

Interferómetro de Mach-Zehnder

Juan Pablo Solís Ruiz^{a,1}

^aA01067387

Profesores Adad Yepiz Escalante y Rodolfo Rodríguez y Masegosa

Abstract—En esta práctica de laboratorio, se construyó y analizó un Interferómetro de Mach-Zehnder para estudiar la interferencia óptica y fenómenos ópticos relacionados. Se investigó la formación de franjas de interferencia, modificaciones en los brazos del interferómetro, comportamiento ante cambios en el camino óptico y polarización, y la influencia de filtros en la intensidad y patrón de interferencia. Se resaltó la alta sensibilidad interferométrica a cambios ambientales, junto con la relación entre desplazamiento de campos y orientación de franjas. Estos resultados enfatizan la versatilidad del Interferómetro de Mach-Zehnder en el estudio de fenómenos ópticos, destacando la importancia de considerar diferentes variables experimentales para obtener resultados precisos y significativos en la investigación óptica.

Keywords—Interferómetro de Mach-Zehnder, Polarización de la luz, Interferencia óptica, Fenómenos ópticos, Sensibilidad interferométrica

Contents

1	Introducción	1
2	Marco Teórico	1
2.1	Interferencia y superposición de la luz	1
2.2	Leyes Fresnel-Arago	1
2.3	Interferómetro de Mach-Zehnder	2
2.4	Materiales	2
3	Procedimiento	2
3.1	Comportamiento de la interferencia	2
3.2	Comportamiento de filtro	3
3.3	Estudio de camino óptico y frentes de onda	3
3.4	Estudio de polarización	4
4	Análisis y Observaciones	4
4.1	Comportamiento del Interferómetro	4
	Formación de Interferencia y Franjas • Influencia de la Temperatura • Influencia del Camino Óptico	
4.2	Modificaciones en los Brazos del Interferómetro	5
	Atenución con Filtros • Polarización • Modificación del Frente de Onda	
5	Conclusiones	5
6	Anexos	6
7	Referencias	6

1. Introducción

En el ámbito de la experimentación óptica, el interferómetro de Mach-Zehnder se destaca como una herramienta fundamental para el estudio de la interferencia y la superposición de la luz. Esta práctica se centra en explorar los fenómenos ópticos clave asociados con este dispositivo, desde la formación de patrones de interferencia hasta la influencia de la polarización de la luz y la sensibilidad interferométrica. Al emplear el interferómetro de Mach-Zehnder, se investigaron las leyes de Fresnel-Arago, la modificación del frente de onda y el comportamiento ante cambios en el camino óptico, entre otros aspectos. Este informe detalla el proceso experimental, el análisis de datos y las observaciones obtenidas, subrayando la importancia de estas investigaciones en el campo de la óptica experimental y los fenómenos interferométricos.

2. Marco Teórico

2.1. Interferencia y superposición de la luz

Thomas Young (nacido el 13 de junio de 1773, en Milverton, Somerset, Inglaterra, fallecido el 10 de mayo de 1829, en Londres) fue un médico

y físico inglés que estableció el principio de interferencia de la luz y, por lo tanto, resucitó la centenaria teoría de ondas de la luz.

De acuerdo con el Principio de Superposición, la intensidad del campo eléctrico E en un punto del espacio, generado por campos separados E_1, E_2, \dots de diversas fuentes contribuyentes, se expresa como:

$$E = E_1 + E_2 + \dots \quad (1)$$

Consideremos solo ondas polarizadas linealmente de la forma:

$$E_1(\mathbf{r}, t) = E_{01} \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - vt + \epsilon_1) \quad (9.2a)$$

$$E_2(\mathbf{r}, t) = E_{02} \cos(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - vt + \epsilon_2) \quad (9.2b)$$

La irradiancia en el punto de observación P se calcula como:

$$I = P\langle E^2 \rangle T \quad (4)$$

Para nuestro análisis, ignoraremos las constantes y consideraremos:

$$I = 8\langle E^2 \rangle T \quad (5)$$

Donde $8\langle E^2 \rangle T$ representa el promedio temporal de la magnitud del cuadrado de la intensidad del campo eléctrico.

