

DISPOSITIVO INTERFEROMÉTRICO DE BAJO COSTO PARA MEDIR DESPLAZAMIENTOS MICROSCÓPICOS

E. E. Alanís¹, G. G. Romero², C. C. Martínez¹, L. Álvarez¹ y G. A. Salazar¹

¹Facultad de Ciencias Exactas, ²Facultad de Ingeniería
Consejo de Investigación
Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177, 4400 Salta
alanise@unsa.edu.ar

Iluminado apropiadamente un interferómetro de Michelson, es posible reemplazar los espejos de primera superficie por láminas de metal pulido y obtener franjas de razonable calidad. Se describen los aspectos básicos a tener en cuenta en el diseño de un interferómetro de bajo costo. Como aplicación, se describe una experiencia de rozamiento estático, en la cual se miden pequeñas deformaciones en las superficies de contacto de dos cuerpos, antes de alcanzarse la fuerza de rozamiento máxima entre ambas superficies.

In a Michelson interferometer it is possible to replace the first surface silvered mirrors by polished metal plates, provided that an appropriate illumination is used. In this paper, we propose the use of a simple interferometric device in which, although it is made with very common and inexpensive elements, fringes of reasonable quality can be obtained. As an application, we describe an experiment on static friction force between two surfaces, in which the instrument is used to measure microscopic deformations that occur before the maximum value of the force is attained.

I. TEORÍA

El interferómetro de Michelson es un dispositivo donde dos haces obtenidos por división de amplitud siguen trayectorias perpendiculares y luego son nuevamente reunidos para producir franjas de interferencia. Si bien la explicación de su funcionamiento puede encontrarse en varios libros de texto^(1,2), conviene aquí dar una breve descripción para puntualizar algunos aspectos de interés. En la Figura 1 se muestra un esquema del mismo, que consiste en dos espejos planos de primera superficie, M_1 y M_2 , perpendiculares entre sí y un divisor de haz DH, ubicado en la intersección de las normales a los espejos, formando un ángulo de 45° con las mismas.

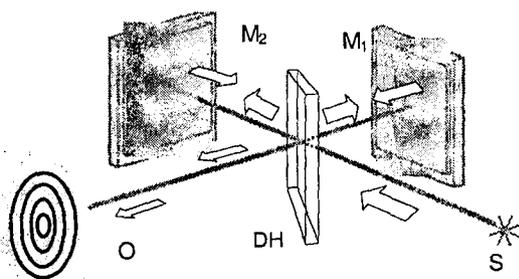


Figura 1: Esquema de un interferómetro de Michelson. S, fuente puntual; M_1 , M_2 , espejos; DH, divisor de haz. Se muestra la trayectoria de un haz a lo largo de los ejes.

Existen varias configuraciones posibles de iluminación según sea el tipo de aplicación a implementar. Consideremos por el momento que iluminamos con una fuente puntual monocromática, S, ubicada a la entrada del interferómetro. A la salida del mismo se coloca una pantalla para la observación del patrón de interferencia. Un haz proveniente de la fuente puntual, propagándose en

dirección normal al espejo M_2 , al llegar al divisor de haz se divide en dos haces de igual intensidad. El haz que se dirige al espejo M_1 se refleja en éste y se transmite parcialmente a través del divisor de haz, llegando a la pantalla de observación. A su vez el haz reflejado por el espejo M_2 se refleja parcialmente en el divisor de haz, llegando también a la pantalla, produciéndose de esta manera la interferencia de los dos haces.

Para comprender mejor el tipo de franjas que se producen, considérese lo siguiente: mirando hacia el divisor de haz desde la posición de la pantalla, se observa el espejo M_1 a través del divisor de haz; superpuesto a éste, se observa la imagen virtual, M_2' , del espejo M_2 producida por el divisor de haz. La imagen M_2' y el espejo M_1 estarán en dos planos paralelos separados una distancia d , a lo largo del eje visual. Además, se verán dos imágenes virtuales de la fuente S (S_1 y S_2') producidas respectivamente por M_1 y M_2' . Como los espejos son perpendiculares, las fuentes virtuales estarán alineadas, una detrás de la otra, separadas por una distancia $2d$. Esto se muestra en la Figura 2. El patrón de interferencia resultante será entonces el producido por dos fuentes puntuales coherentes⁽³⁾, ubicadas como se indica.

