

## EXPERIMENTO 1: DOBLETE DE SODIO

Estudiantes: Vicente Lacroix - Marcelo Ojeda - Ana María Salas  
Fecha laboratorio: 23/03/2023, Entrega: 30/03/2023

---

### Resumen

Se determinó la diferencia entre las longitudes de onda de las líneas del espectro del Sodio. Lo anterior se realizó a partir de un montaje basado en el interferómetro de Michelson, junto a lámparas de Mercurio y Sodio para la calibración del instrumento y medición del doblete respectivamente. En la primera parte se pudo obtener la constante de calibración  $\eta$  debido a la relación entre el desplazamiento del espejo ( $d$ ) y del micrómetro ( $D_\mu$ ), resultando en un valor de  $0.21 \pm 0.008$ . En la segunda parte se manipuló el micrómetro hasta llegar a franjas de mínima visibilidad, lo que permitió medir el doblete de Sodio obteniendo un  $\Delta\lambda_{exp} = 1,02 \cdot 10^{-10} \pm 6,6 \cdot 10^{-15}$  m, que comparado al valor teórico resultó en un error porcentual de 82.915 %. Ambas experiencias estuvieron dominadas por errores del tipo sistemáticos, concluyendo que se obtuvo alta precisión y baja exactitud respecto a los valores teóricos, pero que aun así son coherentes con lo realizado, proponiendo como perspectivas futuras la repetición del montaje con mayor cuidado en la aplicación de la instrumentación y aumentar la cantidad de datos extraídos y resaltando que la importancia de la experiencia radica en la posibilidad de comparación experimental y teórica del doblete, para así proponer mejoras en el proceso experimental.

---

### 1. Introducción

#### 1.1. Objetivos

El objetivo principal del experimento es medir la separación entre las dos líneas amarillas del espectro del Sodio. Para esto se plantean como objetivos específicos elaborar y ejecutar un montaje experimental basado en el interferómetro de Michelson. Además, se busca analizar las variables de desplazamiento de un espejo y del micrómetro en cuestión mediante elaboración de gráficas, y obtener la constante de calibración  $\eta$  del interferómetro para posteriormente calcular  $\Delta\lambda$ . Finalmente se busca comparar los valores experimentales y teóricos, y analizar los errores presentes.

#### 1.2. Contexto

La interferometría es una técnica utilizada en ciencia e ingeniería para estudiar las propiedades de las ondas, como las ondas luminosas o sonoras. Consiste en la interferencia de dos o más ondas, lo que da lugar a un patrón de interferencia que puede utilizarse pa-

ra extraer información sobre las propias ondas o los objetos con los que interactúan. La interferometría está indisolublemente unida al nombre de Albert A. Michelson; su interferómetro abrió un nuevo mundo de observación y medición científica. La invención del láser marcó el inicio del avance triunfal de esta tecnología. Hoy en día, los métodos de medición interferométrica figuran entre los más precisos de la metrología (*What is interferometry?*, s.f.).

Uno de los ejemplos más icónicos del uso de interferometría en la historia es el experimento de Michelson y Morley, que consiguió mostrar, a través de la medición de haces de luz, que el éter, es decir, la sustancia hipotética propuesta que correspondía al medio por donde viajaba la luz, no existe, lo cual abrió camino al estudio de las ondas electromagnéticas y sentó las bases, entre otras cosas, del descubrimiento de la invariancia de la velocidad de la luz (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2023). Actualmente, uno de los ejemplos más notables del uso de la interferometría es para la detección de ondas gravitacionales en el observatorio LIGO (*What is LIGO?* s.f.).

### 1.3. Marco Teórico

El espectro del Sodio presenta una principal emisión que se produce en la transición entre los niveles electrónicos 3p al 3s, y que se observan como líneas amarillas. Estas líneas son las que se conocen como doblete del Sodio. Debido a la pequeña distancia entre estas líneas de emisión es que se necesita instrumentación con mucha precisión, por lo cual es muy útil la interferometría en este tipo de situaciones, que en este caso fue el interferómetro de Michelson.