La interferencia ocurre cuando los campos E_1 y E_2 se superponen, generando una irradiancia total dada por:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (6)$$

Siendo:

$$I_1 = 8\langle E_1^2 \rangle T \quad (9.5)$$

$$I_2 = 8\langle E_2^2 \rangle T \quad (9.6)$$

$$I_{12} = 2\langle E_1 \cdot E_2 \rangle T \quad (9.7)$$

El término I_{12} es conocido como el término de interferencia. Para evaluarlo, multiplicamos y promediamos la expresión:

$$E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} \cos(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} + \epsilon_1 - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \epsilon_2) \quad (10)$$

Luego de promediar, obtenemos:

$$8\langle E_1 \cdot E_2 \rangle T = \frac{1}{2} E_{01} \cdot E_{02} \cos(d) \quad (11)$$

Donde $d = (\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} + \epsilon_1 - \epsilon_2)$ representa la diferencia de fase. Si E_{01} y E_{02} son perpendiculares, $I_{12} = 0$ y $I = I_1 + I_2$. Cuando E_{01} es paralelo a E_{02} , la irradiancia se reduce a:

$$I_{12} = 2\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle \cos(d) \quad (12)$$

Dando como resultado la irradiancia total:

$$I = I_1 + I_2 + 2\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle \cos(d) \quad (9.14)$$

Dependiendo de d , la irradiancia resultante puede ser mayor, menor o igual a $I_1 + I_2$.

2.2. Leyes Fresnel-Arago

Hace más de 200 años, Fresnel y Arago publicaron las leyes que describen la interferencia de la luz polarizada. Estas leyes se formularon a partir de una serie de arreglos experimentales que producían interferencia entre haces de luz polarizada. Los experimentos consistían esencialmente en la observación de franjas de interferencia en el experimento de doble rendija de Young (o variaciones de este) al usar elementos ópticos polarizadores en los caminos de rayos. Su

manuscrito, publicado mucho antes de que se postulara la teoría electromagnética de la luz, concluye con cinco leyes empíricas que se redactaron de la siguiente manera:

1. En las mismas circunstancias en las que dos rayos de luz ordinaria parecen destruirse mutuamente, dos rayos polarizados en direcciones contrarias no ejercen ninguna acción apreciable entre sí.
2. Los rayos de luz polarizados en una sola dirección actúan entre sí como rayos naturales: por lo tanto, en estos dos tipos de luz, los fenómenos de interferencia son absolutamente iguales.
3. Dos rayos primitivamente polarizados en direcciones opuestas pueden luego llevarse al mismo plano de polarización, sin embargo, esto no les confiere la facultad de influirse mutuamente.
4. Dos rayos polarizados en direcciones opuestas, y luego llevados a polarizaciones análogas, se influyen mutuamente como rayos naturales, si provienen de un haz primitivamente polarizado en una sola dirección.
5. En los fenómenos de interferencia producidos por rayos que han sufrido doble refracción, el lugar de las franjas no está determinado únicamente por la diferencia de camino y por la diferencia de velocidades; y en algunas circunstancias, que hemos indicado, es necesario tener en cuenta, además, una diferencia igual a media longitud de onda.

2.3. Interferómetro de Mach-Zehnder

El interferómetro de Mach-Zehnder, propuesto entre 1981 y 1982 por Ludwig Mach y Ludwig Zehnder, es otro dispositivo de división de amplitud. Consiste en dos divisores de haz y dos espejos totalmente reflectantes. Las dos ondas dentro del aparato viajan por caminos separados, vease la Figura 1. Una diferencia entre las longitudes ópticas de los caminos puede ser introducida mediante un ligero inclinamiento de uno de los divisores de haz. Debido a que los dos caminos están separados, el interferómetro es relativamente difícil de alinear. Sin embargo, por la misma razón, el interferómetro encuentra una multitud de aplicaciones. Incluso ha sido utilizado, en una forma algo modificada pero conceptualmente similar, para obtener franjas de interferencia de electrones.

Un objeto intercalado en uno de los haces alterará la diferencia de longitud óptica, cambiando así el patrón de franjas. Una aplicación común de este dispositivo es observar las variaciones de densidad en patrones de flujo de gas dentro de cámaras de investigación (túneles de viento, tubos de choque, etc.).

