

Un experimento introductorio a la teoría de la relatividad: el interferómetro de Michelson acústico

An introductory experiment to the theory of relativity: the acoustic Michelson interferometer

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Luis Bernal¹, Mariano Insabella², Santiago Ridao², Federico Schipani³, Guadalupe Cascallares² y Esteban Szigety⁴

¹IFIMAR, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata, Funes3350, CP 7600, Mar del Plata. Argentina.

²Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata, Funes3350, CP 7600, Mar del Plata. Argentina.

³INTEMA, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Juan B. Justo 4302, CP 7600, Mar del Plata. Argentina.

⁴Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, J. B. Justo 4302, CP 7600, Mar del Plata. Argentina.

E-mail: esteszige@gmail.com

Resumen

El objetivo de este trabajo es observar el corrimiento de fase entre dos ondas de ultrasonido emitidas por un transductor piezoeléctrico a causa de una corriente de aire. El corrimiento mencionado se produce en un dispositivo de características similares a un interferómetro de Michelson. El diseño permite generar una corriente de aire equivalente al "viento lumífero del éter", que originalmente se buscaba detectar en la experiencia de Michelson y Morley. La propuesta experimental introduce contenido sobre la teoría de la relatividad debido a que permiten discutir y analizar las variables que afectan la interferencia cuando el medio donde se desplaza la onda se mueve respecto del interferómetro.

Palabras clave: Teoría de la Relatividad; Ultrasonido; Interferómetro de Michelson y Morley; Práctica de Laboratorio; Didáctica de la Física.

Abstract

The objective of this work is to observe the phase shift between two ultrasound waves emitted by a piezoelectric transducer. The mentioned shift occurs in a device with characteristics similar to the Michelson interferometer. The design allows generating an air current that simulates the "luminiferous ether wind", which was originally pursued in the experiment of Michelson and Morley. The experience introduces content on the theory of relativity and allows discussing and analyzing the variables that affect the interference when the wave medium moves with respect to the interferometer.

Keywords: Theory of Relativity; Ultrasound; Michelson and Morley interferometer; Laboratory Practice; Physics Teaching.

I. INTRODUCCIÓN

El práctico de laboratorio que se plantea en este trabajo replica las condiciones del experimento de Michelson y Morley, pero a diferencia de éste, sí se logra observar una diferencia de fases entre las ondas sonoras como consecuencia del movimiento del aire. En la experiencia original de Michelson, la proporción V/c (V es velocidad del medio y c es la velocidad de la onda) que se denomina con la letra β a lo largo del trabajo, es del orden de 10^{-4} mientras que en este experimento ronda el orden de 10^{-2} . Esta es la razón por la cual las mediciones se pueden obtener a través de instrumentos accesibles a un laboratorio universitario. En este arreglo experimental se trabaja con ondas de ultrasonido que pueden experimentar cambios de velocidad respecto a la Tierra cuando el medio por el que se propagan se impulsa con un ventilador. Dado que la velocidad de propagación de las ondas acústicas sí experimenta la adición de

velocidad del medio, esta actividad de laboratorio puede ser considerada parte del programa de Introducción a la Física Moderna, cuando se comparan los resultados con los obtenidos por Michelson y Morley.

Para el desarrollo de este trabajo de laboratorio los contenidos que necesita el estudiante son exclusivos de la física clásica y, en particular, de la teoría de ondas. Sin embargo esta propuesta es para los autores una práctica introductoria a la teoría de la relatividad, debido a que facilita el tan deseado cambio conceptual y metodológico necesario para un aprendizaje acorde con las connotaciones históricas del momento y las características propias del quehacer científico (Gil Pérez y otros, 1986). En este práctico se pueden plantear las mismas etapas metodológicas que se originan cuando la experiencia se desea replicar con ondas electromagnéticas.

II. LA EXPERIENCIA ORIGINAL

El trabajo de Michelson y Morley tiene, en la bibliografía para la enseñanza superior de la física y de la historia, el reconocimiento de ser uno de los experimentos más importantes y conocidos de la física moderna (Drewes y Palma, 2006). Sin embargo el mismo Einstein no reconoció tal importancia a la hora de adjudicarle una fuente inspiradora a sus ideas sobre la teoría de la relatividad (Holton, 1988). Hasta la realización del experimento en 1887, se entendía que la luz era una onda, como lo había probado Maxwell en 1867. La luz, como toda onda conocida, tiene una velocidad constante respecto del medio, para los casos en que éste sea considerado homogéneo e isótropo. Los movimientos de la fuente o del observador solo modifican la frecuencia (efecto Doppler). La luz debía tener un gran paralelismo con el resto de las ondas materiales. El único problema residía en detectar el medio en el que se transmitían las ondas electromagnéticas, el denominado éter, el cual tenía asignado propiedades extremas como una rigidez muy elevada pero una viscosidad extremadamente baja, para no impedir que la Tierra se frenara al desplazarse por el éter.