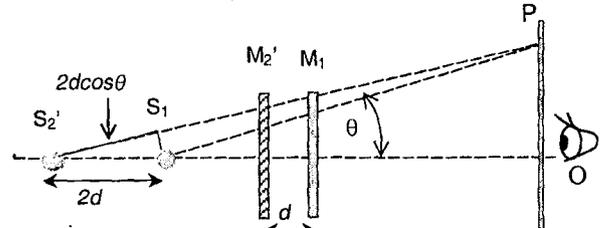


Figura 2: O, observador; P, pantalla; M_1 , espejo; M_2' , imagen de M_2 ; S_1 , S_2' , imágenes virtuales de S.

Considerando un punto P sobre la pantalla, que subtende un ángulo θ con las fuentes, los rayos provenientes de éstas llegan a P con una diferencia de

caminos ópticos, $\Delta s = 2d \cos \theta$ (se supone que la distancia a la pantalla es mucho mayor que $2d$). Si esta diferencia es un múltiplo entero de longitud de onda, λ , los rayos interferirán constructivamente y se tendrá un punto brillante. Como existe simetría respecto del eje indicado, esta condición se cumplirá sobre una circunferencia con centro en dicho eje: por lo tanto se obtendrá una franja circular brillante donde se cumpla la condición:

$$2d \cos \theta = n \lambda \quad (1)$$

donde n es el orden de interferencia.

Si la diferencia de caminos es un múltiplo impar de $\lambda/2$, la interferencia será destructiva y la franja correspondiente oscura. El diagrama de interferencia es un sistema de franjas circulares concéntricas, como se muestra en la Figura 1.

Considérese ahora el centro del diagrama. En esa región $\cos \theta = 1$ y la ecuación (1) queda:

$$2d = n \lambda \quad (2)$$

Cuando uno de los espejos se mueve a lo largo del eje, paralelo a sí mismo, la distancia d varía y la región central pasa de brillante a oscura (y viceversa) cada vez que el valor de d cambia en $\lambda/2$. Contando el número de franjas que aparecen (o desaparecen) en el centro del diagrama, a medida que el espejo se traslada, puede medirse con mucha precisión la distancia que recorre el espejo.

II DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Hasta aquí se supuso que los espejos están perfectamente perpendiculares entre sí, por lo que las fuentes virtuales están perfectamente alineadas a lo largo del eje del interferómetro y las franjas circulares son concéntricas con dicho eje. Para alinear de esta manera el interferómetro se requiere que uno de los espejos posea un mecanismo de tornillos calantes de paso muy fino, que permita modificar su orientación. La operación de alineado es muy delicada y requiere de gran destreza. Por ejemplo, si la normal al espejo forma un pequeño ángulo α respecto del eje, Figura 3, la imagen de la fuente que forma ese espejo estará desplazada angularmente un ángulo 2α , como se muestra exageradamente en dicha figura. El centro del diagrama, que se encuentra en la dirección que une las dos fuentes virtuales, estará desplazado respecto del eje del interferómetro y probablemente caerá fuera de la pantalla.

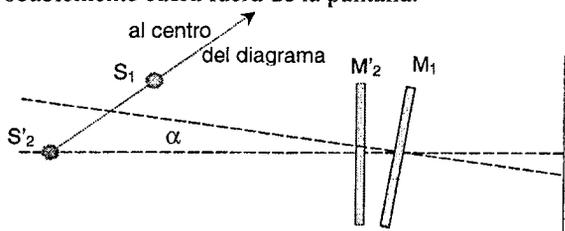


Figura 3: Desplazamiento del centro del diagrama, al inclinar uno de los espejos

En la práctica ocurre que un pequeño movimiento de los tornillos calantes produce un gran desplazamiento del sistema de franjas, de manera que las que intercepta la pantalla tienen una estructura muy fina y son difíciles de resolver por el ojo.

Esta extrema sensibilidad para alinear el sistema, propia de todos los interferómetros, puede disminuirse en este caso modificando la geometría de iluminación. Esto es sumamente importante en un dispositivo diseñado para alumnos con escasa experiencia en interferometría.

