

# Interferómetro de Mach-Zehnder

Nicolás Morales Durán and Luis Alberto Gutiérrez López  
*Universidad de los Andes, Departamento de Física*  
(Dated: May 10, 2014)

La interferometría consiste en combinar luz proveniente de diferentes fuentes para obtener imágenes de mayor resolución, es utilizada por ejemplo en radioastronomía y dio la base experimental para demostrar que el éter no existía por parte de Michelson y Morley en 1887. En particular el interferómetro de Mach-Zehnder permite explorar las consecuencias de la dualidad onda-partícula y la no localidad de la mecánica cuántica en experimentos como el detector de bombas de Elitzur-Vaidman. Hemos trabajado en la construcción de un interferómetro de Mach-Zehnder (MZI) que incluye la caracterización de un piezoeléctrico utilizado para generar diferencias de fase. En este artículo se presentan los resultados obtenidos a partir de la interferencia generada por nuestro interferómetro, a partir del cual se podrían recrear experimentos que permitan estudiar fenómenos como la no localidad mencionada previamente.

## INTRODUCCIÓN

Entre 1981 y 1982 Ludwig Mach y Ludwig Zehnder propusieron su interferómetro, un rayo de luz se divide a través de un beam splitter en dos partes siguen dos caminos distintos que luego se recombinan con otro beam splitter. Dependiendo de la diferencia de fases entre los rayos que llegan al segundo beam splitter, éste reflejará en un porcentaje entre 0 y 100%. En un brazo se verá interferencia constructiva y en el otro destructiva.

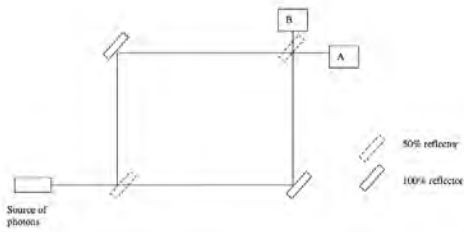


FIG. 1. Wiring diagram for Helmholtz coils.

Este interferómetro tiene aplicaciones en aerodinámica, para medir cambios de temperatura y presión en gases y permite estudiar fenómenos cuánticos como el entrelazamiento o la no localidad. El MZI es un ejemplo claro de "Path-choice problem", si fijamos que las longitudes de los dos brazos sean exactamente iguales las fases serán iguales, entonces no se sabrá en qué brazo se verá la interferencia constructiva y en cuál la destructiva.

Con el fin de obtener montajes experimentales que nos permitan apreciar estos fenómenos nada intuitivos de la mecánica cuántica construimos un MZI en el laboratorio de óptica cuántica de la Universidad de los Andes. Esta tarea incluyó además la caracterización de un material piezoeléctrico que va a ser utilizado en el laboratorio.

En este paper presentamos como resultado las gráficas de la interferencia producida por nuestro interferómetro de Mach-Zehnder, la curva de caracterización del

piezoeléctrico obtenida a partir de los patrones de interferencia y hacemos una propuesta de continuación de este proyecto.

## MARCO TEÓRICO

### Aproximación clásica

Partimos de que la intensidad de un rayo es el promedio del vector de Poynting.

$$I = S_{av} = \frac{E_{max} B_{max}}{2\mu_0} = \frac{E_{max}^2}{2\mu_0 c^2} = \frac{\epsilon_0 c E_{max}^2}{2} \quad (1)$$

Ahora, los campos eléctricos de los dos rayos que salen del primer beam splitter y se guían a través de los espejos hacia el segundo se pueden describir como:

$$E_1(t) = \frac{I_0}{2} \cos(\omega t + \delta) \quad (2)$$

$$E_2(t) = \frac{I_0}{2} \cos(\omega t) \quad (3)$$

Donde la amplitud se asume igual para ambos rayos y  $\delta$  es la diferencia de fases que se genera debido al desplazamiento del espejo móvil. Sumando estos campos al cuadrado y desarrollando obtenemos que la intensidad del patrón de interferencia será:

$$I = I_0'(1 + \cos(\delta)) = 2I_0' \cos^2(\delta/2) \quad (4)$$

Donde  $I_0' = 2\epsilon_0 c \frac{I_0^2}{2}$ , siendo  $I_0$  la intensidad del rayo que entra al interferómetro [1].