2.4. Materiales

Se utilizaron los siguientes materiales para llevar a cabo las mediciones y experimentos:

- Laser NeHe (15 mW, @632.5 nm)
- 4 Espejos
- 2 Divisores de haz de tipo cubo
- 2 Polarizadores lineales
- Medidor de potencia
- 1 Retardador de $/2$
- Monturas para elementos ópticos
- Filtro
- Cámara fotográfica

3. Procedimiento

En esta práctica, se llevó a cabo la construcción del interferómetro de Mach-Zehnder según lo ilustrado en la Figura 1, utilizando la notación mostrada en el diagrama para referirse a los distintos puntos de análisis. Para iniciar, se procedió a la alineación y colimación de un láser con polarización vertical. Luego, se configuró el arreglo del interferómetro como se muestra en la Figura 2. Una vez completada la configuración inicial, se ejecutaron cuatro procedimientos específicos.

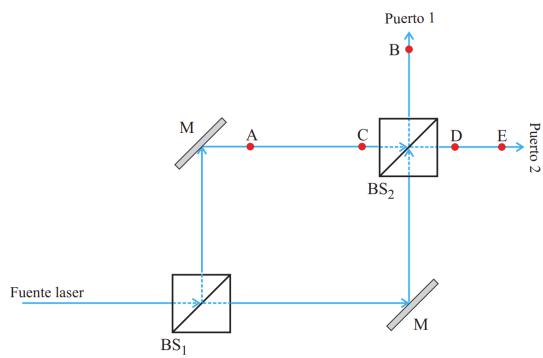


Figure 1. Diagrama de interferómetro Mach-Zehnder.

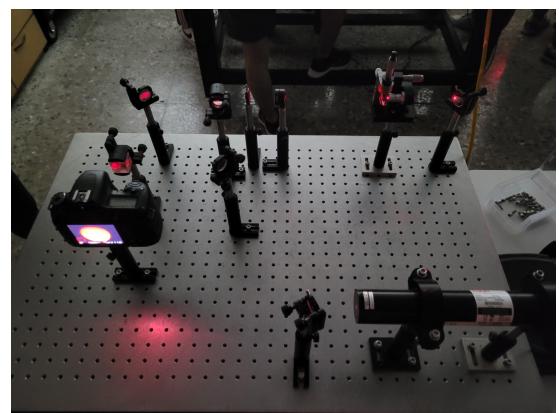


Figure 2. Arreglo experimental de interferómetro Mach-Zehnder.

En el primer procedimiento, se examinó el comportamiento natural de la interferencia generada por el interferómetro. Dado que este dispositivo permite la manipulación de caminos ópticos independientes, en el segundo procedimiento se incorporó un filtro para analizar las franjas de interferencia generadas con mayor detalle. En el tercer procedimiento, se cambió la longitud de camino óptico y la forma de los frentes de onda. Finalmente, en el cuarto procedimiento se exploraron configuraciones que involucraban interferencias con diferentes polarizaciones. Cada uno de estos procedimientos se realizó con el propósito de comprender a fondo el comportamiento del interferómetro de Mach-Zehnder y su capacidad para generar y analizar interferencias ópticas bajo diversas condiciones y configuraciones, empleando la notación del diagrama para una referencia precisa en cada etapa del experimento.

3.1. Comportamiento de la interferencia

Para estudiar el comportamiento de la interferencia, se configuró el arreglo como se muestra en la Figura 2. Se llevó a cabo una alineación precisa de los dos espejos de salida para asegurar las condiciones iniciales óptimas. Posteriormente, se capturó una fotografía del patrón generado sin realizar ninguna modificación al arreglo, tal como se presenta en la Figura 3.

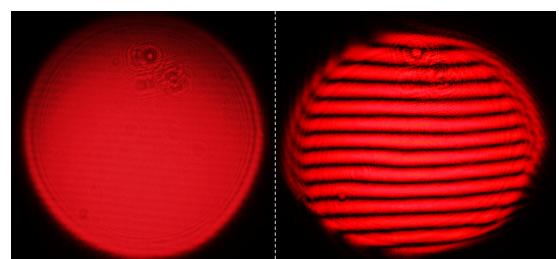


Figure 3. Patrón sin alineación, y patrón alineado con interferencia.