Supóngase que las fuentes estuviesen localizadas en la superficie de los espejos respectivos. En ese caso, un pequeño desplazamiento angular del espejo no tendrá casi influencia en la posición de la fuente (el efecto sería nulo si el eje de giro pasara por ella) y en consecuencia el sistema de franjas permanecerá casi inalterado.

Ahora bien: ¿cómo se logra ubicar las fuentes allí?. Una geometría de iluminación posible se ilustra en la Figura 4. A la salida del láser se coloca una lente L_1 de pequeña distancia focal, f_1 (≈ 20 mm), de manera que el haz converge hacia el foco de la lente. Allí tenemos entonces una fuente que, a los efectos prácticos, es puntual. El haz diverge desde el foco con una apertura que depende de f_1 . Por medio de otra lente L_2 , de distancia focal f_2 (≈ 100 mm) elegida convenientemente, se forma una imagen real de la fuente enfocada en la superficie del espejo M_2 y, por reflexión en el divisor de haz, otra imagen en la superficie de M_1 . De esta manera se logra desensibilizar el interferómetro, en cuanto a la operación de alineado se refiere.

Un prototipo del interferómetro de bajo costo construido se esquematiza en la Figura 4.

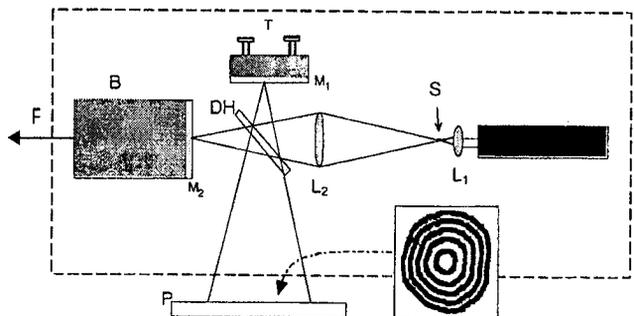


Figura 4. Vista en planta del dispositivo construido. L, láser; L_1 , lente concentradora; L_2 , lente de enfoque; M_1 , espejo ajustable con tornillos calantes; M_2 , espejo móvil adosado al bloque B; DH, divisor de haz; P, pantalla de observación. El inserto muestra el diagrama de franjas de interferencia.

Esta forma de iluminar los espejos tiene una ventaja adicional, muy útil en el presente caso. Dado que solo se utiliza una pequeña superficie del espejo, correspondiente al tamaño de la imagen de la fuente, la calidad óptica de la superficie deja de ser importante. De hecho es posible reemplazar los espejos por dos superficies metálicas pulidas razonablemente planas y obtener franjas de interferencia de buena visibilidad. En este caso se ha utilizado chapa de aluminio espejada disponible en el comercio local. Además, se ha utilizado un vidrio común, de 4 mm de espesor, para el divisor de haz. Como las reflexiones en las dos caras del vidrio tienen aproximadamente la misma intensidad, se forman dos imágenes de S en el espejo M_1 . Una de ellas puede ser fácilmente suprimida mediante un diafragma colocado adecuadamente sobre la superficie del espejo.

III APLICACIÓN

En un artículo publicado recientemente en la revista *The Physics Teacher*, Reichert⁽⁴⁾ presenta algunos ejemplos didácticos sobre fuerza de fricción estática entre un bloque y una superficie sobre la que está apoyado. Para explicar el comportamiento de la fuerza de fricción estática, utiliza un modelo simple basado en "bandas" elásticas microscópicas que conectan los átomos de ambas superficies. El autor remarca que el bloque se mueve, "aunque solo una distancia microscópica", cuando actúa la fuerza externa y que "sería interesante y útil que los estudiantes pudieran observar estos desplazamientos". En otro párrafo dice que "medir estos desplazamientos requiere de instrumentos ópticos delicados y costosos". Efectivamente, una medida de tan pequeños desplazamientos puede ser llevada a cabo generalmente utilizando un dispositivo interferométrico.

El instrumento de bajo costo descrito en la sección anterior, ha sido aplicado a medir los desplazamientos microscópicos que ocurren debido a la deformación de las superficies en contacto, antes de ser superada la fuerza de rozamiento estático máxima entre ambas.

