

Actividad VI.56 – Interferometría – Interferómetro de Michelson

Objetivo

Construcción de un interferómetro de Michelson. Estudio experimental del principio de superposición de la luz. Aplicaciones: Medición de longitudes de ondas, medición de longitudes pequeñas y determinación de índices de refracción de sustancias. Análogo acústico del interferómetro de Michelson: Tubo de Quincke.

Introducción

El interferómetro de Michelson es uno de los instrumentos de interferencia más conocido, tanto por sus múltiples aplicaciones como por su implicancia en el desarrollo de nuestro entendimiento del mundo físico. Usando este dispositivo, Michelson y Morley pusieron en evidencia la inconsistencia de la teoría del éter. Este hecho contribuyó al desarrollo de la teoría de la relatividad.^[1-3]

En la Fig. 56.1 se presenta un diagrama esquemático del interferómetro de Michelson. Este interferómetro pueden construirse artesanalmente a partir de componentes recicladas de otros equipos, o bien de componentes adquiridas específicamente para este fin.^[4] Desde luego existen modelos comerciales listos para su uso.^[5]

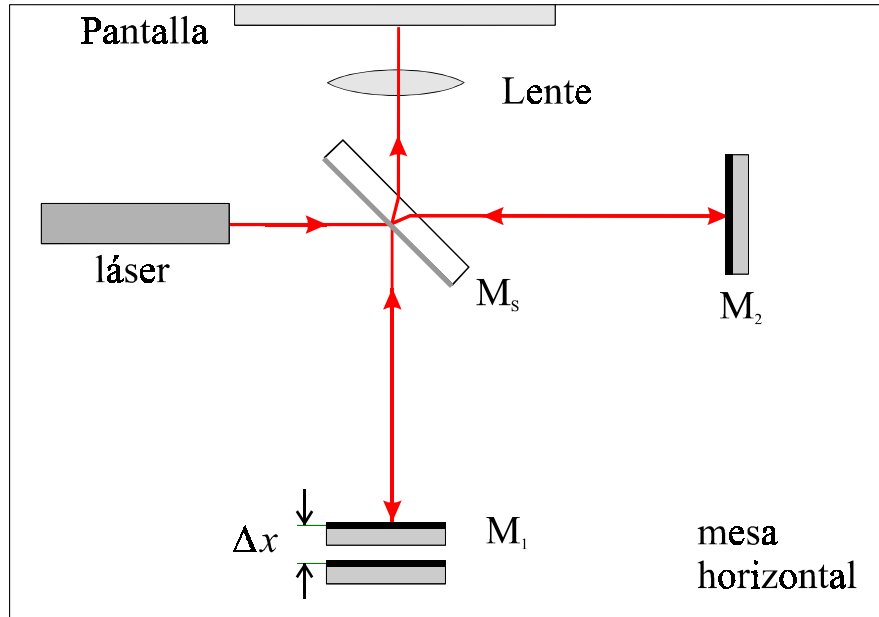


Figura 56.1 Diagrama esquemático del interferómetro de Michelson. M_1 y M_2 son dos espejos de primeras superficies. M_s es un divisor de haz (“beam splitter”) o espejo semitransparente. Los haces se recombinan en la pantalla P , donde se pueden ver las figuras de interferencia. La lente sirve para aumentar el tamaño de la imagen y hacer más visibles la imagen de interferencia.

Este interferómetro se basa en el principio de división de un haz luminoso por un divisor de haz (“beam splitter”) o espejo semitransparente, M_s . En M_s el haz incidente es en parte transmitido al espejo M_1 , y en parte reflejado al espejo M_2 . En estos espejos, ambos haces son reflejados. Luego de transmitirse y reflejarse nuevamente en M_s , dichos haces se recombinan en la pantalla P . Dependiendo de la diferencia de caminos que estos haces hayan recorrido, la interferencia en P será constructiva o destructiva. En rigor, si los espejos M_1 y M_2 no son exactamente perpendiculares, caso habitual, cada porción de haz que se refleja en distintas partes de los espejos llegará a la pantalla habiendo recorrido longitudes distintas. Esto resultará en que sobre la pantalla observemos un conjunto de líneas brillantes y oscuras, cuya orientación dependerá de cómo se realice el ajuste fino de los espejos M_1 y M_2 . Por lo tanto para obtener buenos resultados con este instrumento es importante disponer de buenos posicionadores de los espejos. Es importante contar con algún modo de regulación de los espejos. Los espejos M_1 y M_2 deben ser espejos de primera