Siguiendo las leyes de la teoría de ondas, si el medio se desplaza respecto de un observador, la velocidad de la onda es la suma vectorial de la velocidad de la onda respecto del medio (independiente de la velocidad de la fuente) más la velocidad del medio respecto del observador. Por ejemplo, el sonido puede tener desde Tierra una velocidad superior a 340 m/s (velocidad con respecto del aire) si un viento se desplaza en dirección de la onda. Básicamente la experiencia de Michelson y Morley buscaba corroborar la existencia del éter lumífero a través del cambio en la velocidad de la luz respecto de Tierra cuando la luz se movía en distintas direcciones cardinales.

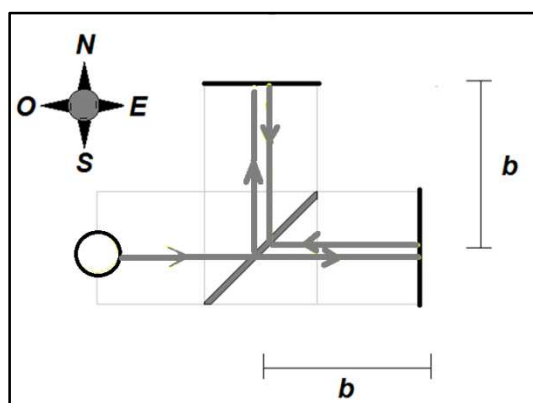


FIGURA 1. Esquema del interferómetro de Michelson y Morley y su ubicación espacial en la Tierra. La distancia b que va desde el espejo semitransparente (espejo central inclinado) a cada uno de los espejos, es la misma.

Si la Tierra se mueve respecto al Sol a 30 Km/s y se considera al éter estático en el espacio, desde la Tierra, de Este a Oeste, se debería observar un viento de éter lumífero relativo con esa misma velocidad. Si se mide el tiempo para un haz de luz viajar, en la dirección Este–Oeste, una distancia b definida (ver figura 1), y se compara con el tiempo que tarda en recorrer la misma distancia pero en la dirección Norte–Sur, la prueba de la existencia del viento sería encontrar una diferencia de tiempo entre estos dos haces de luz o una diferencia de fase entre las ondas que viajan por los brazos perpendiculares del interferómetro, como lo indican los autores del experimento en su primera publicación (Michelson y Morley, 1887). En el artículo original se hace mención de varios detalles metodológicos para poder alcanzar el grado de precisión necesaria, tales como armar el interferómetro dentro de una cuba con mercurio para evitar la transmisión de vibraciones y aumentar el recorrido de la luz con una sucesión de espejos. Cabe mencionar que para la velocidad de arrastre del éter y la velocidad de la luz conocida (3×10^8 m/s) se esperaba observar

una diferencia de tiempo del orden de 10^{-17} segundos, lo que implica que la luz en ese tiempo puede recorrer distancias del orden 10^{-8} metros (la diez milésima parte de un milímetro). Los espejos y sus ubicaciones podían ser afectados por cambios de la temperatura o vibraciones a causa del tránsito de la calle, por lo que tuvieron que realizar la experiencia a la madrugada, evitando así que la actividad de la ciudad produjera vibraciones y errores en los resultados.

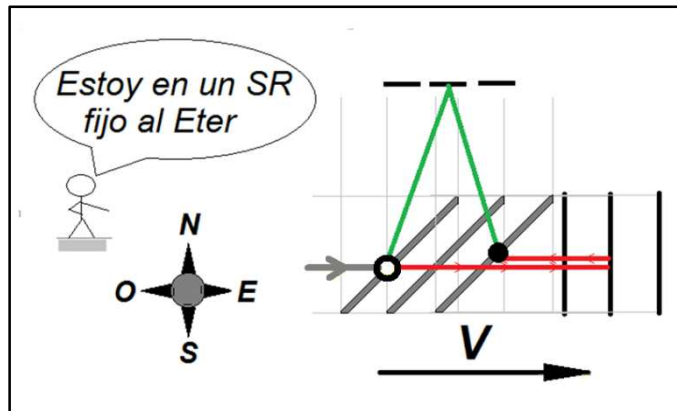


FIGURA 2. Análisis de los rayos de luz en el Interferómetro de Michelson y Morley para un observador fijo en el éter que ve pasar delante de él al interferómetro.

Un observador fijo en el éter (figura 2) observa pasar delante de él al interferómetro y llega a las siguientes conclusiones respecto del tiempo que cada rayo tarda en reunirse: el pulso de luz que viaja por el brazo N-S tarda en reflejarse en el espejo y regresar al espejo semitransparente un tiempo

$$t_{N-S} = \frac{2b}{c\sqrt{1-\beta^2}} \quad (1)$$

El tiempo del pulso que viaja por el brazo E-O resulta

$$t_{E-O} = \frac{2b}{c(1-\beta^2)} \quad (2)$$

Al encontrarse nuevamente en el espejo semitransparente, ambos pulsos de luz deben experimentar una diferencia de tiempo ($\Delta t = t_{N-S} - t_{E-O}$) que, aproximada al segundo orden del polinomio de Taylor, queda:

$$\Delta t \approx \frac{b\beta^2}{c} \quad (3)$$

con una diferencia de fase entre las ondas de:

$$\Delta\Phi \approx \frac{\omega b\beta^2}{c} \quad (4-a)$$

donde $\omega = 2\pi f$ y f es la frecuencia de la luz.

