

INTERFEROMETRO DE MICHELSON ECYT



INTRODUCCION

DESCRIPCION

FUNCIONAMIENTO

EXPERIENCIAS

Obtención de franjas de interferencia

- Franjas rectas
- Franjas circulares
- Franjas coloreadas
- Profundidad y visibilidad de las franjas
- Vibraciones y efectos indeseables

Medición y determinación cuantitativas

- Calibración de la carrera del espejo móvil

- Generalidades
- Procedimiento
- Valores obtenidos
- Análisis de resultados

- Determinación de la longitud de onda de la luz monocromática

- Generalidades
- Procedimiento

- Comparación de longitudes de onda

- Medición de índices de refracción

- Introducción

- Una aplicación: espesores del orden de 1 mm

- Procedimiento
- Resultados experimentales
- Análisis de resultados

- Otra aplicación: espesores del orden de 10^{-2} mm

- Procedimiento
- Resultados experimentales
- Medición de pequeños espesores

Otras experiencias

- Determinación de uniformidad de espesores
- Determinación de irregularidades superficiales
- Determinación de heterogeneidades en sólidos transparentes
- Observación de una distribución de esfuerzos
- Medición del índice de refracción de un gas

1. Introducción

Uno de los fenómenos principales asociados con un movimiento ondulatorio es el de interferencia. En el caso particular de las ondas luminosas, se observan interferencias cuando dos frentes de ondas coherentes se superponen en un mismo punto.

Existen dos formas fundamentales de obtener frentes coherentes :

- a) por división del frente de ondas (interferencia por doble rendija o rendijas múltiples)
- b) por división de amplitud (interferometría)

Una de las aplicaciones más importantes del segundo método es el interferómetro de Michelson, el cual es empleado tanto en física experimental como en física aplicada. En este texto se dan las indicaciones básicas que permitirán conocer los usos corrientes del interferómetro y obtener un manejo fluido del mismo. Una vez lograda la familiarización con el instrumento y con el principio de su funcionamiento podrán encontrarse innumerables aplicaciones del mismo.

2. Descripción del Equipo

El interferómetro consta de :

- a) base metálica rígida de 247 x 343 x 8 mm;
- b) espejo aluminizado fijo, montado sobre marco de acrílico, solidario con la base;
- c) espejo aluminizado móvil, montado sobre marco de acrílico sujeto a placa desplazable mediante tres puntos; dos de ellos móviles mediante tornillos de paso fino, lo que permite pequeñas variaciones en la orientación. Uno de ellos desplaza en sentido horizontal y el otro en vertical. El espejo puede desplazarse mediante un mecanismo especial (paralelogramo deformable) accionado a través del movimiento de un tornillo micrométrico.
- d) espejo semialuminizado orientado a 45° con respecto a cada uno de los espejos fijos y montado a su vez sobre un soporte de aluminio;
- e) placa compensadora, paralela al semi-espejo y fija al mismo soporte.

Los componentes ópticos poseen una planitud superior a 10^{-4} mm. La palanca (i) que vincula el espejo desplazable con el micrómetro, reduce el desplazamiento de éste en un factor de aproximadamente cinco.

3. Funcionamiento

El mismo puede deducirse de la observación del esquema del aparato (Figura 1) :