### Interferómetro de Michelson

El interferómetro de Michelson produce franjas de interferencia mediante la división de un haz de luz monocromática, de modo que un rayo golpea un espejo fijo y el otro un espejo móvil. Cuando los haces reflejados son llevados de vuelta juntos hacia el detector, se produce un patrón de interferencia. Con el interferómetro de Michelson, se puede realizar mediciones de distancias precisas, moviendo el espejo, y contando las franjas de interferencia que se mueven, respecto de un punto de referencia (Michelson Interferometer, s. f.). La Figura 1 es una representación esquemática.

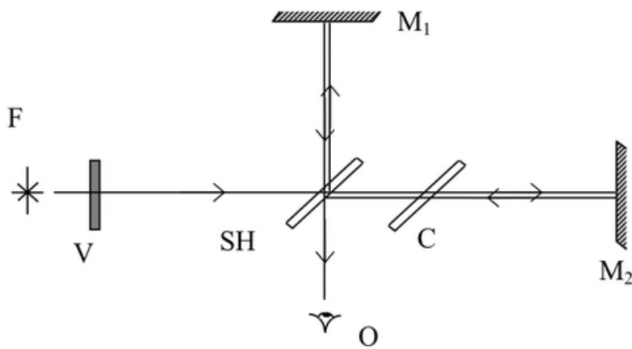


Figura 1: Representación del interferómetro de Michelson y sus partes. El vidrio esmerilado (V), el eparador de haz (SH), la fuente luminosa (F), el compensador (C), los espejos  $M_1$  y  $M_2$ , y el observador. (Instituto de Física UC. 2014).

La luz originaria de la fuente pasa por el vidrio esmerilado V, que luego se divide en dos haces una vez que atraviesa el semiespejo SH. Ambos haces, respectivamente, se reflejan en los espejos  $M_1$  y  $M_2$ , y luego vuelven a pasar por el semiespejo SH llegar al observador, donde se puede observar el patrón de interferencia basado, por ejemplo en patrones circulares o líneas cuasiparalelas.

Se define la diferencia de camino óptico para haces emitidos desde un ángulo  $\theta$  respecto del eje horizontal del interferómetro está dada por:

$$\Delta l = 2d/\cos(\theta) \quad (1)$$

Con  $d$  la separación relativa entre  $M_1$  y  $M_2$  y el ángulo  $\theta$  considerado es de 0.

Si la diferencia de camino óptico coincide con un múltiplo entero de la longitud de onda, se observará interferencia constructiva. Esto ocurre entonces cuando:

$$m\lambda = 2d/\cos(\theta) \quad (2)$$

Donde  $m$  es un número entero y  $\lambda$  la longitud de onda. Luego, variando la distancia entre los espejos, podemos observar un desplazamiento del patrón de interferencia, a través del cual podemos medir el desplazamiento del espejo contando las líneas de interferencia que pasan por un punto, a través de la ecuación (2). En el interferómetro de Michelson, variamos la distancia entre SH y  $M_1$  a través de un micrómetro que desplaza  $M_1$ , sin embargo, entre ambos objetos hay una palanca que reduce el desplazamiento de este espejo, por lo tanto, debe tenerse en cuenta la relación entre el desplazamiento del micrómetro con el desplazamiento real del espejo, la cual está dada por:

$$d = \eta D_\mu \quad (3)$$

Siendo  $d$  la distancia que se movió el espejo,  $D_\mu$  la distancia que marcó el micrómetro, y  $\eta$  la constante de proporcionalidad.

Es necesario conocer esta constante para poder realizar mediciones, para lo cual se hace la calibración del instrumento utilizando una línea espectral de un espectro conocido, como lo es la línea verde del Mercurio (546,1 nm).