superficie, es decir con plateado o aluminizado en la cara frontal. Tanto los espejos como los posicionadores se pueden fabricar en forma artesanal o adquirirse de proveedores comerciales.^[4] Cuando los espejos M_1 y M_2 son perpendiculares, en la pantalla P se observan anillos concéntricos brillantes y oscuros. La razón de estos anillos puede entenderse notando que los espejos M_s , M_1 y M_2 tienen por efecto producir dos imágenes de las fuentes S_1 y S_2 separadas una distancia $2\Delta x$ como ilustra la Fig. 56.2. Aquí Δx es la diferencia de longitud de los brazos del interferómetro delimitado por M_s a M_2 y M_s a M_1 . El origen de los anillos está asociado a que la diferencia de los caminos r_1 y r_2 varían con la posición del punto P en la pantalla. Si embargo, esta diferencia de camino es la misma para cualquier circunferencia centrada en el eje óptico del interferómetro (Fig. 56.2).

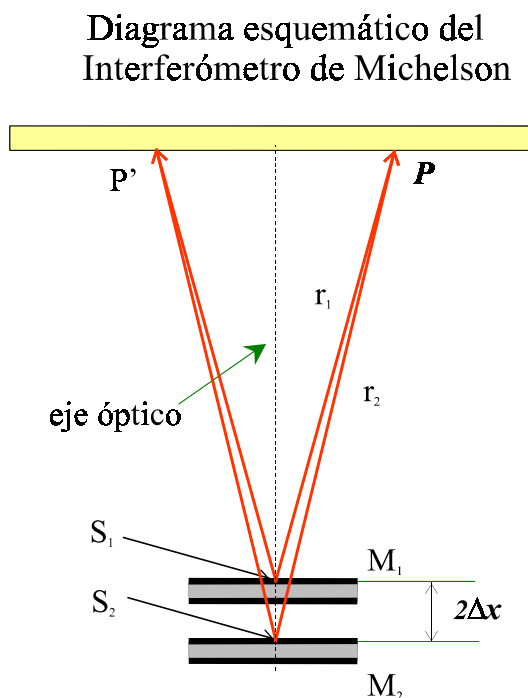


Figura de interferencia con los espejos M_1 y M_2 perpendiculares

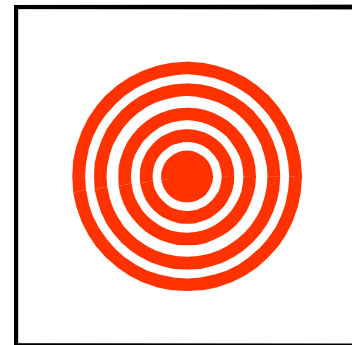


Figura 56.2 Diagrama esquemático del interferómetro de Michelson. S_1 y S_2 son las dos imágenes de la fuente formadas por los espejos M_s , M_1 y M_2 . A la derecha vemos las figuras de interferencia cuando los espejos están perfectamente perpendiculares.

Si consideramos solo el punto correspondiente al centro de la figura de interferencia, es decir el punto en la pantalla por donde pasa el eje óptico, es posible predecir la intensidad de la luz en este punto, a partir de la diferencia de camino de los rayos luminosos. Más específicamente, la diferencia de fase de los rayos que se reflejan en M_1 y M_2 serán:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot \Delta x \quad (56.1)$$

y por consiguiente, usando el principio de superposición, la intensidad media será:

$$I = I_0 \cdot \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) = I_0 \cdot \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x\right) \quad (56.2)$$

donde Δx es la diferencia de longitud de los brazos del interferómetro. Si se monta uno de los espejos M_1 o M_2 sobre un posicionador lineal móvil^[4], es posible variar la distancia Δx en forma controlada y medible.

