

# Caracterización del interferómetro de Michelson

Andrew McCallum  
awmcc97@gmail.com

Joaquín Sequeira  
joaquinetsequeira@gmail.com

Tadeo Rodríguez  
tadeorodriguez842@gmail.com

21 de Junio, 2023

En este trabajo se montó un interferómetro de Michelson utilizando un láser de longitud de onda tabulada de 655 nm. Se utilizó el dispositivo experimental para calcular  $\lambda$  a partir de la presencia de un máximo de intensidad en el centro del patrón para distintas diferencias de largo entre los brazos. Se obtuvo  $\lambda = (812 \pm 1)$  nm. Además se midió el contraste entre los máximos y los mínimos utilizando un fotodiodo y una cámara, obteniendo respectivamente  $(0,934 \pm 0,018)$  y  $(0,508 \pm 0,071)$ .

## 1. Introducción

La interferencia de la luz es un fenómeno muy importante para la óptica, y su estudio es relevante muchas ramas de la física. Se produce cuando dos o más ondas se superponen en el espacio. Partiendo del principio de superposición, que establece que la perturbación resultante de dos ondas es la suma de cada una de ellas por separado, la intensidad de dos ondas electromagnéticas se puede escribir como [1]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\kappa|r_1 - r_2| + \epsilon(t)).$$

Donde  $I_1$  y  $I_2$  son la intensidad de cada onda,  $\kappa$  el número de onda y  $r_1$  y  $r_2$  son las distancias entre la fuente puntual respectiva y la posición en la que se mide la intensidad.

Además, se puede ver que en el caso más general la amplitud depende de la fase relativa  $\epsilon(t)$  entre las dos ondas. Las fuentes tienen una propiedad llamada tiempo de coherencia, que está definida como el intervalo temporal en el que emiten una onda con la misma fase. Este suele ser extremadamente pequeño, lo cual no es un dato menor, ya que en la práctica no resulta sencillo encontrar dos ondas con un desfase constante que permita observar la interferencia. Los experimentos de interferencia están armados de manera tal que esta diferencia de fase no sea un problema. La solución que se propone con los interferómetros es utilizar haces provenientes de una misma fuente. Esto hace que, a menos que la diferencia de camino óptico  $\kappa|r_1 - r_2|$  sea muy grande y el tiempo de coherencia muy corto, los haces que interfieren tengan un desfase que se puede aproximar como constante.

Los interferómetros se clasifican en dos categorías: por división de amplitud y por división de frente de ondas. En los primeros, como el interferómetro de Michelson, se divide el haz de luz proveniente de la fuente original en dos partes. Cada una recorre diferentes caminos ópticos antes de volver a combinarse y generar el patrón de interferencia. Por otro lado, en la división de frente de ondas, como es el caso del interferómetro de Young, lo que se hace es generar diferentes caminos para distintas porciones del frente de onda. Luego los haces se superponen en un punto de observación, generando el patrón de interferencia. En ambos casos se crean fuentes secundarias a partir de una primaria, con la diferencia presente en la manera en la que se generan las mismas.

La interferometría es una rama de la física que se encarga de medir con gran precisión longitudes de onda, índices de refracción, la velocidad de la luz y otros parámetros relacionados con las ondas electromagnéticas. El interferómetro de Michelson es un dispositivo óptico fundamental para esta área. Consiste en generar dos fuentes secundarias alineadas usando un divisor de haces y espejos. El patrón de interferencia tiene forma de anillos, como muestra la figura 1, por lo que depende de la distancia con respecto a su centro.

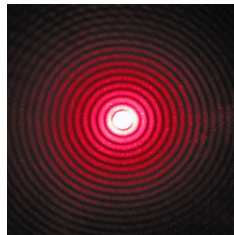


Figura 1: Patrón de intensidades generado por un interferómetro de Michaelson.

La intensidad a lo largo del patrón, como se habló previamente, depende de la diferencia de camino óptico. En particular, la diferencia de fases  $\epsilon$  es nula, ya que los haces tienen los mismos saltos de fase al reflejarse en los espejos. Para facilitar las cuentas se utiliza la aproximación paraxial, según la cual los ángulos entre los haces y el eje óptico son pequeños. En esta disposición experimental la diferencia de camino óptico está dada por  $\Delta CO = 2\Delta L \cos \frac{r}{D}$ . Aquí  $\Delta L$  es la diferencia entre los brazos del interferómetro;  $r$  es la distancia entre el centro de la pantalla y el punto en el cual se mide la intensidad; y  $D$  es la distancia entre las fuentes virtuales y la pantalla. Teniendo esto en cuenta y que  $\kappa = 2\pi/\lambda$  se obtiene la siguiente ecuación para los máximos de intensidad

$$\frac{2\Delta L}{\lambda} \cos\left(\frac{r}{D}\right) = n.$$

A partir de esto, para  $r = 0$  se llega reordenando a

$$\Delta L = \frac{n\lambda}{2}. \quad (1)$$

Esta relación es fundamental para determinar la precisión de las mediciones realizadas con el interferómetro de Michelson, ya que asocia las variaciones en el desplazamiento relativo de los espejos con los cambios en la longitud de onda de la luz.