Una vez obtenido  $\eta$  se procedió a calcular la diferencia entre las longitudes de onda de los dobletes de sodio  $\Delta\lambda$ , utilizando la siguiente fórmula:

$$d = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda}(m_2 - m_1 + \frac{1}{2}) \quad (4)$$

Con  $\lambda = 589$  nm, la longitud de onda de promedio en donde se encuentra el doblete y  $(m_2 - m_1)$  un valor que va aumentando su valor en uno para distintos valores de  $d$ .

## 2. Montaje y procedimiento

El montaje experimental se dividió en tres partes diferentes, las que se describen a continuación:

### 2.1. Alineación de la Lámpara

Esta sección tuvo como finalidad asegurarse de que los espejos utilizados  $M_1$  Y  $M_2$  del interferómetro estuvieran en paralelo, y así con otros ajustes alinear el instrumento para continuar con las siguientes partes del procedimiento experimental.

Primero se utilizó una lámpara de Mercurio a la que se adjuntó un filtro verde. Esta se encendió de tal manera que la luz llegara sobre el vidrio esmerilado (V) del interferómetro, sobre el que se acomodó además una flecha metálica. Con ello, fue posible observar en el campo visual la formación de tres imágenes de la flecha, dos de las cuales se superpusieron ajustando los tornillos del espejo  $M_2$ .

Luego, se buscaron franjas de interferencia circulares en el campo visual a partir de otros ajustes más pequeños en  $M_2$  (ver imagen 2), terminando así con la alineación del instrumento.

## 2.2. Parte I: Calibración del Interferómetro

Para esta sección, se mantuvo el montaje anterior con la diferencia de que el espejo a ajustar fue  $M_1$  a partir de la manipulación del micrómetro. Esto permitió cambiar el desplazamiento del mismo, y por lo tanto la separación efectiva ( $d$ ) entre ambos espejos.

Así, se extrajeron datos cualitativos y cuantitativos de la experiencia. En los primeros de encuentra el comportamiento de las franjas en el campo visual en diferentes situaciones estudiadas, (como por ejemplo poner una interferencia en el camino de la luz -dedo-, o realizar golpes suaves a la base del interferómetro) las cuales se abordarán durante el análisis. Cuantitativamente, se obtuvieron datos para la calibración del interferómetro, basados en la relación entre la separación efectiva ( $d$ ) mediante el movimiento del micrómetro ( $D_\mu$ ) y la cantidad de franjas desplazadas ( $m$ ) para obtener el factor  $\eta$  de calibración.

## 2.3. Parte II: Medición de la separación del doblete de sodio

Se mantuvo nuevamente el montaje anterior, con la diferencia de que ahora se utilizó una lámpara de Sodio. Nuevamente se manipuló el micrómetro hasta llegar a la mínima visibilidad de las franjas, desde ahí, se tomaron datos sobre mínimos consecutivos del patrón observado, para poder obtener mediante el análisis, la separación de las líneas amarillas del Sodio .

En esta parte sin embargo, se debió cambiar el instrumento y añadirle una pieza (un tipo de clavo), pues en principio no era posible la extracción de datos debido a la falta de visualización de las franjas. Luego de eso, se prosiguió con la toma de los mismos.

La siguiente figura muestra el montaje descrito. Se debe acotar que la alineación y calibración se debieron realizar en varias ocasiones debido a la dificultad para observar las franjas, de hecho, se utilizó más de un interferómetro. Esto aporta a los errores experimentales que se ahondarán en secciones posteriores.