Para visualizar más fácilmente las imágenes de interferencia es conveniente utilizar una lente convergente entre el interferómetro y la pantalla de modo de magnificar el tamaño de la figura de interferencia. Otra precaución a tener en cuenta en la preparación del interferómetro es la correcta alineación del mismo. Un modo práctico de proceder consiste en alinear en primer lugar el espejo M_2 . Esto se logra haciendo que el haz reflejado por M_2 vuelva de regreso a la fuente misma de láser, o sea que la imagen reflejada esté ubicada en el punto de salida del propio láser. Seguidamente se procede a posicionar M_1 . La posición de M_1 debe ser tal que el rayo reflejado a 90° llegue a la zona central del espejo M_2 . Una vez logrado esto, se realiza el ajuste de M_1 , observando que el haz reflejado por M_1 incida en la pantalla y se superponga con el haz reflejado por M_2 . Recién cuando se logra esta condición es conveniente colocar la lente para aumentar el tamaño de la imagen en la pantalla. La lente debe estar bien centrada con el haz. Esto se manifiesta por el hecho de

que el centro de la imagen con y sin lente no varía de posición. Una vez que se visualizan claramente las imágenes reflejadas por los dos espejos, se realiza un ajuste fino de M_1 hasta que aparezcan franjas de interferencia. La prueba final de que efectivamente estamos visualizando dicha figura de interferencia, consiste en bloquear alternativamente uno de los haces reflejados. Al bloquear uno de ellos las franjas de interferencias desaparecen y solo se observa una región iluminada, pero al posibilitar que ambos haces alcancen la pantalla se notará la presencia de la imagen de interferencia característica del interferómetro. Esta simple operación, evidencia uno de los principios más fundamentales de las ondas, *el principio de superposición*, que explica porqué luz + luz a veces resulta en más iluminación (franja brillante) y a veces luz+luz resulta en oscuridad (franja oscura).

Proyecto 1.- Determinación de la longitud de onda de un láser

Equipamiento recomendado: Un interferómetro de Michelson con uno de sus espejos montado sobre un posicionador lineal graduado. Un láser o puntero láser.

Para este experimento se requiere que uno de los dos espejos (M_1 o M_2) esté montado sobre un posicionador lineal, de modo de poder desplazarlo en forma controlada y paralela. De esta manera es posible, mediante un comparador o tornillo micrométrico asociado al posicionador, conocer los cambios en Δx que se realizan. Para este experimento es conveniente tener una buena visualización de las figuras de interferencia. Para esto, es útil colocar una lente delante de la pantalla y ajusta su posición para optimizar una buena visibilidad.

- Usando el tornillo micrométrico que regula la variación de distancia Δx , realice un ajuste fino y observe cómo al variar la distancia las zonas iluminadas van ocupando las posiciones de las oscuras y viceversa.

- Realice cambios de la posición del espejo móvil (varíe Δx) y cuente el número N de franjas brillantes (u oscuras) que van apareciendo al realizar esta operación. Construya un gráfico de Δx en función de N .
- Según (56.2), dos máximos consecutivos (o mínimos consecutivos) están asociados a un $\Delta x = \lambda/2$. Esto significa que la pendiente del gráfico de Δx en función de N tendrá una pendiente igual a $\lambda/2$. Usando esta propiedad, determine el valor de la longitud de onda del láser utilizado y su incertidumbre. ¿Cómo se compara este valor de λ con las especificaciones de su láser?
- Si se conoce la longitud de onda de la luz, este procedimiento nos permite realizar una calibración del micrómetro que regula la posición de espejo, tomado como patrón de longitud a la longitud de onda de la luz utilizada. También este método sirve para medir desplazamientos dinámicos pequeños.^[6]

Proyecto 2.- Determinación del índice de refracción de una lámina de vidrio

Equipamiento recomendado: Un interferómetro de Michelson. Un láser o puntero láser. Una muestra de vidrio plana (de caras paralelas), montada sobre un soporte giratorio con goniómetro para medir ángulos.