Ahora, para saber cuál será la diferencia de fases  $\delta$  que se genera al crear una diferencia en la longitud de los caminos ópticos de cada rayo utilizamos las ecuaciones de

Fresnel que se aplican al dieléctrico que tienen los beam splitters, a partir de ello obtenemos que la diferencia de fases será:

$$\delta = 2\pi\left(\frac{\Delta x}{\lambda}\right) \quad (5)$$

Siendo  $\Delta x = |l_2 - l_1|$ . Cuando  $\delta = 0$  habrá interferencia constructiva en el detector A e interferencia destructiva en el detector B.[2]

### Aproximación cuántica

En vez de hacer que un rayo entre al interferómetro, se podría comenzar a filtrar el láser hasta que solamente entren algunos fotones. Incluso se podría enviar un fotón individual al interferómetro y observar qué sucede: Consideramos que la entrada es  $|0\rangle$  si el fotón toma el camino superior y  $|1\rangle$  si el fotón toma el camino B. El primer y segundo beam splitter se pueden modelar respectivamente como:

$$Bs_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Bs_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Entonces, si suponemos que ambos brazos son exactamente iguales, la acción de los beam splitters sobre la entrada será transformarla en  $|1\rangle$ . Eso quiere decir que si el fotón tomó el camino superior, será percibido en el detector A y viceversa [3].

### MONTAJE EXPERIMENTAL

Para construir el interferómetro de Mach-Zehnder utilizamos dos beam splitters (50-50 @633 nm) y dos espejos (50 – 50, @633 nm), además se necesitan dos espejos adicionales para orientar el rayo que sale del láser y entra en el interferómetro. Se utiliza un láser de He-Ne pues debido a que presenta una forma circular muy concentrada que facilita observar la interferencia y la coherencia de los rayos cuando se encuentran es mayor. Inicialmente utilizamos un diodo láser que emitía a 650 nm pero su forma era elíptica y tenía mucha menos potencia, además, todos los espejos y los beam splitters que se utilizaron en el interferómetro tenían un funcionamiento óptimo a 633 nm. Con el diodo láser nunca se logró observar interferencia y por esto se decidió cambiar al He-Ne.

El experimento fue realizado a una altura de  $12.52 \pm 0.05$  cm, los brazos del interferómetro miden  $10 \pm 0.1$  cm. La intensidad de salida del rayo que genera el láser es de 0.875 mW, mientras que la intensidad de los patrones

de interferencia es de  $285 \pm 1 \mu\text{W}$  en el brazo superior y  $257 \pm 1 \mu\text{W}$  en el brazo inferior.

Para lograr generar una diferencia de caminos  $\delta$  que permita observar la variación de las intensidades de salida tenemos que el desplazamiento  $\Delta x \approx \lambda$ , como la longitud de onda del láser He-Ne es de 633 nm, se necesita mover el espejo en el orden de nanómetros, de tal forma que el movimiento de las franjas de interferencia sea visible, para este fin montamos uno de los espejos en un dispositivo piezoeléctrico (ThorLabs NFL5DP20S), el cual realiza desplazamientos muy pequeños al aplicarle una diferencia de potencial, que utilizamos para efectuar dicho desplazamiento. Tiene una resolución de 20nm debido a que no estaba conectado a una fuente con retroalimentación, su rango de voltajes es de 0 a 75 V [4].

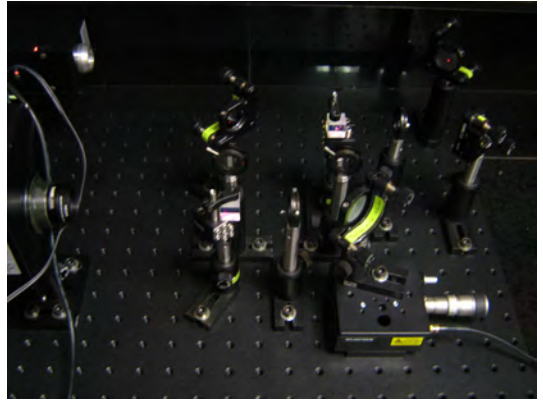


FIG. 2. Montaje del interferómetro de Mach-Zehnder.