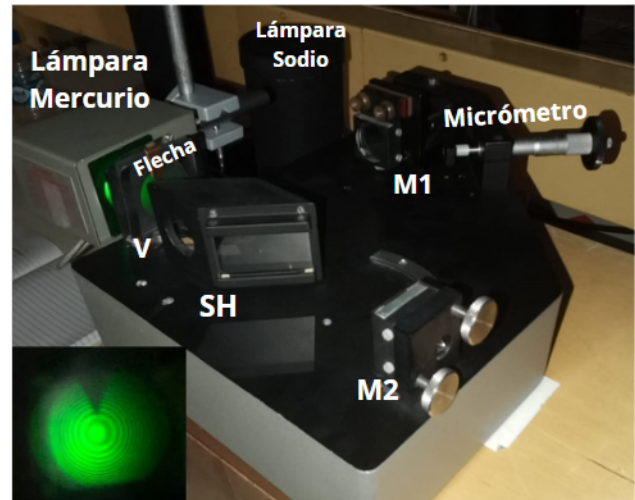


Figura 2: Montaje experimental. Se aprecian las diferentes componentes del interferómetro, además de la lámpara de Mercurio y de Sodio al fondo. Se muestran las franjas circulares en el campo de visión.

## 3. Análisis y resultados

### 3.1. Parte I: Calibración del Interferómetro - Cualitativa.

Antes de realizar el análisis cuantitativo, se realizaron apreciaciones cualitativas que caben destacar en esta parte, pues fueron fundamentales para estudiar el comportamiento de las franjas, para después obtener la calibración.

Lo primero fue la orientación en el movimiento de las franjas de interferencia. Estas iban hacia fuera del campo visual mientras el espejo se acercaba al separador (SH) y hacia dentro mientras el espejo se alejaba, lo que se explica debido al sentido de rotación del micrómetro en cada caso. Para continuar, al momento de poner una interferencia entre el camino de la luz, las flechas, que ya estaban superpuestas, se podían apreciar de igual manera, pero las franjas de interferencia se veían muy poco o nada.

Lo anterior se debe a que el semiespejo separador (SH) divide la luz en dos haces diferentes, por lo que a pesar de tapar una parte de su recorrido, el otro se sigue visualizando, de todas maneras esto sucede, como se mencionó, con menos intensidad. Finalmente, al golpear la base del interferómetro,

las franjas tiemblan a medida que lo hace la base, esto se explica debido a que tanto el vidrio y los espejos están conectados a la base, y al moverse junto a este, la reflexión de los rayos de luz también lo hace.

### 3.2. Parte I: Calibración del Interferómetro - Cuantitativa.

Se prosigue con el cálculo de la constante de calibración  $\eta$ . Esto se realizó a partir de un ajuste de mínimos cuadrados entre las variables de desplazamiento del espejo  $M_1$  ( $d$ ) y movimiento del micrómetro ( $D_\mu$ ).

Primero se utilizó la ecuación N° (3) para obtener la variable  $d$ , a partir de la línea verde ya conocida del Mercurio con una longitud de onda de 546,1 nm. Luego, los valores del desplazamiento del micrómetro se determinaron considerando que cada medición mínima del instrumento corresponde a 10  $\mu\text{m}$  al girarlo. Los valores obtenidos en cada caso se presentan en la tabla 1.

Cantidad líneas desplazadas	$D_\mu$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d \cdot 10^{-6}$ [m]
12	$20 \pm 5$	3.27
23	$30 \pm 5$	6.28
31	$40 \pm 5$	8.46
34	$50 \pm 5$	9.28
46	$60 \pm 5$	12.56
59	$80 \pm 5$	16.10
77	$100 \pm 5$	21.02

Tabla 1: La tabla muestra los valores de las líneas desplazadas en el campo de visión, la distancia ( $D_\mu$ ) del micrómetro y el desplazamiento del espejo superior  $M_1$  ( $d$ ).

A partir de esto y utilizando la ecuación N°3 se pudo establecer el ajuste mediante mínimos cuadrados entre las variables  $d$  y  $D_\mu$  (ver 4) para así obtener el factor de calibración  $\eta$ .