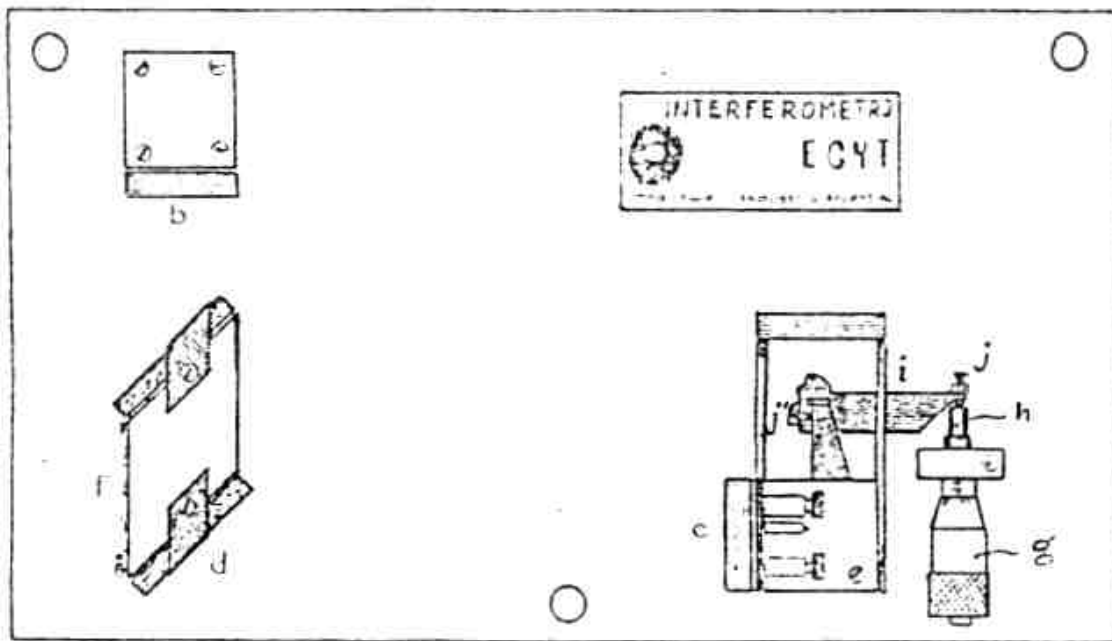
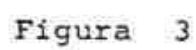
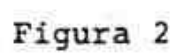


Figura 1.

El semiespejo (d) tiene por objeto dividir la amplitud del haz de luz proveniente de la fuente extensa -que se obtiene iluminando la superficie esmerilada (f)- en dos haces: uno que luego de reflejarse se dirige hacia (b) y otro que atravesando la placa de vidrio se dirige a (c). Ambos haces son (para diferencias de caminos pequeños) coherentes pues provienen de una única fuente. Luego de reflejarse en (b) y (c), se superponen en (d) produciéndose interferencia, la que puede visualizarse mirando en dirección d-b.

El brazo móvil (i) transmite el movimiento del palpador (h) del tornillo micrométrico (g), al soporte del espejo móvil - Dos tornillitos (j) y (j') pueden ser regulados para que la transmisión sea óptima.

El siguiente esquema muestra el juego de las imágenes dadas por los distintos espejos.



La notación utilizada es la siguiente:

f : es la fuente extensa de luz

f_c : imagen de f dada por c

f_{cd} : " " f_c " " d

f_d : " " f " " d

f_{dc_d} : " " f_d " " c_d

c_d : " " c " " d

f_{db} : " " f_d " " b

Es de señalar que f_{dc_d} y f_{cd} siempre coinciden.

En la misma ilustración (Figura 2) se indica un punto cualquiera (A) perteneciente a la placa (f) y todas sus imágenes, con la misma convención para los índices.

Según se deduce, el ojo, al mirar hacia (b), ve dos imágenes de la fuente : (f_{db}) y

(f_{dc_d}). Una es la imagen de la imagen (f_d) de (f), dada por el espejo (b) y la otra, tan próxima como la regulación del espejo (c) lo permita, es la imagen que de la misma imagen (f_d) da la imagen (c_d), del espejo (c).

Ambas fuentes ficticias (f_{db}) y (f_{dc_d}), estarán perfectamente superpuestos (puesto que son imagen del mismo objeto (f_d)) si y sólo si están superpuestos los espejos que las producen, es decir: (b) y la imagen (c_d) de c .

Si (b) no se superpone exactamente con (c_d), el hecho de regular (c), lo que hace es mover (c_d), habrá una cierta diferencia de camino entre cada par de puntos (A_{db}) y (A_{dc_d}) de las fuentes ficticias (Figura 3).

Esta diferencia de caminos es la que originará la aparición de franjas interferenciales.