En el siguiente paso, se introdujo un encendedor en uno de los brazos del interferómetro y se observaron los cambios en el patrón de interferencia, como se ilustra en la Figura 4.

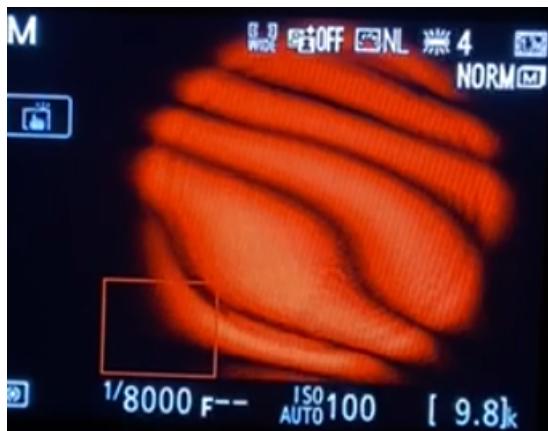


Figure 4. Deformaciones por encendedor en un brazo.

Luego, se procedió a estudiar los efectos de desalinear los espejos sobre el patrón de franjas. Los resultados de estos cambios se muestran en la Figura 5.

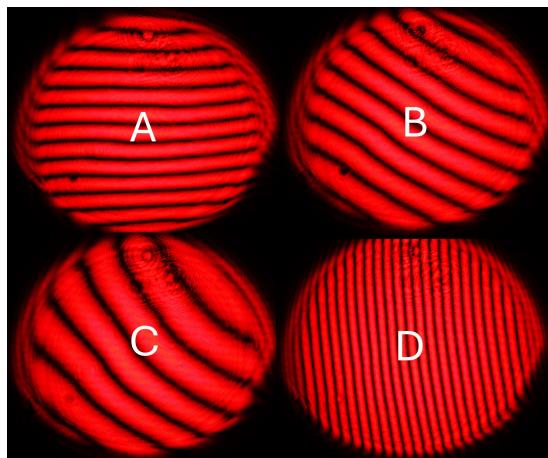


Figure 5. De la imagen A-D se muestra como se rota y cambia el número de franjas en la interferencia.

Es importante destacar que en la sección de análisis y observaciones se detallarán y explicarán los fenómenos observados durante estos experimentos.

3.2. Comportamiento de filtro

En este procedimiento, se analizó el patrón y la intensidad generada por la interferencia. Se introdujo un filtro de densidad neutra de 3, en la posición señalada como A en la Figura 1, y se midió la intensidad en ese mismo brazo con y sin filtro para determinar el porcentaje de luz transmitida por el filtro. Posteriormente, con el filtro colocado en la posición A, se observó el contraste entre las franjas y se registró una imagen del patrón de interferencia. La Figura 6 muestra el patrón de intensidad obtenido en este paso.

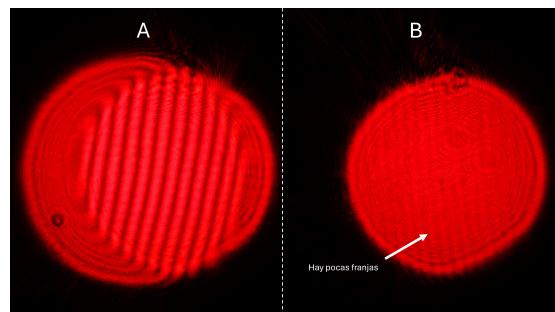


Figure 6. Imagen A, interferencia sin filtro. Imagen B, interferencia con filtro en un brazo.

Una vez completada esta parte, se procedió a colocar el filtro en la posición marcada como B y se observó el contraste en las franjas. El patrón de intensidad resultante se muestra en la Figura 7.