En la experiencia Michelson y Morley se busca observar el desplazamiento de franjas de interferencias producto de la diferencia de fase obtenida en la relación (4-a). Un haz de luz está corrido respecto del otro en una fracción de ciclo, que se puede calcular.

$$\text{corrimiento de ciclo} = \frac{\Delta\Phi}{2\pi} \approx \frac{b\beta^2}{\lambda} \quad (4-b)$$

donde λ es la longitud de la onda de luz. Este corrimiento modifica el patrón de interferencia previamente formado, haciendo que sus franjas de interferencia cambien de lugar. Por ejemplo, si el corrimiento de ciclo es de 0,5 (50%) entonces ambos haces de luz difieren en media longitud de onda y, por lo tanto, donde antes había una franja brillante ahora hay una franja oscura: el patrón de interferencia se encuentra corrido media franja. Por lo tanto, la expresión (4-b) da el coeficiente de corrimiento de las franjas de interferencias. Michelson y Morley diseñaron su experimento para poder observar un desplazamiento en las franjas de interferencias del orden del 10%, cuando rotaban el interferómetro 180°.

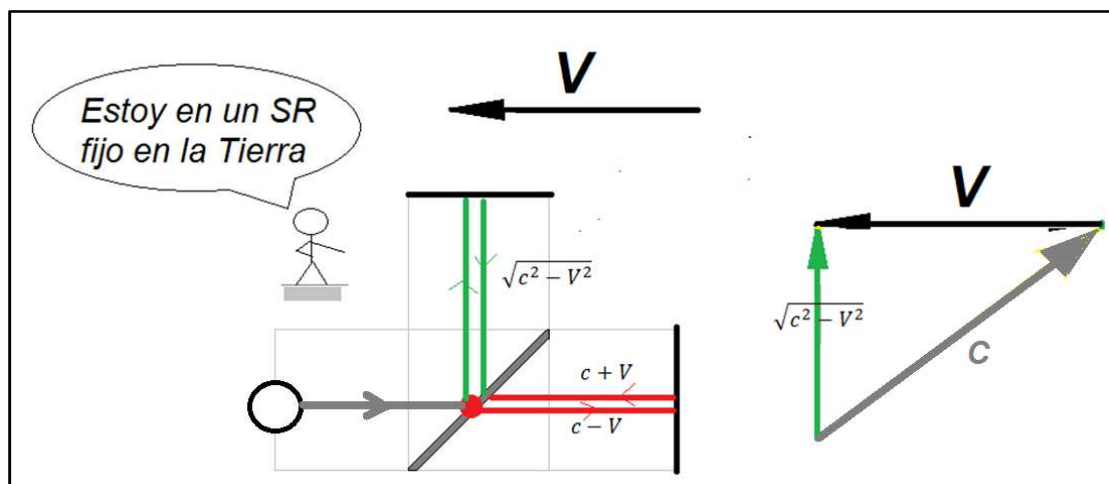


FIGURA 3. Para un observador en Tierra se espera que la diferencia de tiempo sea consecuencia de la suma vectorial de la velocidad de arrastre del éter a favor, en contra y en forma perpendicular, como se muestra en el triángulo de velocidades de la derecha.

Por otro lado, en el marco de un observador fijo a Tierra (figura 3), éste debería corroborar la misma diferencia de tiempo de la expresión (3) y para ello se entiende que un viento de éter relativo a su sistema de referencia produce los mismos tiempos observados que en un sistema de referencia fijo en el éter. En este sistema de referencia se observa cómo la suma vectorial es la causa de poder medir un cambio en la velocidad de la luz para el haz que se desvía perpendicular a la fuente. El triángulo de velocidades de la figura 3 muestra dicha composición. La expresión $\sqrt{c^2 - V^2}$ es la velocidad de la luz observada en el sistema de referencia fijo a Tierra. Concluimos entonces que las expresiones (1), (2) y (3) son idénticas en ambos sistemas de referencia.

Los resultados de esta experiencia son bien conocidos en la historia de la ciencia. A pesar de que Michelson y Morley repitieron la experiencia hasta el año 1929 (Michelson y otros, 1929), concluyeron que si hay un desplazamiento debido al movimiento relativo de la Tierra y el éter lumífero, éste no puede ser mucho mayor que una centésima de desplazamiento de franja de interferencia. Muy a su pesar, esto era admitir que los haces no se retrasan en su movimiento y, por lo tanto, el experimento para detectar el éter había fracasado.