Si entre el separador del haz (M_s) y uno de los espejos colocamos una muestra de vidrio plana, de espesor d e índice de refracción n ., al variar el ángulo que forma la normal a la muestra de vidrio y el rayo que la atraviesa, las franjas de interferencia se moverán. Más específicamente, si para rotar la muestra desde un ángulo θ_1 a otro θ_2 observamos que por el centro de la imagen de interferencia pasaron N franjas brillantes, tenemos que:

$$N = \frac{2 \cdot \Delta x}{\lambda / n} = \frac{2 \cdot n}{\lambda} \cdot \left(\frac{d}{\cos(\theta_1)} - \frac{d}{\cos(\theta_2)} \right). \quad (56.3)$$

Por lo tanto, usando un vidrio montado sobre un goniómetro, y contando el número de franjas N en función del ángulo que rota la muestra podemos determinar el índice de refracción n de la muestra.

- Partiendo de $\theta_1 = 0$, realice un gráfico de N en función de $(1 - 1/\cos(\theta_2))$. A partir de la pendiente de este gráfico determine el valor de n y su incertidumbre. Compare el valor obtenido con especificaciones o valores de tabla para su muestra.

Proyecto 3.- Efecto del estado de polarización

Equipamiento recomendado: Un interferómetro de Michelson. Un láser o puntero láser. Dos láminas polarizadoras.

El objeto de este experimento es estudiar el efecto del estado de polarización de la luz en las figuras de interferencia de un interferómetro de Michelson. Para este experimento es útil disponer de láminas polarizadoras montadas sobre soportes giratorios, que permitan variar el estado de polarización fácilmente. Para definir el estado de polarización tomaremos como referencia la dirección normal al plano del interferómetro. Para realizar este experimento es conveniente que la luz incidente no esté polarizada o bien que el estado de polarización forme aproximadamente 45° con respecto a la dirección tomada como referencia. Los polarizadores se colocan enfrentados a los espejos M_1 y M_2 . De este modo

es posible elegir un estado de polarización diferente para cada uno de los haces incidentes sobre cada espejo. El estado de polarización correspondiente al campo eléctrico oscilando perpendicular al plano del interferómetro (dirección de referencia) lo designaremos como estado s . Al estado de polarización en el que el campo eléctrico oscila paralelo al plano del interferómetro lo designaremos como estado p . El objetivo de este experimento es estudiar cómo se modifica la imagen de interferencia con el estado de polarización (s o p) de cada uno de los haces.

- En primer lugar, alinee el interferómetro sin los polarizadores hasta hacer visibles las franjas de interferencia. Usando un polarizador a la salida del láser asegúrese que el mismo no está polarizado o, si lo está, que no esté ni en un estado s ni p puro, sino que tenga componentes en los dos estados (preferentemente a 45° grados respecto de la dirección de referencia).

- Estudie como se modifica la imagen de interferencia del interferómetro si ambos haces de luz están en los siguientes estados de polarización:
 - ✓ ambos en el estado s .

 - ✓ ambos en el estado p .

 - ✓ un haz en el estado s y el otro en el estado p .

Para asegurarse que cuando ve franjas de interferencia éstas son auténticas, varíe ligeramente la posición de uno de los espejos y observe cómo se mueven dichas franjas. Si esto no ocurre es porque no tiene interferencia. Notará que en la última posición (modos s y p) no se observa interferencia. ¿Cómo explica sus resultados?

Proyecto 4.- Separación de dobletes

Equipamiento recomendado: Un interferómetro de Michelson con uno de sus espejos montado sobre un posicionador lineal graduado. Un láser o puntero láser. Lámpara de sodio.