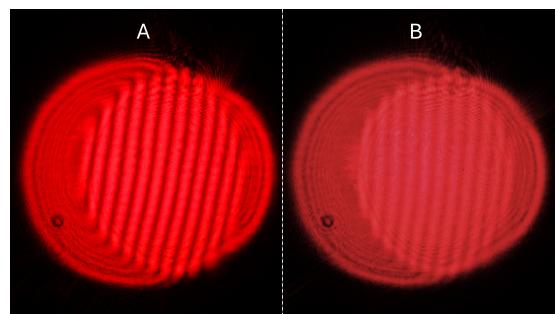


Figure 7. Imagen A, interferencia sin filtro. Imagen B, interferencia con filtro en la salida del interferómetro.

3.3. Estudio de camino óptico y frentes de onda

Para estudiar los cambios en el camino óptico, se alineó el interferómetro para que tuviera solo una franja, luego se colocó un vidrio según se muestra en la Figura 8. Posteriormente, se observaron los patrones de interferencia al girar el vidrio, lo que incrementó el camino óptico del brazo del interferómetro, como se visualiza en la Figura 9.



Figure 8. Arreglo experimental con vidrio modificador de camino óptico.

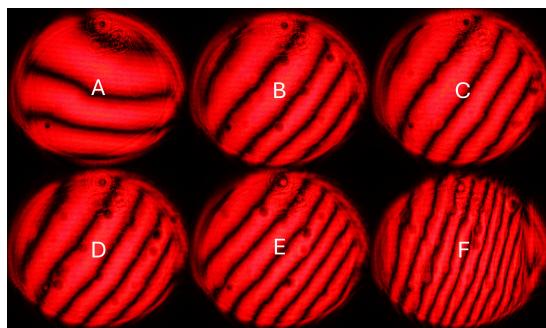


Figure 9. Imagen de A-F muestran como al ir rotando gradualmente el vidrio, el patrón de interferencia cambia.

En otro procedimiento, se analizó la interferencia entre una onda plana y una esférica. Para esto, se introdujo una lente biconvexa (el tipo específico de lente no fue crucial) en uno de los brazos del interferómetro, generando así un prente de onda esférica. Dado que el haz ya estaba colimado en el otro brazo, generando un frente de onda plano, se pudo observar el patrón de interferencia resultante, como se muestra en la Figura 10.

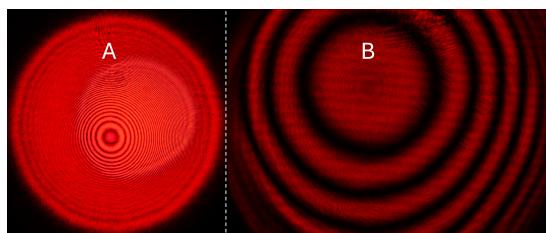


Figure 10. Imagen de A muestra interferencia anular. En la imagen B se realiza lo mismo, pero se reduce el número de anillos para mejorar la visualización.

3.4. Estudio de polarización

En este procedimiento, se colocó un retardador de longitud de onda $\lambda/2$ en el brazo A del interferómetro, de manera que al girarlo se modificara la polarización vertical a otra dirección. El polarizador se rotó hasta alcanzar los 45 grados respecto al eje rápido, lo que resultó en la desaparición de la interferencia, como se muestra en la Figura 11 (Es importante recordar que a 45 grados se obtiene polarización).

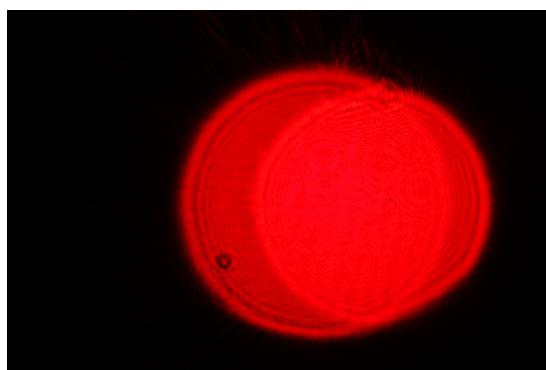


Figure 11. Dos campos con diferente polarización sobreuestos, pero sin interferencia.

Posteriormente, se colocó un polarizador lineal en la salida A del interferómetro y se giró hasta lograr la mayor intensidad de franjas, como se ilustra en la Figura 12. El polarizador estaba posicionado a 45 grados respecto al eje vertical para este paso.

