos espejos planos en ángulo (espejos de Fresnel), con el que se obtienen focos de luz coherente. Ideó un método geométrico (construcción de Fresnel) para determinar la amplitud y el ángulo de fase de un movimiento oscilatorio resultante de otros dos de igual frecuencia y fases diferentes, en el que las amplitudes de los movimientos componentes son consideradas como vectores y se obtiene su suma por la regla del paralelogramo. Las llamadas ecuaciones de Fresnel permiten relacionar la intensidad de un haz luminoso con la intensidad de los haces reflejado y refractado.

Existen muchos dispositivos para obtener las franjas interferenciales de Young: espejo de Lloyd, biprisma de Fresnel, etc. 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.

El Biprisma de Fresnel consiste en el montaje de la figura 6.4. El ángulo α es muy pequeño, por lo que podremos utilizar las ecuaciones de los prismas delgados como buena aproximación.

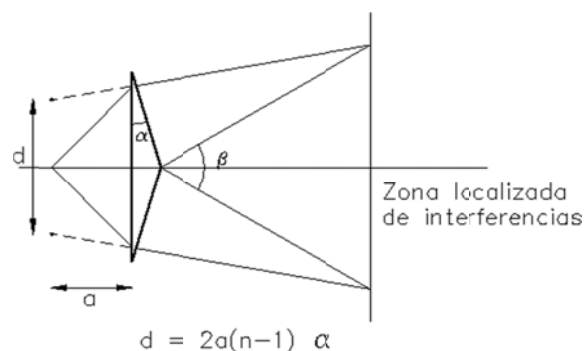


Figura 6.4. Esquema del biprisma de Fresnel.

Coloque una fuente luminosa puntual a una distancia a del prisma, de esa forma, un observador situado en el otro lado del biprisma (a la derecha de la figura) verá dos fuentes puntuales y coherentes correspondientes a las imágenes de la fuente a través del biprisma.

• 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:

$$V = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m} \quad (6.8)$$

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 (6.4), con un pequeño desplazamiento entre ellas, provoca la pérdida de contraste o visibilidad.

○ 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, calcule la separación desde el centro del máximo de orden 12.

GUIÓN DE LA SESIÓN

○ **OBJETIVO**

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

○ **PUESTA A PUNTO DEL DISPOSITIVO**

Las dos rendijas de luz con las que trabajamos son las imágenes virtuales que un biprisma de Fresnel produce de una única rendija lineal iluminada por una lámpara de sodio que utilizamos 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 de luz coherentes, y su frecuencia y amplitud son iguales. Con todas estas condiciones nos aseguramos de que existirá el fenómeno de la interferencia.

Coloque la lámpara espectral de sodio, a continuación el condensador y la rendija en la posición donde la luz sea más intensa por efecto del condensador. Después coloque el biprisma y a cierta distancia de este el ocular micrométrico, que utilizará para observar la figura interferencial. Además el retículo del ocular actuará de pantalla y le permitirá medir con precisión la separación de las rendijas y de las franjas.

❖ Dependiendo del modelo el tornillo micrométrico del ocular tiene una sensibilidad de $\pm 5 \mu\text{m}$ ó 0.005 mm , por lo que las incertidumbres en las medidas tomadas tendrán $10 \mu\text{m}$ o 0.01 mm . En otros modelos la sensibilidad puede ser diferente.

Para realizar la puesta a punto del montaje, alinee 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 aguanta al biprisma, y que permite el movimiento transversal. El biprisma estará entonces cerca de la rendija con su arista vertical paralela a ésta, si no fuera así tendrá que alinearla girando la rendija. Si el alineamiento es correcto, se observaran franjas de luz equiespaciadas al mirar a través del ocular. Entonces alejamos el ocular del biprisma, con cuidado de no perder de vista dichas franjas. Si a medida que desplazamos el ocular el patrón interferencial sale del campo de visión del ocular, habrá 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 auxiliar que luego usará. De esa forma se pondrán encontrar las dos posiciones de Bessel.

Como se ha explicado en el trabajo previo, la rendija ha de ser lo suficientemente estrecha para no perder la coherencia espacial, pero lo

suficientemente ancha para dejar pasar la cantidad de luz suficiente para permitirnos observar el patrón interferencial. Esto se consigue mediante el tornillo que permite la abertura de la rendija.