El contraste es una magnitud relacionada a la diferencia de intensidades entre un máximo y un mínimo. Está dada por

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (2)$$

En la sección de desarrollo experimental se muestra el armado del interferómetro de Michelson, detallando los procesos de calibración que llevan a que funcione. Además, se detallan los experimentos que se realizaron para encontrar tanto la longitud de onda del láser como como el contraste del patrón de intensidades.

## 2. Desarrollo experimental

Este trabajo consistió en armar un interferómetro de Michelson. El dispositivo experimental se puede ver en la figura 2. Este consiste en utilizar una fuente de luz monocromática, en este caso un láser de longitud de onda tabulada de 655 nm. El haz emitido se separa en dos al pasar por un divisor de haz. Uno de los haces se refleja en un espejo fijo, enfrenteado al láser, y el otro se refleja en un espejo móvil situado en perpendicular con el camino óptico entre el láser y el primer espejo. Luego, ambos haces se reflejan nuevamente en el divisor e inciden sobre la pared creando un patrón de interferencia. Según la diferencia de camino óptico, se producirán anillos de interferencia constructiva o destructiva.

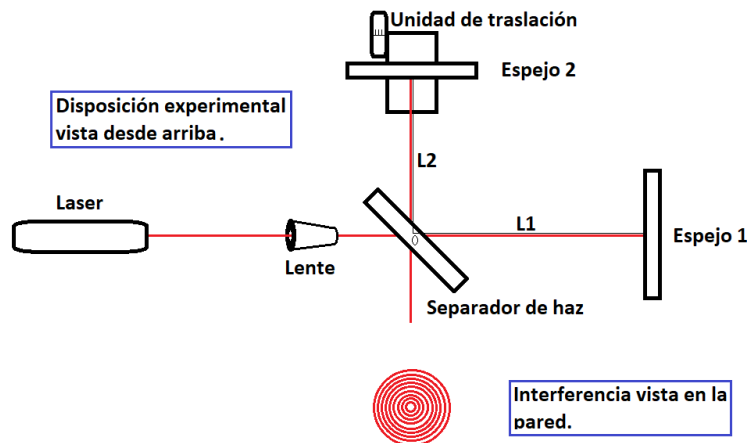


Figura 2: Esquema experimental. Se observa un láser incidiendo sobre un divisor de haz tras pasar por una lente. Luego se pueden ver el espejo 1 fijo y el espejo 2 montado sobre una unidad de traslación.

Se buscó calibrar correctamente este dispositivo, ya que requiere de extremada precisión para que los resultados sean los buscados. Para eso se colocó un láser y se lo alineó con la mesa óptica, buscando que se mantuviese quieto. Luego se colocó el primer espejo, a una distancia  $(43,5 \pm 0,1)$  cm del láser. Esto se hizo de tal manera que el haz incidiese perpendicularmente en el espejo, y que su reflejo volviese sobre el mismo camino, incidiendo cerca del láser (no exactamente sobre el mismo para evitar fallas en su funcionamiento). Una vez logrado esto, se colocó el divisor de haz a una distancia  $(34,0 \pm 0,1)$  cm del láser, y se lo rotó hasta lograr que el haz reflejado estuviera perpendicular al camino entre el láser y el primer espejo. Se midió la distancia entre el divisor de haces y el espejo,  $L_1 = (9,5 \pm 0,1)$  cm. Con el objetivo de que las distancias entre los espejos y el divisor fuese la misma, se colocó la unidad de traslación, sobre la que se fijaría el segundo espejo, en  $L_2 = (9,4 \pm 0,1)$  cm, con el micrómetro de la unidad de traslación en  $(12,0 \pm 0,1)$  mm. Este elemento cumplía con la función de variar la diferencia de camino óptico entre las fuentes al alterar la diferencia de largo entre los brazos del interferómetro. De esta manera, al iniciar el experimento se tenía  $\Delta L = (2,0 \pm 0,1)$  mm.

Luego se observaron los haces sobre la pared y se alinearon las imágenes. Una vez logrado esto se colocó una lente objetivo microscopio con magnificación igual a 10 entre el láser y el divisor de haz, a una distancia  $(26,5 \pm 0,1)$  cm para aumentar el tamaño de la imagen del patrón. De esta manera se pudieron observar correctamente los anillos.