Para facilitar la observación de estas franjas deben tenerse en cuenta los siguientes puntos :

- I los caminos ópticos recorridos por los haces de luz desde su separación hasta su recombinación, deben ser sensiblemente iguales;
- II los espejos (b) y (c) deben estar perpendiculares entre sí;
- III la fuente de luz debe ser coherente, (en lo posible monocromática), extensa e intensa.

Coherencia y monocromaticidad están íntimamente ligadas. Una fuente de luz no monocromática (por ejemplo de luz blanca), tendrá suficiente coherencia, si su espectro es de líneas.

Un monocromador alimentado por una lámpara de filamento (espectro continuo, de "Cuerpo Negro"), probablemente no tendrá suficiente coherencia. Un tubo fluorescente común sí la tendrá. Con luz incoherente se observan pocas franjas, muy vistosas (no más de 20, es decir, apenas 3 divisiones en el micrómetro). Es verdaderamente difícil hallarlas por primera vez, ya que lo usual es que se pueda delimitar parcialmente la zona en que aparecerán, dentro de -a lo sumo- unos 4 ó 5 mm de la carrera del micrómetro.

4. Experiencias

4.1 Obtención de franjas de interferencia

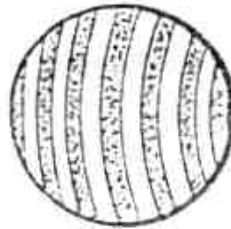
4.1.1 Franjas rectas

A fin de obtener franjas rectas es necesario que se satisfagan las indicaciones I, II y III citadas en el apartado anterior. Para obtener la igualdad de caminos ópticos de ambos haces basta asegurar la equidistancia de los espejos (b) y (c) con el semiespejo (d). Una primera aproximación a esta condición se obtiene midiendo la separación entre el semiespejo y el espejo fijo mediante una escala milimétrica y desplazando el espejo móvil hasta que su distancia al semiespejo coincida con la primera. El ajuste final de la posición de los espejos se realiza luego de lograr la perpendicularidad entre (b) y (c). Para ello debe iluminarse la superficie traslúcida (f) sobre la que se han trazado dos trazos finos cruzados. Situándose a unos treinta centímetros del semiespejo y observando en dirección d-b se verán dos imágenes principales del trazo, cuya posición relativa es posible modificar cambiando la orientación del espejo (c).

Cuando las imágenes se encuentren superpuestas los espejos (b) y (c) estarán perpendiculares entre sí. Si se desea distinguir cada una de las imágenes, basta con interrumpir uno u otro haz mediante una pantalla. La equidistancia entre (b) y (c) y el semiespejo se logra eliminando la paralaje que se observe entre ambas imágenes de los trazos. Si se iluminó la superficie esmerilada con luz blanca, al cambiarla por la fuente monocromática (lámpara de neón, llama de sodio, etc.) deben observarse franjas de interferencia. Si ello no ocurre, serán necesarios leves ajustes en los tornillos de orientación del espejo móvil.

Muy leves ajustes de este espejo pueden hacer que las franjas se vean anchas y claras, o bien, que estén tan estrechamente apretadas que no sea posible verlas.

El máximo ancho de franjas corresponde a la posición más próxima a la perpendicularidad de los espejos. Desplazando el espejo móvil, se observa que las franjas adquieren cierta curvatura y que el signo de la misma se invierte si el espejo móvil se mueve desde la posición de equidistancia, alejándose o acercándose al semiespejo.



4.1.2 Franjas circulares

Se observarán franjas circulares cuando la perpendicularidad de ambos espejos sea perfecta y se esté lejos (bastante adelante o bastante atrás de la posición de equidistancia).

Debe notarse que, cuando las distancias de ambos espejos al semiespejo coinciden, se puede dificultar la observación de franjas circulares, pues el ancho de las mismas cubrirá parcialmente el campo visual y porque además los defectos de las superficies ($< \lambda/4$), multiplicados por el número de superficies que hay que tener en cuenta, hacen que, en esta situación en que sería de esperar que todo el campo se iluminase u oscureciese uniformemente si los defectos de planitud de cada superficie no superasen $\lambda/10$ se observen totalmente exagerados los defectos. El efecto, a pesar de ello, será, con luz blanca, muy vistoso, pero la franjas circulares sólo aparecerán alejándose de la zona y para esto, deberá utilizarse luz monocromática.