○ MEDIDA DE LA INTERFRANJA

Mediante el ocular micrométrico mida la separación entre 3 franjas (3 veces el valor de la interfranja) para reducir la incertidumbre de la medida. Como siempre, realice tres medidas para conocer el número de medidas necesarias (a partir del tanto por ciento de dispersión). Por tanto, la media de las medidas será el triple de la separación entre las franjas. El montaje experimental es el mostrado en la figura 6.5, y a partir de la ecuación (6.7), obtenemos la expresión siguiente:

$$s = x_{k+3} - x_k = 3\lambda \frac{D_1 + D_2}{d} = 3\lambda \frac{D}{d} \quad (6.9)$$

La separación entre máximos y mínimos dependerá de la distancia 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, λ .

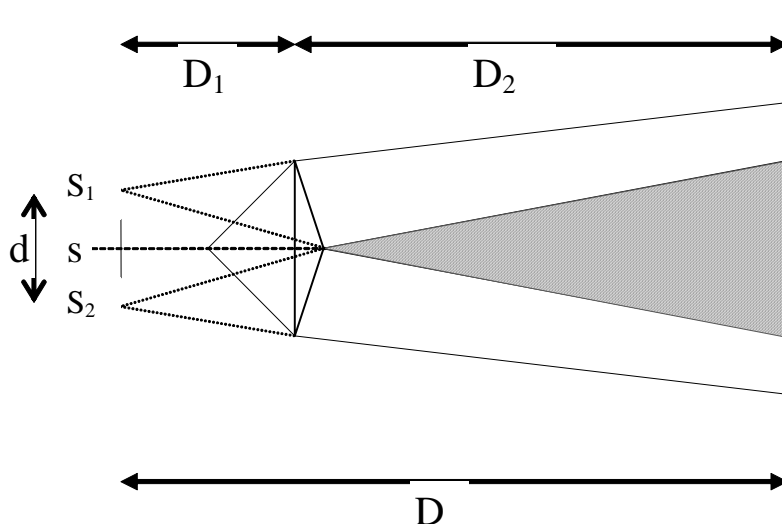


Figura 7.7. Esquema del montaje de la práctica del biprisma de Fresnel.

❖ La distancia D no la medirá directamente sobre el banco óptico, como suma de D_1 y D_2 , pues no conoce exactamente la localización de las imágenes de la rendija a través del prisma. Entonces calculará D en función de otros parámetros (ecuación (6.11)).

Para la realización práctica de la medida del triple de la interfranja actúe de la siguiente forma: Fije el ocular a una distancia del biprisma algo superior a cuatro veces la focal de la lente (como se ha indicado anteriormente) y coloque, mediante el tornillo micrométrico, la línea vertical móvil del retículo coincidiendo con una de las franjas brillantes. Tome la lectura del ocular y a continuación

desplace de nuevo la línea vertical del retículo hasta que coincida con la tercera franja brillante más próxima a la de partida. Tome de nuevo la lectura del micrómetro y la diferencia de lecturas será el valor de las tres interfranjas.

❖ Repita el proceso explicado al menos tres veces para estimar, mediante el cálculo del tanto por ciento de dispersión, el número de medidas a realizar. Intente medir de tres en tres franjas a lo largo de todo el campo visual, así podrá promediar mejor y realizar el cálculo de errores correspondiente.

○ MEDIDA DE LA DISTANCIA ENTRE RENDIJAS

Sin alterar el montaje, es decir sin mover la posición del ocular, introduzca una lente convergente entre el biprisma y el ocular micrométrico. Desplace dicha lente hasta encontrar las dos posiciones de Bessel y observar la doble rendija a través del ocular en cada una de las posiciones. La distancia entre las dos rendijas d vendrá dada por

$$d = \sqrt{d'_1 d'_2} \quad (6.10)$$

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

○ MEDIDA DE LA DISTANCIA ENTRE LAS RENDIJAS Y EL OCULAR MICROMÉTRICO

Puede calcular D a partir de la ecuación:

$$D = f' \left(2 - \frac{d^2 + d_1'^2}{dd_1'} \right) \quad (6.11)$$

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

Ahora está en condiciones de sustituir todos los datos en la ecuación (6.9) para calcular la longitud de onda utilizada en nuestro dispositivo con su correspondiente incertidumbre.