III. EL INTERFERÓMETRO ACÚSTICO

El nombre de “interferómetro acústico” hace referencia al diseño experimental presentado en este trabajo, que consiste en observar la suma de velocidades del sonido y del aire en movimiento. Su diseño es básicamente un triángulo rectángulo isósceles en cuyos vértices se colocan un emisor de ultrasonido y dos receptores. En la figura 4 se observa un esquema del interferómetro. La ubicación del emisor (E) corresponde al ángulo recto de la estructura, y los receptores (r_1 y r_2), en los ángulos de 45°. Se llamará distancia b a la longitud de los catetos. La corriente de aire está direccionada y el interferómetro rota para obtener distintas sumas vectoriales.

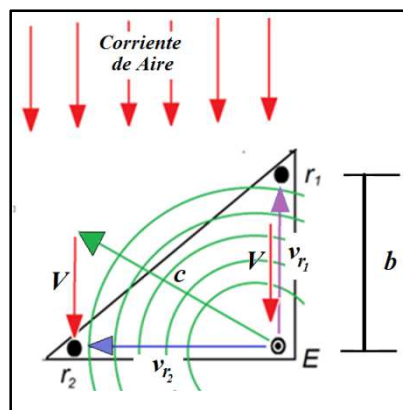


FIGURA 4. Ubicación del interferómetro acústico con sus catetos paralelos y transversales a la corriente de aire. Dibujo del triángulo de velocidades para el rayo de sonido que llega al receptor r_2 .

Cabe aclarar que llamar con el nombre de “interferómetro acústico” a esta práctica es solo a fines didácticos, ya que tiene una gran similitud con el histórico interferómetro de Michelson y Morley. Sin embargo no ocurre en el experimento ninguna interferencia de onda, al menos en el espacio físico donde las ondas se desplazan. Sí se puede afirmar que la interferencia ocurre en el osciloscopio cuando las ondas son procesadas y analizadas temporalmente. La interferencia de ondas de luz se visualiza con el cambio de la intensidad en las distintas posiciones sobre una pantalla. En el sonido es más sencillo poder observar los cambios en el espacio temporal, hecho que se hace imposible con las ondas de luz. Es por eso que la accesibilidad del práctico reside en poder ver la diferencia de fase de las ondas sonoras en una ubicación espacial fija, midiendo con el osciloscopio el parámetro del tiempo.

En la figura 4 se observa una configuración sencilla del interferómetro respecto del viento. Un cateto se encuentra perpendicular y el otro cateto es paralelo a la dirección del viento. En este caso el receptor r_1 recibe una señal que tardó en llegar un tiempo t_1 , y vale, según la suma vectorial de las velocidades:

$$t_1 = \frac{b}{c - V} = \frac{b}{c(1 - \beta)} \quad (5)$$

Mientras que, en el receptor r_2 , la onda sonora que incide no es la que sigue la dirección del cateto perpendicular. Por el contrario, la señal que alcanza a r_2 será aquella cuya dirección sumada vectorialmente con la velocidad del viento permita obtener la dirección del cateto. Por lo tanto, el tiempo que tarda en llegar será:

$$t_2 = \frac{b}{\sqrt{c^2 - V^2}} = \frac{b}{c\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (6)$$

Estas expresiones son muy similares a las (1) y (2) obtenidas para el Interferómetro de Michelson original, con la salvedad que aquí las ondas se analizan solo en la ida. Ambos receptores se conectan a un osciloscopio que permitirá mostrar la diferencia de fase temporal con que son detectadas ambas ondas. En la figura 5 se puede observar los cambios geométricos que se producen cuando se modifica el ángulo θ respecto a la dirección del viento.

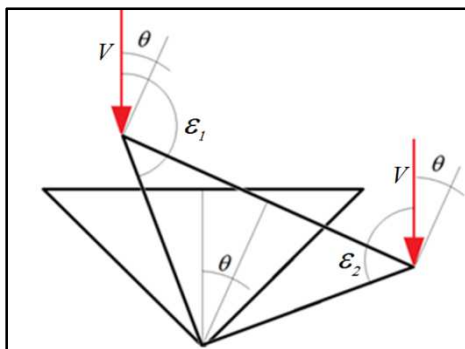


FIGURA 5. Imágenes superpuestas del interferómetro rotado un ángulo θ respecto de la dirección del viento.