Con el objetivo de poder medir la longitud de onda a partir de los máximos encontrados con la variación del camino óptico se colocó un fotodiodo enfrente al segundo espejo, a una distancia  $(22,0 \pm 0,1)$  cm del divisor de haz, tal que el centro de la figura de interferencia incidía sobre este. Se colocó el detector en la escala de 600 lx. Para confirmar que la intensidad recibida estuviese en su rango lineal se rotó el micrómetro de la unidad de traslación hasta obtener un máximo de interferencia en el centro y se tomó una muestra a lo largo de 10 segundos. También se lo rotó  $(10 \pm 1)$   $\mu$ m a cada lado para confirmar que este fuese un máximo. Se encontró que la misma estaba en el rango necesario.

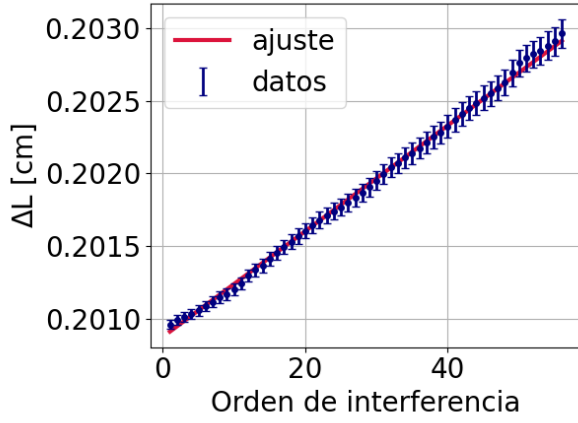
Luego se midió usando el detector con una frecuencia de 20.000 muestras por segundo durante 15 segundos. Se hizo variar la posición del segundo espejo a velocidad constante usando el micrómetro de la unidad de traslación. Una vez que se iniciaba la toma de datos se esperaba 2 segundos para poder asegurar la estabilidad del sistema a medir y luego se rotaba el micrómetro muy lentamente, frenando cuando habían transcurrido 10 segundos por la misma razón. Esta toma de datos se realizó 3 veces para poder tomar un promedio. Los barridos fueron de  $(30 \pm 1)$   $\mu$ m,  $(27 \pm 1)$   $\mu$ m y  $(30 \pm 1)$   $\mu$ m. Estos datos fueron utilizados para calcular la longitud de onda a partir de  $\Delta L$  en los máximos y para obtener el contraste.

Para medir el contraste con otro método se quitó el detector y se proyectó el patrón en una pared a una distancia  $(150,0 \pm 0,1)$  cm del divisor. Se ubicó una cámara a  $(45,0 \pm 0,1)$  cm de la pared, y con el micrómetro en  $(10 \pm 1)$   $\mu$ m ( $\Delta L = (2,010 \pm 0,001)$  mm). Se fotografió el patrón de interferencia, para analizarlo utilizando el software de procesamiento de imágenes ImageJ. El perfil de intensidades obtenido con este programa se usó para calcular el contraste.

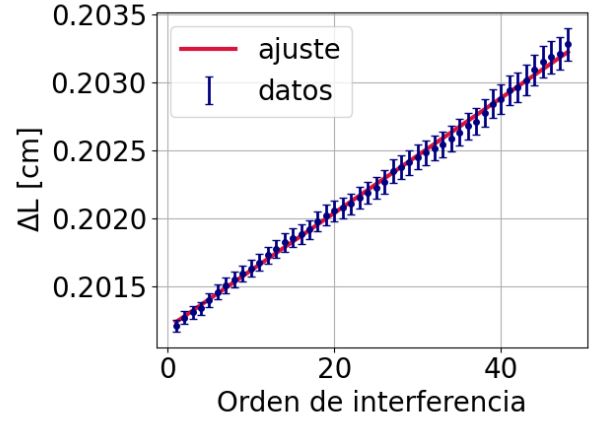
### 3. Resultados

A partir de los datos obtenidos en los barridos se calculó la longitud de onda del láser utilizando la ecuación 1. Esto se logra con el cálculo de la velocidad de desplazamiento del micrómetro, la cual se utilizó para pasar de tiempo a  $\Delta L$ . Se buscaron los máximos de intensidad, asignándoles a la posición de cada uno el orden de interferencia correspondiente, comenzando en 1 para el de menor  $\Delta L$ . Se repitió este procedimiento para las 3 series de mediciones. Estos datos se pueden ver en la figura 3 ajustados por una lineal, de cuya pendiente se extrajo el valor de la longitud de onda para cada serie. Para el primer ajuste se obtuvo un  $\chi^2 = 0,20$  y  $R^2 = 0,998$ , para el segundo,  $\chi^2 = 0,11$  y  $R^2 = 0,998$  y para el tercero,  $\chi^2 = 0,30$  y  $R^2 = 0,997$ . Se obtuvo  $\lambda_1 = (727 \pm 1)$  nm,  $\lambda_2 = (845 \pm 1)$  nm y  $\lambda_3 = (864 \pm 1)$  nm. En promedio,  $\lambda = (812 \pm 1)$  nm.