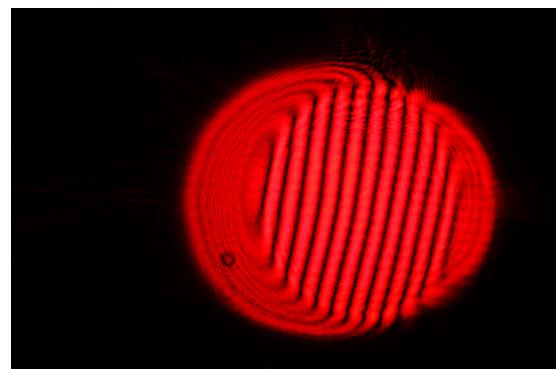


Figure 12. Dos campos con diferente polarización sobreuestos, pero con interferencia por polarizador lineal.

4. Análisis y Observaciones

4.1. Comportamiento del Interferómetro

El interferómetro de Mach-Zehnder permitió la separación de dos caminos de luz independientes, lo que facilitó el estudio de interferencias ópticas. Sin embargo, se observó una alta sensibilidad del interferómetro a cambios en su entorno; incluso pequeñas vibraciones o golpes en la mesa resultaron en deformaciones visibles en las franjas de interferencia.

4.1.1. Formación de Interferencia y Franjas

Durante el experimento, se observó de manera evidente la formación de patrones de interferencia y franjas de intensidad alternantes. El movimiento de los espejos provocó variaciones en la interferencia debido al desplazamiento de los dos campos generados. A través del estudio experimental con ondas planas, se estableció una relación entre el desplazamiento de los campos y la orientación y el número de franjas, como se ilustra en la Figura 13.

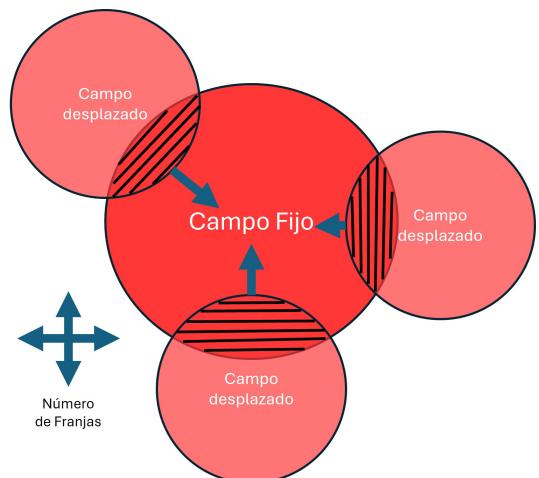


Figure 13. Diagrama de distribución de franjas en función del desplazamiento de campos a interferir.

Como se puede observar, la orientación de las franjas depende del punto de interferencia; ya sea que se superpongan de arriba a abajo, de derecha a izquierda o en un costado con cierta inclinación. Ahora bien, el número de franjas depende del desplazamiento mismo, independientemente de dónde comience, y cuando los dos campos están perfectamente alineados, las franjas desaparecen. Esta información es crucial para comprender la forma de la onda y será útil en la proyección de franjas moduladas.

4.1.2. Influencia de la Temperatura

De acuerdo con lo observado en la Figura 4, se evidenció que las variaciones en la temperatura del aire impactaron la densidad y la

refractividad del medio, ocasionando alteraciones irregulares en el camino óptico. Esto, a su vez, afectó la nitidez y la posición de las franjas de interferencia. Estos hallazgos resaltan la importancia crítica de mantener condiciones ambientales estables durante las mediciones, garantizando así la obtención de resultados precisos y consistentes.

4.1.3. Influencia del Camino Óptico

La variación en la longitud de los caminos ópticos en el interferómetro, a través del vidrio colocado en uno de los brazos como se muestra en la Figura 9, resultó en cambios significativos en el patrón de interferencia. Al modificar la longitud de uno de los caminos, tanto el número como la orientación de las franjas de interferencia se vieron afectados. Esto sugiere un desplazamiento diagonal en el patrón de interferencia, como se ilustra en la Figura 14. Esto se debe a que hubo un cambio de franjas horizontales a verticales.