En esta rotación se puede ver, según la figura 5, ciertas relaciones útiles entre los ángulos ϵ y θ (ángulo que se rotó el interferómetro) como:

$$\epsilon_1 = 90^\circ + 45^\circ + \theta, \tag{7-a}$$

$$\epsilon_2 = 90^\circ + 45^\circ - \theta \tag{7-b}$$

Se ve claramente que la suma de los ángulos resulta $\epsilon_1 + \epsilon_2 = 270^\circ$ y, por lo tanto, los senos y cosenos son opuestos:

$$\sin \epsilon_1 = -\cos \epsilon_2 \tag{8}$$

También se puede expresar de la siguiente forma por propiedades trigonométricas:

$$\sin \epsilon_1 = \sin(135^\circ + \theta) = \frac{\sqrt{2}}{2} (\cos \theta - \sin \theta) \tag{9-a}$$

$$\cos \epsilon_1 = \cos(135^\circ + \theta) = -\frac{\sqrt{2}}{2} (\sin \theta + \cos \theta) \tag{9-b}$$

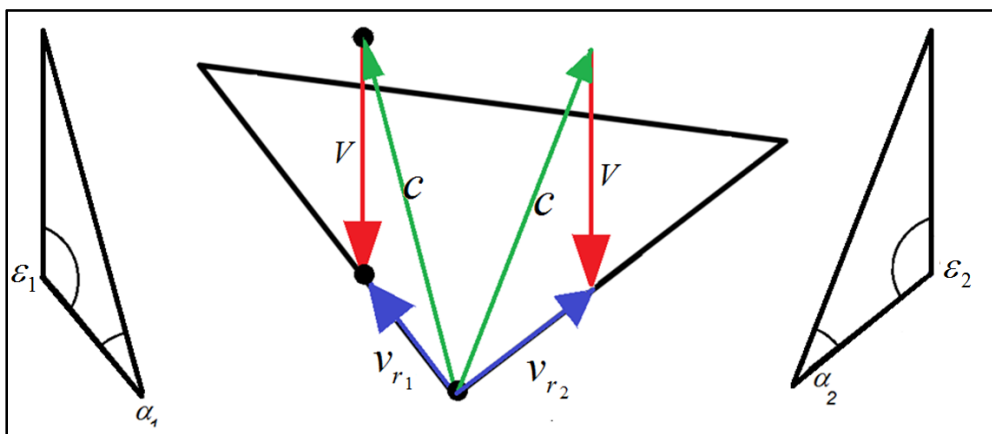


FIGURA 6. Suma vectorial de velocidades para rayos de sonidos que viajan a los receptores r_1 y r_2 cuando el interferómetro se encuentra rotado según la figura 5.

Cuando se analiza la dirección que debe tomar un rayo de sonido para llegar a su correspondiente receptor (figura 6), se observa que esas velocidades (v_{r_1} y v_{r_2}) tiene que ser el resultado de sumar vectorialmente la velocidad del sonido en el medio (c) con la velocidad de arrastre del viento impulsado por

los ventiladores. Los ángulos α_1 y α_2 de los triángulos de velocidad son fundamentales para poder descomponer los vectores de velocidad en la dirección de v_{r_1} y v_{r_2} .

$$v_{r_1} = c \cos \alpha_1 + V \cos \varepsilon_1 \quad (10-a)$$

$$v_{r_2} = c \cos \alpha_2 + V \cos \varepsilon_2 \quad (10-b)$$

El Teorema del Seno se utiliza para vincular estos ángulos con las expresiones del tiempo que tardan los rayos de sonido en llegar a sus correspondientes receptores

$$\frac{c}{\sin \varepsilon} = \frac{V}{\sin \alpha}, \quad (11-a)$$

$$\sin^2 \alpha = \beta^2 \sin^2 \varepsilon. \quad (11-b)$$

El tiempo en recibir la señal en cada receptor es

$$t_1 = \frac{b}{v_{r_1}}, \quad (12-a)$$

$$t_2 = \frac{b}{v_{r_2}}. \quad (12-b)$$

La diferencia de tiempo ente (12-a) y (12-b), queda

$$\Delta T = t_2 - t_1 = \frac{b}{v_{r_2}} - \frac{b}{v_{r_1}}. \quad (14)$$

Las expresiones (10-a) y (10-b) se reemplazan junto con los resultados del Teorema del Seno (11-b)

$$\Delta t = \frac{b}{c} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2 \sin^2 \varepsilon_2} + \beta \cos \varepsilon_2} - \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2 \sin^2 \varepsilon_1} + \beta \cos \varepsilon_1} \right) \quad (15)$$

Por último, la expresión queda dependiendo únicamente del ángulo ε_1 si se utiliza la relación (8)

$$\Delta t = \frac{b}{c} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2 \cos^2 \varepsilon_1} - \beta \sin \varepsilon_1} - \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2 \sin^2 \varepsilon_1} + \beta \cos \varepsilon_1} \right) \quad (16)$$

Finalmente, se realiza una aproximación a primer orden por Polinomio de Taylor evaluada en $\beta=0$.

$$\Delta t \approx \frac{b\beta}{c} (\sin \varepsilon_1 + \cos \varepsilon_1) \quad (17)$$