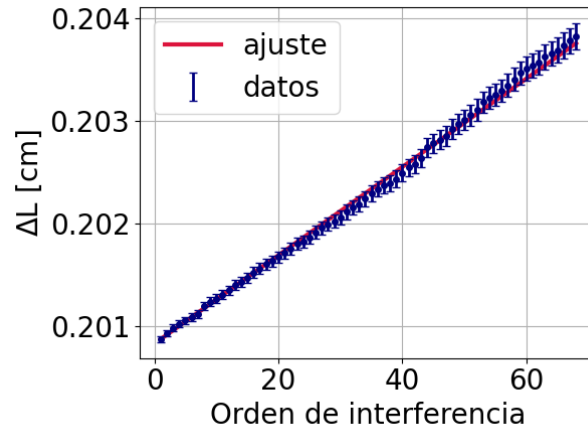
Luego, con el objetivo de calcular los contrastes, se buscaron los mínimos de intensidad para las 3 series. Se usó la ecuación 2 para cada máximo y su correspondiente mínimo, promediando los valores dentro de cada serie. Se obtuvo que para el primer conjunto de datos el contraste dio  $C_1 = (0,937 \pm 0,034)$ , para el segundo dio  $C_2 = (0,926 \pm 0,027)$  y para el tercero dio  $C_3 = (0,937 \pm 0,033)$ . En promedio,  $C = (0,934 \pm 0,018)$ . Luego se buscó calcular el contraste utilizando la fotografía previamente tomada del patrón de interferencia. Se utilizó el programa ImageJ para analizarla. Repitiendo el mismo procedimiento, se obtuvo que el contraste era  $C = (0,508 \pm 0,071)$ .



(a)



(b)



(c)

Figura 3: Gráficos de la diferencia de longitud entre los brazos para las cuales se encontraban los máximos de intensidad en función del orden de interferencia. Los datos fueron ajustados por una recta para cada serie de mediciones, con la pendiente igual a  $\frac{\lambda}{2}$ .

## 4. Conclusión

En este trabajo se buscó calibrar correctamente el interferómetro de Michelson para a partir de este poder calcular la longitud de onda del láser utilizado usando la ecuación 1. Se midió colocando el detector a *dist* del divisor de haz, en el centro del patrón interferencia. Luego rotando el micrómetro de la unidad de traslación, a una velocidad lo mas constante posible, se tomaron los datos del detector y como se dijo previamente en la sección de resultados, se calculó la longitud de onda para 3 distintas . Se obtuvo  $\lambda_1 = (727 \pm 1) \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = (845 \pm 1) \text{ nm}$  y  $\lambda_3 = (864 \pm 1) \text{ nm}$  que presentan diferencias significativas con respecto a la longitud de onda tabulada ( $\lambda_1 = 655 \text{ nm}$ ). Esto podría explicarse por la realización del barrido a mano, que depende de la capacidad de la persona que lo realiza de variar la posición uniformemente. Teniendo en cuenta además la alta sensibilidad del instrumento, se puede concluir en que no es una medición muy confiable.

Luego se buscó encontrar el contraste, utilizando ahora los mínimos del gráfico obtenido por el sensor. Utilizando la ecuación 2 se obtuvieron  $C_1 = (0,937 \pm 0,034)$ ,  $C_2 = (0,926 \pm 0,027)$  y  $C_3 = (0,937 \pm 0,033)$ . Luego se buscó encontrar el contraste en las imágenes tomadas por la cámara usando ImageJ y se llegó a  $C = (0,508 \pm 0,071)$ . Las diferencias entre estos valores pueden explicarse por diversos factores. Uno es la diferencia de las distancias donde se midió; la distancia entre el divisor y la pared donde se tomó la foto es mayor que la del divisor y el sensor. Al ser mayor la distancia se pierde intensidad. Otro factor es la resolución de la cámara. Al no ser muy alta, se mezclan puntos en los que no hay luz y puntos en los que sí, generando píxeles con intensidades mayores para los mínimos. Además se pierde intensidad en la digitalización. Todo esto lleva a mayores valores para los mínimos y menores valores para los máximos, disminuyendo el contraste.

## Referencias

- [1] Eugene Hecht. *Óptica*. 2002.