La constante  $\eta$  corresponde a la pendiente de la gráfica expuesta, que en este caso corresponde a un valor de  $\approx 0.21 \pm 0.008$ . Se estableció además el coeficiente de determinación o  $r^2$  que indica la medida de relación lineal entre las variables  $d$  y  $D_\mu$ . Su resultado es de  $\approx 0.99$ , es decir, muy cercano a 1, lo que reafirma la idea de que el ajuste lineal y la correlación de las variables es la correcta.

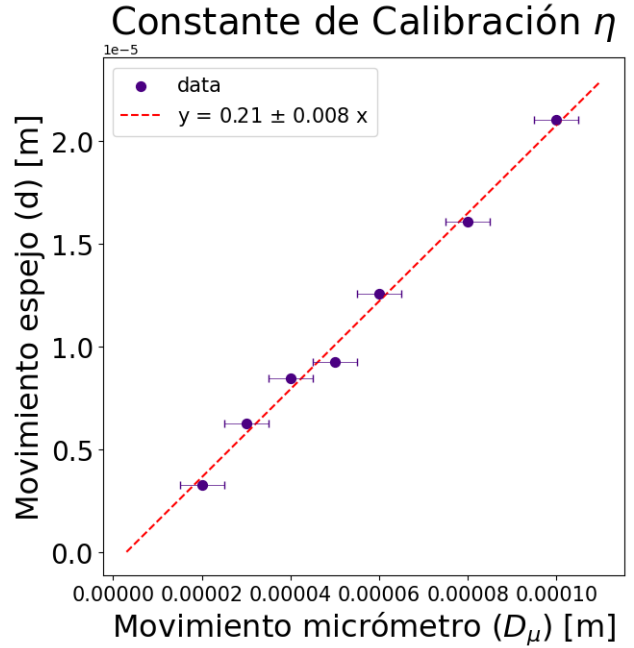


Figura 3: Ajuste por mínimos cuadrados entre  $D_\mu$  y  $d$ . Los errores en la horizontal representan la medición del micrómetro de  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ . Se visualiza la pendiente obtenida y su respectivo error.

### 3.3. Parte II: Medición doblete de Sodio

Utilizando el factor de conversión  $\eta$ , obtenida en la sección anterior, se calculó el movimiento verdadero del espejo ( $d$ ) utilizando la fórmula (3). Estos se graficaron junto con la expresión  $(m_2 - m_1 + \frac{1}{2})$  en el eje  $y$  y en el  $x$ , respectivamente. Luego, se realizó un ajuste de mínimos cuadrados. Este entregó una recta cuya pendiente es la expresión  $m = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda}$ . De aquí se despejó el  $\Delta\lambda$  y, para encontrar su valor, se utilizó como aproximación que  $\lambda_1\lambda_2 \approx \lambda^2 = 589^2 \text{ nm}^2$ . Así, se obtuvo que  $\Delta\lambda \approx 1,02 \cdot 10^{-10} \pm 6,6 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ . El valor de la literatura corresponde a  $5,97 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ , lo que nos entrega un error relativo porcentual del **82.915 %**.

### 3.4. Descripción y análisis de errores

Se observa el error aleatorio asociado a la medición del micrómetro. Este establecía mediciones en tramos de 10  $\mu\text{m}$ , por lo tanto el error se consideró como 5  $\mu\text{m}$ , lo que se representó en la figura 4 y en la tabla 1.

Otros errores presentes en la experiencia son principalmente del tipo sistemáticos debidos a por ejemplo, en un principio la iluminación de la sala, el cero del micrómetro y su sensibilidad al momento de manipulación, la presencia de polvo en los espejos que impedían visualizar con nitidez las franjas de interferencia, y a la vez el conteo dificultoso del desplazamiento de las mismas, pues al ser al ojo,