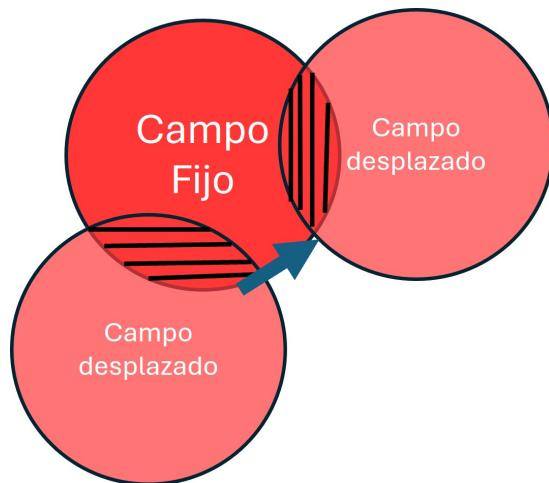


Figure 14. Diagrama de cambio en la interferencia al cambiar camino óptico mediante vidrio rotado.

4.2. Modificaciones en los Brazos del Interferómetro

Durante el experimento, se realizaron diversas modificaciones en los brazos del interferómetro para estudiar diferentes fenómenos ópticos. A continuación, se desglosará cada fenómeno observado.

4.2.1. Atenuación con Filtros

La introducción de filtros de densidad neutra en uno de los brazos del interferómetro permitió controlar la intensidad de la luz incidente y estudiar cómo esto afectaba el patrón de interferencia. Se utilizó un filtro ND = 3.0, lo que suponía una transmisión de solo el 0.1 % de la intensidad. Sin embargo, al analizar la intensidad observada en la Figura 6 utilizando Matlab, se encontró que la cantidad de luz transmitida fue del 5.9026 %. Esto sugiere un error considerable en el filtro, posiblemente debido a la presencia de una intensidad residual del otro campo no filtrado, contribuyendo a este porcentaje adicional.

Aunque el campo filtrado ya no es visible a simple vista, se observa una tenue cantidad de franjas, indicando que una pequeña cantidad de luz filtrada sigue presente en la configuración.

Ahora bien, para el caso de la Figura 7 donde se colocó el filtro en la salida del interferómetro, solamente hubo una reducción de la intensidad. lo cual es algo esperado, ya que no se modificó la ningún campo.

4.2.2. Polarización

Al modificar la polarización de la luz incidente mediante retardadores y polarizadores, se exploró cómo la polarización afectaba la interferencia y las franjas observadas. En la Figura 11, se observa que al tener diferentes polarizaciones en cada campo superpuesto (uno vertical y otro horizontal generado con un retardador de $\lambda/2$ a 45 grados), no había interferencia. Sin embargo, al agregar un polarizador lineal a

45 grados, las dos polarizaciones diferentes se convirtieron en diagonales, lo que permitió recuperar la interferencia, como se muestra en la Figura 12.

La interferencia de los campos eléctricos es básicamente la suma de vectores. Dos vectores se suman para dar un vector nulo si, y solo si, son anticolineales y tienen la misma magnitud.

La condición de (anti)colinealidad se logra solo en casos especiales. Uno de estos casos son las ondas polarizadas linealmente con la misma polarización. (Además, deben propagarse bajo un ángulo similar para que las franjas de interferencia tengan un buen contraste, de lo contrario, los vectores ya no son colineales).

Si los vectores de campo no son colineales, como en ondas de polarización diferente, nunca pueden restarse para dar cero.

Supongamos ahora que tenemos dos campos vectoriales reales $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$. La intensidad (instantánea) de cada campo es (aparte de un factor constante) dada por $\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_2$.

Si los dos campos interfieren, la intensidad instantánea se da por $(\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) = \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{E}_2 + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2$, donde $2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2$ es el término de interferencia. Supongamos que la polarización de \mathbf{E}_1 es ortogonal a la polarización de \mathbf{E}_2 , por ejemplo:

$$\mathbf{E}_1 = \begin{pmatrix} E_{1x} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ E_{2y} \\ 0 \end{pmatrix}$$

Entonces, $\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 = 0$, lo que significa que los dos campos no pueden interferir. Esta observación es la Primera Ley de Fresnel-Arago: los campos con polarización ortogonal no pueden interferir.