Supongamos que la luz incidente en el interferómetro no es monocromática, sino que está compuesta de dos líneas adyacentes de longitudes de onda λ_1 y λ_2 , con $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$. En este caso, cuando en un punto de la pantalla tengamos un mínimo de intensidad para una longitud de onda, en general no coincidirá con el mínimo de la otra longitud de onda, de modo que las franjas de interferencia serán menos nítidas. Si continuamos variando la posición del espejo móvil, se observa que en algún momento, en particular cuando las longitudes de ambos brazos coinciden, aparecerá una imagen de interferencia bien nítida. Si se varía la posición del espejo móvil, se notará que después de que el espejo ha recorrido una distancia d , la figura de interferencia vuelve a aparecer. En realidad, lo que se tiene es un batido asociado con las dos longitudes de onda. Si $\lambda_1 > \lambda_2$, podemos escribir:

$$2 \cdot d = N\lambda_1 = (N + 1) \cdot \lambda_2 \quad (56.4)$$

donde N es un entero. La diferencia de longitud de onda será entonces:

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = 2 \cdot d \cdot \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N + 1} \right) = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{2 \cdot d} = \frac{\bar{\lambda}^2}{2 \cdot d} \quad (56.5)$$

donde $\bar{\lambda}$ es la longitud de onda media $\bar{\lambda} = 0.5 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2)$. La Ec. (56.5) es una muy buena aproximación si $(\lambda_2 - \lambda_1) \ll \bar{\lambda}$. Este procedimiento puede aplicarse para determinar la diferencia de longitud de onda de un doblete, por ejemplo el asociado al doblete de la línea amarilla del Na ($\bar{\lambda} = 589.3$ nm). Para ello se puede proceder del siguiente modo:

- Usando un láser como fuente, ajuste el interferómetro hasta observar sobre la pantalla la imagen de interferencia.
- Reemplace el láser por una lámpara incandescente, y mirando desde la posición en la que estaba la pantalla, trate de recuperar la imagen de interferencia. Esta vez la observación es directa, ya que las lámparas no tiene la intensidad de un láser. Cuando observe con luz blanca la interferencia, se logró la condición de igualdad de caminos ópticos de los dos brazos. Esto es así debido a que la luz blanca contiene todos los colores del arco iris, por lo tanto sólo se observarán franjas cuando las trayectorias ópticas de ambos brazos coincidan.
- Una vez lograda la igualdad de las trayectorias ópticas, reemplace la lámpara incandescente por una lámpara de Na. Realice un ajuste fino para ver nuevamente las franjas nítidamente. Tome nota de la posición del micrómetro que mueve el espejo. Varía la posición del espejo con el micrómetro hasta que se vuelvan a ver las franjas de interferencia nítidamente. Registre la posición del micrómetro y determine la distancia d . Claramente, si le resulta más fácil determinar la distancia d a partir de dos situaciones de mínima visibilidad, el método es equivalente.
- Usando la Ec.(54.6) determine la diferencia $\Delta\lambda$ y la incertidumbre asociada a esta determinación.

Proyecto 5.- Análogo acústico del interferómetro de Michelson - Tubo de Quincke

Equipamiento recomendado: Un tubo de Quincke, un generador de funciones con un parlante, un micrófono y un osciloscopio de dos canales.

El tubo de Quincke es un interferómetro acústico análogo con un principio de funcionamiento al del interferómetro de Michelson.^[1,7] El mismo se muestra

esquemáticamente en la Fig. 56.3. Se puede construir con tubos metálicos (cobre, bronce, etc.) o tubos plásticos de los que comúnmente se usan en las instalaciones de agua. Los diámetros internos de los tubos deben estar comprendidos entre 1 cm y 3 cm aproximadamente. Uno de los brazos del sistema se desliza de manera análoga a un trombón.