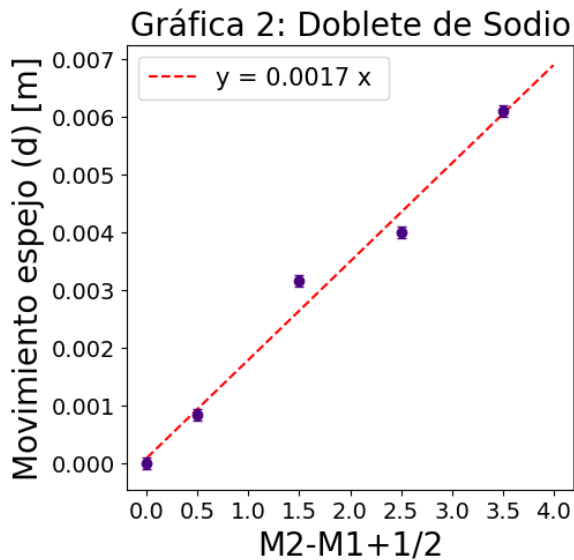


Figura 4: Ajuste para los datos de las regiones de mínima visibilidad encontradas, que representan las líneas de los dobletes del Sodio.

más la sensibilidad del micrómetro no se asegura un conteo 100 % correcto.

Se presentó también una dificultad al momento de la alineación y calibración del interferómetro, pues una vez que se realizaron estos procedimientos y se cambió la lámpara por una de Sodio, no era posible visualizar las franjas, lo que impedía la toma de datos. Por ello se hizo cambio del instrumento y esto cambió la calibración, sin embargo debido al tiempo acotado, no se tomaron nuevas medidas para realizar un nuevo cálculo de  $\eta$ , y por los imprevistos instrumentales no fue posible tomar una mayor cantidad de muestras, asociadas principalmente a la medición del doblete.

Así, si bien se trató de disminuir los errores sistemáticos incluyendo una pieza al interferómetro, limpiando los espejos y otros, todos finalmente contribuyeron al error del cálculo asociado a la distancia entre las líneas de Sodio, lo que se ve reflejado en la diferencia porcentual del **82.250 %** explicada con anterioridad.

## 4. Conclusiones

La humanidad ha avanzado mucho gracias a la enorme precisión en medidas que ofrece la interferometría, pues ha contribuido en muchos ámbitos a la física, ingeniería, etc. A pesar de ello, esta experiencia no fue del todo gratificante, ya que se presentaron varios problemas en su realización, como se mencionó anteriormente. Esto se tradujo, por ejemplo, en una

medición poco certera, aunque precisa, de  $\Delta\lambda$ , llegando a tener un error porcentual de 82.250 %. Cabe destacar que la medida del factor  $\eta$  se midió correctamente, con un error bajo. Se puede decir que el objetivo se cumplió, pues se logró medir la distancia entre las longitudes de onda del doblete de sodio, aunque no fue consistente respecto a su valor real. Para una próxima experiencia, se deberá analizar de más rigurosamente el equipo de trabajo, en vez de utilizar uno y cambiarlo a mitad del experimento. También será importante tomar aún más datos, para lograr mejores mediciones y errores más pequeños, que sean consistentes, pues en este caso no se pudo por falta de tiempo. Por último, sería muy interesante poder trabajar con otros tipos de interferómetros, cuya información y datos a obtener, no dependan tanto del ojo humano, sino que pueda transferir esa información a algún pendrive o computadora automáticamente.

## Referencias

- [1] Instituto de Física UC. (Octubre, 2014). Doblete de Sodio (Fiz0311). Guía.
- [2] What is Interferometry? (s. f.). <https://www.world-interferometry-day.com/interferometry>
- [3] What is LIGO? (s. f.). LIGO Lab — Caltech. <https://www.ligo.caltech.edu/page/what-is-ligo>
- [4] The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2023, 10 febrero). Michelson-Morley experiment — Description, Results, Facts. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/Michelson-Morley-experiment>
- [5] Espectro del Sodio.(s. f.). M. Olmo. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/Na.html>
- [6] Michelson Interferometer. (s. f.). <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/michel.html>