Se reemplazan las relaciones (9-a) y (9-b), quedando:

$$\Delta t \approx -\frac{b\beta}{c} \sqrt{2} \sin \theta. \quad (18)$$

O su diferencia de fase en radianes:

$$\Delta\Phi \approx -\frac{\omega b\beta}{c}\sqrt{2}\sin\theta. \quad (19)$$

Estas expresiones finales (18) y (19) difieren de la (3) y (4-a) en un aspecto fundamental. La experiencia de Michelson y Morley hace interferir haces de luz tanto en su ida, como en su vuelta por los brazos del interferómetro, mientras que en este caso solo se analiza la ida de las ondas hacia los receptores. Esta diferencia hace que, en el interferómetro acústico, en la expresión final se observe una dependencia de la fase al primer orden de β y en el interferómetro de Michelson esta aproximación sea al segundo orden de β^2 . Es importante aclarar que la experiencia original también se rotaba (Michelson y Morley, 1887) para analizar el posible arrastre del éter en distintas direcciones aunque las expresiones (3) y (4) obtenidas no muestran esta variación, debido a que sólo se analizó la posición más significativa del interferómetro de Michelson.

Para esta experiencia, la relación de corrimiento de ciclo ($\Delta\Phi/2\pi$) no será interpretada como corrimiento de franjas, debido a que la experiencia no permite ver espacialmente la interferencia. Por el contrario, este coeficiente multiplicado por el período de la onda (T) dará el corrimiento temporal de ambas ondas.

IV. DETALLES CONSTRUCTIVOS DEL INTERFERÓMETRO ACÚSTICO

Para este experimento se necesitan tres transductores piezoeléctricos de 40 kHz, uno a ser usado como emisor y otros dos como receptores. Estos dispositivos son de bajo costo y se pueden conseguir en cualquier negocio de electrónica. Su uso para prácticas de física ondulatoria ha sido ampliamente aprobado por la comunidad educativa (Greenslade, 1994; Se-yuen, 2003). Estos sensores y emisores funcionan bajo el principio del efecto piezoeléctrico. El emisor funciona con un generador de ondas de gran estabilidad que permite inyectar señales de 40 kHz. A las salidas de los receptores se conecta un filtro pasabanda centrado 40 kHz para eliminar señales espurias, y se amplifica la señal con una ganancia variable para cada canal hasta 100. También se tiene especial cuidado en no cambiar la fase de las señales para los dos canales del osciloscopio, ya que es esta la variable a determinar. Para la experiencia se usa un osciloscopio convencional, pero por tratarse de señales de audio se puede usar cualquier adquisidor de datos para PC.

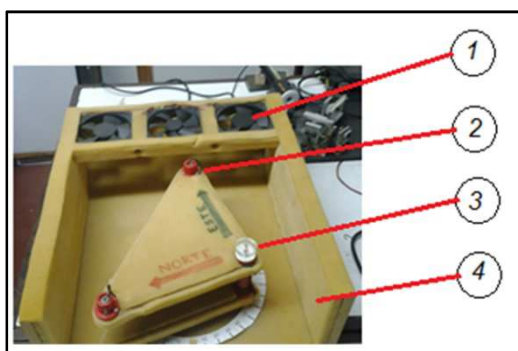


FIGURA 7. Disposición del equipo y piezas que lo conforman. 1– Ventiladores o *Coolers*; 2– Receptores de ultrasonido (r_1); 3– Emisor de ultrasonido (E); 4– Estructura contenedor forrada con goma espuma.

Hay que tener en cuenta que ambos receptores se deben ubicar equidistantes del emisor, y es por esa razón que se toma como base una estructura triangular isósceles rectangular de 30 cm de longitud de los catetos. En el centro de masa del triángulo se ubica un eje con rodamientos que permita que la estructura rote, pudiendo así variar el ángulo θ de la figura 5. El material que se utiliza en toda la construcción es madera del tipo prensada. Para encerrar el flujo de aire entre dos paredes, se construye una caja, también de madera donde se pueda montar el eje y los ventiladores. En la figura 7 se observa que los tres ventiladores tipo *cooler* y la dirección que adquiere el viento facilita que el flujo sea lo más laminar posible, sin turbulencias. Para evitar que las ondas sonoras reboten en las paredes de la estructura, se forran las paredes internas del aparato incluido el triángulo rotante, con goma espuma para absorber las ondas de ultrasonido.