Uno de los espejos del interferómetro ha sido adosado a un bloque de madera, el cual reposa sobre una superficie plana, horizontal, del mismo material, como se ilustra en la Figura 4. La fuerza externa se aplica por medio de una cuerda sujeta al bloque que pasa por una polea de reenvío y en su otro extremo se cuelga un recipiente. La carga se aplica gradualmente vertiendo agua en el recipiente. A medida que se vierte el agua, se observa que en el centro del diagrama de interferencia van apareciendo franjas. Contando el número de franjas que "nacen" en el centro puede determinarse, mediante la ecuación (2), la magnitud del desplazamiento.

IV RESULTADOS

En la Figura 5 se muestran los resultados de un experimento típico. En el eje de abscisas se ha representado la fuerza aplicada, en N y en el de las ordenadas el desplazamiento correspondiente del bloque, en μm . Como se explicó anteriormente, si aparecen m franjas en el centro, el bloque se desplaza una cantidad dada por:

$$\Delta d = m \lambda / 2 \quad (3)$$

en este caso, $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$ (láser de HeNe).

Es de hacer notar que la deformación es reversible, en el sentido que si se disminuye gradualmente la carga aplicada, las franjas de interferencia comienzan a desaparecer en el centro del patrón, contándose el mismo número, m , en el momento en que la carga es nula.

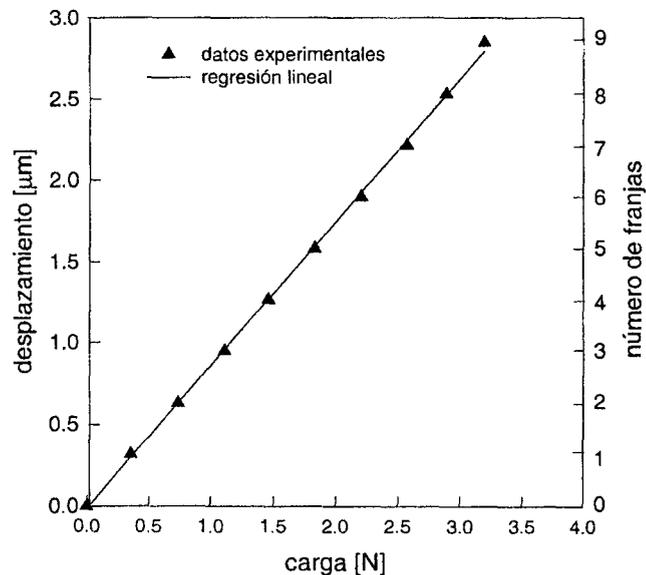


Figura 5. Desplazamiento del bloque en función de la carga aplicada. En el eje derecho se muestra el número de franja correspondiente.

La fuerza de rozamiento máxima corresponde a la carga aplicada que provoca el deslizamiento del bloque. Adicionalmente se ha calculado el coeficiente de fricción estática. En este caso, como se sabe

$$F = \mu N$$

donde μ es el coeficiente de rozamiento estático y N la fuerza normal (en este caso, igual al peso del bloque). La fuerza se mide a partir de la cantidad de agua que hay en el recipiente cuando se produce el deslizamiento.

En este experimento, la fuerza máxima aplicada es $F = 3,19 \text{ N}$ y la fuerza normal es $N = 8,00 \text{ N}$ por lo que el coeficiente de fricción resulta, $\mu = 0.399 \pm 0.004$.

Nota: para que las deformaciones fuesen más notables y a fin de mantener las dimensiones del bloque razonablemente pequeñas, se colocó sobre él una sobrecarga adicional.

Referencias

1. Paul A. Tipler, Física Volumen II. Ed. REVERTÉ S.A. (1992)
2. Francis W. Sears, Mark W. Zemansky, Hugh D. Young y Roger A. Freedman. Física Universitaria Vol II. Ed. Addison Wesley Longman (1999)
3. Marcelo Alonso y Edward Finn, Física Volumen II, Ed. Fondo Educativo Interamericano (1986)
4. Jonathan F. Reichert, "How did friction get so smart?" *Phys. Teach.* **39**, 29-31 (Jan. 2001).