Luego del proceso de alineación del interferómetro se procede a tomar los datos por medio de una cámara CCD. Se conecta una fuente al piezo eléctrico y se hace un programa para que varíe el voltaje aplicado, cada vez que el voltaje varía la cámara toma una foto, a partir de la cual se obtienen datos para generar las gráficas de las sinusoidales esperadas en las salidas de cada brazo del MZI, para la toma de las imágenes utilizamos en la cámara dos filtros de 40 y de 20 OD, una tiempo de exposición de 0.5 s y se tomaban imágenes cada 3 s.

### RESULTADOS

Vemos que claramente la suma de las potencias ópticas de los rayos que salen del interferómetro no es la potencia inicial que genera el láser de He-Ne como predicía el modelo teórico, esto se puede explicar pues a pesar que tanto los beam splitters como los espejos son 50-50 para una longitud de onda de 633 nm, existen pérdidas de energía que se dan en las reflexiones y las transmisiones.

Como hemos visto en la teoría, si los brazos del interferómetro midieran exactamente lo mismo y se hiciera coincidir a los dos rayos en el segundo beam splitter exactamente, tendríamos interferencia destructiva total

en un brazo (no se verá luz en absoluto) e interferencia constructiva total en el otro. Como en nuestro interferómetro la forma del láser no es un círculo perfecto y la alineación no puede ser exacta, no podremos llegar hasta este punto. Sin embargo se puede notar que las franjas de interferencia en un brazo son complementarias al otro, la idea sería seguir refinando el interferómetro hasta llegar a este punto. La figura 3 muestra la forma del patrón de interferencia.

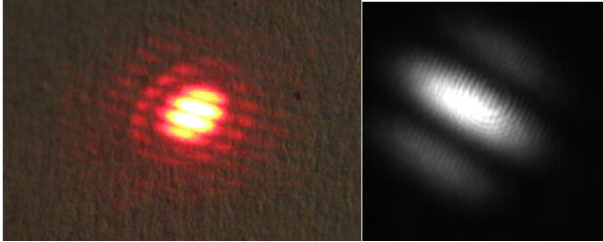


FIG. 3. Franjas de interferencia en la cámara CCD (izquierda). Patrón de interferencia que sale del interferómetro (derecha).

### Caracterización del piezoeléctrico

Estas gráficas resultan de hacer un barrido desde 0 a 32 V con pasos de 0.2 V, luego nos devolvemos desde 32 a 0 V y así sucesivamente, realizando barridos ascendentes y descendentes consecutivos. Cuando se le aplica un voltaje al dispositivo piezoeléctrico, éste mueve la plataforma que sostiene al espejo y de esa forma se genera una diferencia de caminos, que hace que las franjas de interferencia se muevan.

De las imágenes tomadas en el barrido de voltajes se escogía un sólo punto donde hubiera buena visibilidad y se recuperaba para este punto fijo el voltaje y la intensidad. Si se le hace un fit a los datos obtenidos en nuestros barridos obtendremos que se pueden modelar como una sinusoidal, pero con ligeras variaciones en la frecuencia de la función a medida que cambia el voltaje debido a la falta de retroalimentación. Esta aproximación nos permite apreciar que la intensidad que sale por el brazo del piezoeléctrico en función del voltaje, es decir, del desplazamiento del espejo es un coseno como predice la teoría, La figura 4 muestra las medidas tomadas en uno de los barridos ascendentes.

Para pasar de la gráfica de voltaje contra intensidad a la curva de caracterización del piezoeléctrico (voltaje contra desplazamiento) asumimos que la diferencia de voltajes entre un máximo y un mínimo subsiguientes hace que el piezoeléctrico se mueva  $\frac{\lambda}{2}$ . Entonces al voltaje correspondiente a un mínimo se le asocia un valor de  $x = \frac{\lambda}{2}$  mayor al que se le había asociado al máximo inmediatamente anterior. Como tomamos la diferencia en-