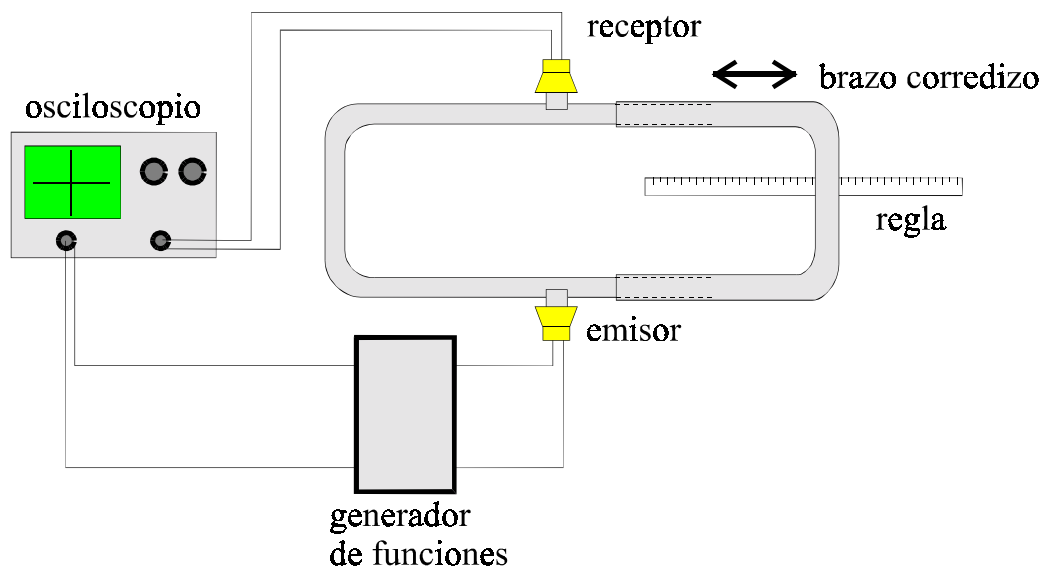


Figura 56.3 Diagrama esquemático del interferómetro acústico de Quincke. El brazo derecho del sistema puede moverse sobre una regla graduada, similar a un tubo de trombón.

La fuente de ondas acústicas es un parlante alimentado por un generador de funciones. El sonido del parlante sigue dos caminos diferentes, por el brazo derecho y por el izquierdo. El receptor capta la combinación de ambas ondas. La intensidad detectada por el receptor dependerá de la diferencia de longitud de ambos brazos Δx . Por lo tanto tendremos, igual que antes, un desfase dado por:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot \Delta x \quad (56.6)$$

y por consiguiente, usando el principio de superposición, la intensidad media vendrá dada por (56.2). Por lo tanto dos situaciones de máxima intensidad consecutivas estarán separadas por una distancia $\Delta x = \lambda/2$. Por consiguiente, midiendo las posiciones x para las que van apareciendo máximos podemos determinar la longitud de onda del sonido. Dado que la frecuencia f impuesta por el generador de funciones es conocida o medible, podemos calcular la velocidad del sonido, c , como:

$$c = \lambda \cdot f \quad (56.7)$$

- Varíe la posición del brazo móvil y verifique la ocurrencia de máximos y mínimos de intensidad. Observe en el osciloscopio tanto la señal de entrada como la respuesta del receptor.
- Usando este dispositivo y frecuencias de audio ($f \approx 2$ Khz.) determine la longitud de onda y la velocidad del sonido. Estime las incertidumbres asociadas a estas mediciones.
- Compare el valor de c obtenido con los valores de tabla a la temperatura correspondiente.

Bibliografía

1. F. Sears, M. Zemansky, H. Young y R. Freedman, *Física universitaria, vol. I y II* (Adison-Wesley Longman, México, 1999).
2. E. Hecht, *Optics* (Addison–Wesley Pub. Co., New York, 1990).
3. M. Alonso y E.J. Finn, *Física, vol. II, Campos y Ondas y vol. III, Fundamentos Cuánticos y estadísticos* (Fondo Educativo Interamericano; ed. inglesa, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1967).
4. Existen muchos proveedores comerciales de componentes ópticos, entre ellos: Edmund Scientifics (www.edsc.com), Melles-Griot (www.melesgriot.com), APS Buying Guide (www.aps.org/pt/guide)
5. Entre las firmas proveedoras de interferómetros completos está: Pasco (www.pasco.com). Una lista más extensa de proveedores la encontrará en: APS Buying Guide (www.aps.org/pt/guide)
6. J.B. Diamond, D.P. Donnelly, J.D. Breault and M.E. Mc Carthy, “Measuring small vibrations with interferometry,” *Am. J. Phys.* **58**, 919 (1990).
7. J. E. Fernández y E. Galloni, *Trabajos prácticos de Física* (Nigar, Buenos Aires, 1968).