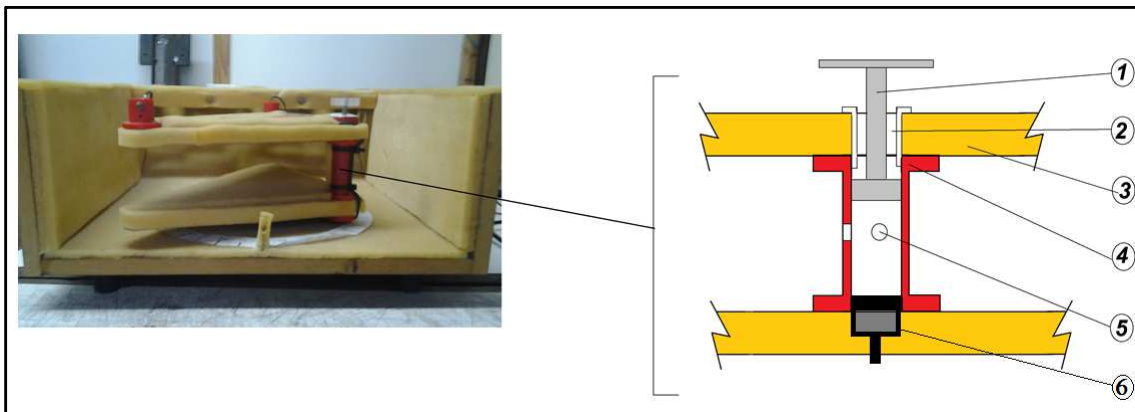


FIGURA 8. Detalle de la cavidad resonante. 1– Tornillo micrométrico adosado al pistón; 2– Rosca; 3–Madera prensada forrada en goma espuma; 4– Cavidad resonante; 5– Orificios perpendiculares por donde sale el ultrasonido; 6– Transductor piezoeléctrico usado como emisor.

La cavidad resonante cumplió dos funciones en este práctico. Está diseñada para que el ultrasonido se dirija hacia los sensores por medio de los orificios perpendiculares (figura 8, detalle 5) y, por otro lado, a través del pistón se logra que la onda resuene dentro de la cavidad, logrando así un control en las fases con que salen las ondas por ambos orificios y facilita la puesta a cero de los dos canales. La variación de la posición del pistón convierte a la cavidad en una especie de un pequeño Tubo de Kundt que es utilizado para determinar la velocidad del sonido en un momento del práctico.

V. RESULTADOS

Se midió previamente la velocidad del sonido utilizando la cavidad resonante como un tubo de Kundt. Las ondas estacionarias que resuenan en la cavidad se pueden limitar en su intensidad variando la longitud del tubo que conforma el resonador, por medio del tornillo roscado (1mm/vuelta). En conjunto con el osciloscopio se detectaron las distancias en la que el ultrasonido alcanzó su intensidad máxima. Para el día del experimento la velocidad de sonido resulto ser $c = 336 \pm 4$ m/s con una frecuencia de $f = 40,0 \pm 0,4$ kHz y una $\lambda = 8,40 \pm 0,02$ mm.

La experiencia se inició verificando que las ondas que salían de los orificios de la cavidad (figura 8, detalle 5) estuviesen en fase. Para esto se utilizó el osciloscopio, sin prender los ventiladores. Se ajustó la cavidad hasta ver que ambas señales llegaban simultáneamente a los receptores. Luego se comenzó a rotar el interferómetro variando el ángulo en un sentido y en el otro cada 10° , obteniendo así la gráfica de la figura 9, donde se observa la diferencia de fase en función del $\sin \theta$.

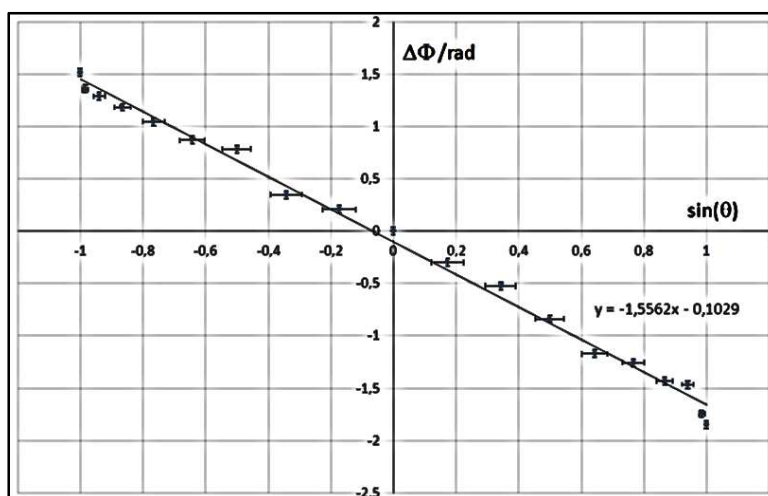


FIGURA 9. Gráfica del desfase en radianes en función de $\sin \theta$

La gráfica de la figura 9 corresponde a la obtenida por los estudiantes del cuarto año de la Licenciatura de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP). A pesar de que no todos los puntos mantienen la misma correlación, se observa una relación lineal dentro de los márgenes de error de $\sin \theta$ en función del desfase de las ondas. Sus márgenes de error incluyen a la recta obtenida por cuadrados mínimos.