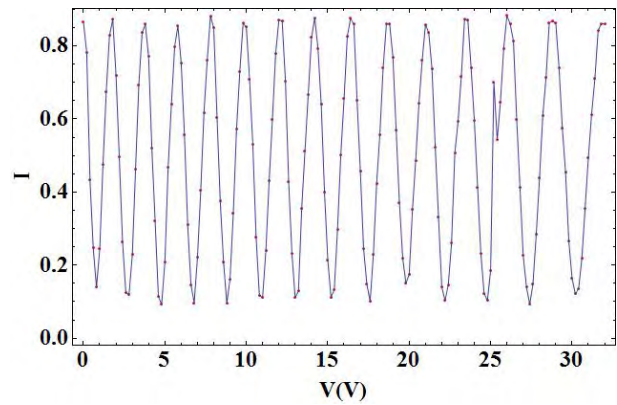


FIG. 4. Gráfica de Intensidad contra Voltaje aplicado al piezoeléctrico.

tre máximos y mínimos contiguos tomamos como incertidumbre en el desplazamiento  $\lambda/2$ .

Posibles fuentes de error en las mediciones son las vibraciones, que inmediatamente hacían cambiar el patrón. Además, cuando se llegaba hasta 32 V había que reconfigurar el programa de la cámara para comenzar el barrido descendente, eso puede ser la causa de que las dos curvas no se corten en 32V y en general cada vez que había cambio de barrido ascendente a descendente. La figura 3 muestra la curva.

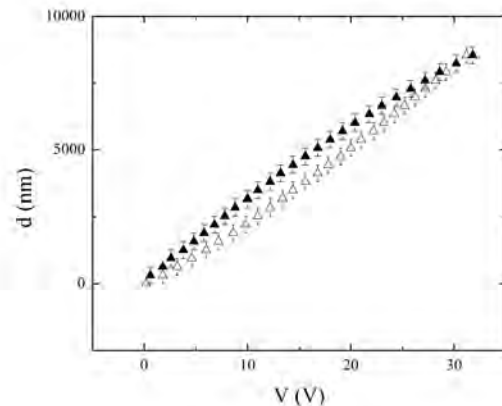


FIG. 5. Gráfica de desplazamiento del piezoeléctrico (d) contra voltaje aplicado al piezoeléctrico (V). El barrido ascendente está representado por los puntos negros y el descendente por los blancos.

Se puede apreciar que los máximos y mínimos de los barridos ascendente y descendente no concuerdan entre sí pues el elemento piezoeléctrico es muy sensible y en nuestra implementación no es posible controlar que la cámara tome la foto exactamente en el mismo momento en que se ha estabilizado la plataforma.

## CONCLUSIONES

Se puede apreciar a partir de la curva de caracterización del piezoeléctrico que a pesar que este presenta un comportamiento no lineal, la diferencia entre las curvas ascendente y descendente es muy pequeña, eso permite que los experimentos que necesiten desplazamientos del orden de nanómetros y se realicen con este elemento puedan tener una incertidumbre pequeña.

En el futuro se plantea implementar feedback al piezoeléctrico, esto permitiría saber con exactitud cuánto es el desplazamiento de la plataforma para un voltaje determinado. Mientras tanto la curva que se ha generado con el proyecto servirá para tener un estimado de cuánto se mueve el piezoeléctrico al aplicarle un voltaje en los experimentos del laboratorio.

La obtención de la gráfica sinusoidal de las intensidades permite corroborar que el interferómetro de Mach-Zehnder quedó bien alineado y cumplimos el objetivo planteado al inicio del semestre. Una continuación natural de este proyecto sería buscar una optimización de la

alineación de los rayos y hacer atenuación del láser para que entren muy pocos fotones al interferómetro. Si se llegara al punto de que un único fotón entrara al MZI, se podría desarrollar un experimento de "interaction-free-measurements" que consiste en detectar la posición o el estado de un objeto sin que el agente que mide interactúe con dicho objeto [5].

- 
- [1] Sears and Zemansky, *University Physics with Modern Physics* (Pearson).
  - [2] Zetie, Adams, and Tocknell, "How does a machzehnder interferometer work?" .
  - [3] I. Durham, "Quantum moxie thoughts of a selective subjective," .
  - [4] ThorLabs, "Single-axis flexure stages: 5 mm travel," .
  - [5] Greenstein and Zajone, *The Quantum Challenge - Modern Research of the Foundations of Quantum Mechanics*, 2nd ed. (Jones And Bartlett).