4.2.3. Modificación del Frente de Onda

La introducción de elementos ópticos para modificar el frente de onda, como un lente biconvexo, permitió estudiar cómo la curvatura del frente de onda influía en la formación de patrones de interferencia. Los resultados de la Figura 10 son consistentes con el patrón de interferencia teórico, vease la 15.

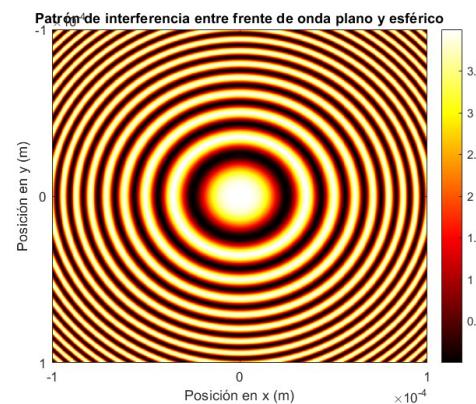


Figure 15. Patrón de interferencia entre frente de onda plano y esférico.

Estos resultados destacan la versatilidad del interferómetro de Mach-Zehnder para estudiar una amplia gama de fenómenos ópticos y la importancia de considerar diferentes variables en la configuración experimental para obtener resultados precisos y significativos.

5. Conclusiones

Esta experiencia en el laboratorio ha sido fundamental para mi desarrollo profesional en el ámbito de la óptica y la interferencia óptica. A través de la exploración y análisis detallado de los fenómenos ópticos asociados con el interferómetro de Mach-Zehnder, he profundizado mi comprensión de la interferencia de la luz, la polarización y la sensibilidad interferométrica. La calibración cuidadosa de los componentes ópticos, como los polarizadores y retardadores, fue esencial

en cada fase experimental, subrayando la importancia de la precisión en la alineación de los elementos.

Un aspecto destacado de esta práctica fue la correlación entre los resultados experimentales y las predicciones teóricas, respaldadas por simulaciones en MATLAB. Esto no solo validó los conceptos aprendidos en clase, sino que también demostró la utilidad de las herramientas computacionales en la investigación óptica.

Aprendí de manera significativa sobre la importancia de la planificación meticulosa y la ejecución cuidadosa en la experimentación. Cada paso, desde la alineación de los elementos hasta la manipulación de la polarización y frentes de onda, influyó en los resultados finales. Esta experiencia fortaleció mi capacidad para abordar desafíos científicos con rigor y precisión, preparándome para futuros proyectos en el campo de la óptica y la investigación experimental.

En resumen, esta práctica no solo amplió mi comprensión teórica de los fenómenos ópticos, sino que también mejoró mis habilidades prácticas y mi enfoque metodológico en el laboratorio, proporcionando una base sólida para futuros estudios y contribuciones científicas. En el futuro espero trabajar en la fusión nuclear, estoy seguro que estos conocimientos en óptica serán claves para mi desarrollo profesional.

6. Anexos

https://tecmx-my.sharepoint.com/:f/g/personal/a01067387_ec_mx/EuNBFdwLMKFLtlGyR9Pv1HEBSk9NgTdJoHg8Wj3LUsqrg?e=7vyudQ

7. Referencias

1. Arago, F., & Fresnel, A. J. (1819). Mémoire sur l'action que les rayons de lumière polarisés exercent les uns sur les autres. De l'Imprimerie de Feugueray, rue du Cloître Saint-Benoit, no. 4.
2. Arteaga, O. (2021). Fresnel-Arago fifth law of interference: the first description of a geometric phase in optics. *Journal of Modern Optics*, 68(6), 350–356. <https://doi.org/10.1080/09500340.2021.1898687>
3. Hecht, E. (2022). Optics (5th ed.). Pearson. ISBN 978-1-292-09693-3.
4. Konijnenberg, S., Adam, A. J. L., & Urbach, H. P. (2024). OPTICS. Delft University of Technology. Retrieved from LibreTexts website: <https://libretexts.org>
5. Morales Durán, N., & Gutiérrez López, L. A. (2014, May 10). Interferómetro de Mach-Zehnder. Universidad de los Andes, Departamento de Física.

Juan Pablo Solís Ruiz - A01067387

Contacto:

✉ A01067387@tec.mx