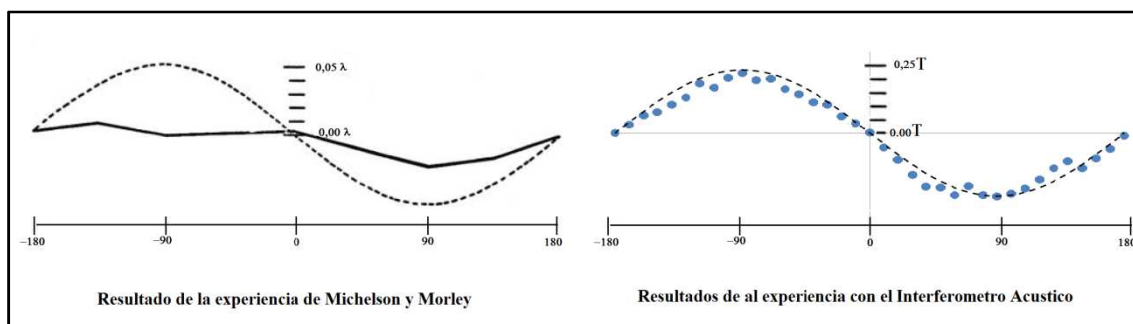


FIGURA 10. En los ejes de abscisa de ambos gráficos se observa el ángulo de rotación de interferómetro. En el eje de ordenada, la experiencia de Michelson tiene el desplazamiento de franjas en unidades de longitud de onda. En el gráfico obtenido en nuestra experiencia está la variación de fase multiplicado por el período de la onda.

En la figura 10 se observa el gráfico original obtenido del artículo de Michelson y Morley de 1887. Con línea punteada se representan los resultados que esperaban obtener al rotar el interferómetro, y con líneas continua y gruesa, los resultados obtenidos. De este gráfico se infiere que el viento del éter no está presente a menos que afecte en una centésima el corrimiento de franja. Esto muestra mucha distancia entre los valores del modelo y las mediciones experimentales obtenidas. En el gráfico de la derecha, las mediciones obtenidas en el interferómetro acústico, muestran claramente que la contrastación entre el modelo y las mediciones, no están alejados. Con ondas de sonido, el modelo de suma de velocidad coincide perfectamente con las medidas obtenidas.

VI. CONCLUSIONES

El práctico de laboratorio que se propone en este trabajo es parte de las actividades experimentales que se llevan adelante en la formación de Licenciados y Profesores de Física en la UNMDP en la materia de Física V (la cual incluye temas de introducción a la Física Moderna). El dispositivo y su manual de uso, fueron construidos por algunos de los autores durante su formación como estudiantes avanzados de la Licenciatura en Física, en la materia Física Experimental. La actividad experimental propuesta puede tener otras variantes, como ser la determinación de la velocidad del viento y su correspondiente contrastación con la medición directa de este flujo de aire. A pesar de que no es el objetivo del práctico, en base a la pendiente de la figura 9 y de la velocidad del sonido de ese día se obtiene una velocidad de arrastre del viento del orden de $2,0 \pm 0,2$ m/s que se estima es la velocidad promedio que ofrece un “enfriador o ventilador de fuente de PC”, utilizado en esta práctica.

El uso del equipo, la elaboración de un informe sobre las mediciones obtenidas, así como la discusión, han demostrado una comprensión más significativa sobre la experiencia de Michelson y Morley, permitiendo que el uso de este equipamiento ilustre uno de tantos tópicos que tiene la física moderna, en particular en este caso, relacionado con la relatividad. Si los estudiantes entienden claramente las bases metodológicas de este trabajo de laboratorio, pueden llevar adelante un análisis certero de la experiencia de Michelson y Morley y el lugar que ocupó dentro del debate que, posteriormente, permitió enunciar los principios de la teoría de la relatividad. Con el desarrollo de experiencias prácticas de este tipo buscamos evitar que el aprendizaje de la física moderna se convierta en una simple transmisión verbal de ideas que se yuxtaponen con la física clásica.

REFERENCIAS

Drewes, A. y Palma, H. (2006). Crítica al experimento crucial: Michelson y la hipótesis del éter (1887–1939). Algunas implicaciones para la enseñanza de la Física. *Rev. Eureka. Enseñ. Divul. Cien.*, 3(3), 432–451.

Gil Pérez, D., Senent Pérez, F. y Solbes Matarredona, J. (1986). Análisis crítico de la introducción de la física moderna en la enseñanza media. *Revista de Enseñanza de la Física*, 2(1), 16–21.

Greenslade Jr, T. B. (1994). Experiments with ultrasonic transducers. *The Physics Teacher*, 32(7), 392–398.

Holton, G. (1988). *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein*. Cambridge and London: Harvard University Press.

Michelson, A. A., Pease, F. G., y Pearson, F. (1929). Repetition of the Michelson–Morley experiment. *JOSA*, 18(3), 181–182.

Michelson, A. A., y Morley, E. W. (1887). On the relative motion of the earth and the luminiferous Ether. *The American Journal of Science*, 34(203), 333–343.

Se-yuen, M. (2003). Wave experiments using low-cost 40 kHz ultrasonic transducers. *Physics Education*, 38(5), 441.