Si una vez obtenidas las franjas circulares se desplaza el espejo móvil, se observará que convergen los círculos hacia el centro si la distancia entre el espejo (b) y la imagen del (c) disminuye, y se alejan del centro, si esta distancia aumenta.

4.1.3 Franjas coloreadas

Para observar este tipo de franjas debe trabajarse con luz blanca y lograr un ajuste muy crítico de la posición del espejo móvil de manera que los caminos ópticos de cada haz sean exactamente iguales. Ello se debe a que para que sean observadas franjas de interferencia con luz blanca debe satisfacerse la condición de interferencia simultáneamente para todas las longitudes de onda contenidas en el haz, lo que sólo ocurre cuando la diferencia de caminos ópticos es cero o muy próxima a este valor.

Para realizar esta experiencia se debe comenzar a trabajar con luz monocromática,

determinando la zona donde las franjas observadas sean aproximadamente rectas. Allí según se mencionó, el espejo fijo y la imagen del móvil coinciden en algún punto, siendo nula la diferencia de caminos ópticos. Esta zona puede limitarse tomando nota, en el tornillo micrométrico, de las posiciones del espejo móvil en las que el sentido de la curvatura está bien definido.

Cambiando la luz monocromática por la blanca y desplazando el espejo entre ambas posiciones se observarán franjas coloreadas. Este desplazamiento debe realizarse con suma lentitud, pues si el ángulo formado por los dos espejos es apreciable, la zona del campo visual ocupada por las franjas es sumamente estrecha y difícil de visualizar. Una vez ubicadas estas franjas, la observación puede optimizarse actuando muy suavemente sobre los tornillos del espejo móvil a fin de realizar desplazamientos muy pequeños del mismo.

Una de las aplicaciones principales de estas experiencias es la de definir la posición del espejo móvil en la que la diferencia de caminos ópticos es nula.

4.1.4 Profundidad y visibilidad de las franjas

Al observar las franjas debe tenerse en cuenta que se mira hacia el espejo b , pero el ojo tiende a enfocar se en la imagen de la cruz trazada sobre f (o en su textura). Pero esta se halla detrás de b . (Como anotación: es una experiencia interesante eliminar f y enfrentar $d-c$ con una pared o ventana, o el cielo claro; el ojo se enfocará en esos detalles, al infinito - las franjas se producirán igual, pues dependen de la falta de coincidencia entre b y la imagen de c).

No obstante, las franjas que se originan entre b y la imagen de c , no están allí, sino que están generalmente en algún lugar situado delante de b .

Ocurre frecuentemente que durante alguna medición en la que hay que contar muchas franjas, repentinamente, el ojo las pierde, se desvanecen. Ello se debe a que el ojo ha dejado de enfocar correctamente. Deberá descansar y enfocar nuevamente.

4.1.5 Vibraciones y efectos indeseables

Las vibraciones se visualizan notablemente en un equipo de este tipo, lo que puede ser utilizado para ilustrar las dificultades halladas por Michelson en su famosa experiencia, (realizada con un instrumento de grandes dimensiones, con el que intentaba detectar desplazamiento de décimas de franjas).

Si se desea minimizar la incidencia de vibraciones, debe trabajarse sobre una mesa sólida, lejos de máquinas en movimiento y a cubierto de corrientes fuertes de aire. Los tornillos deberán manipularse con sumo cuidado y tratando de contrarrestar la tensión mecánica que se desarrolla en la mano, que producirá corrimientos de franjas perfectamente visibles.

Muy notable es el efecto que se registra si se presiona con un dedo sobre alguna de las esquinas próximas de la base, mientras se están observando las franjas. Ello se origina por la imperceptible flexión de la misma, a pesar de ser la pieza más sólida del equipo.

4.2 Mediciones y determinaciones cuantitativas

4.2.1 Calibración de la carrera del espejo móvil

4.2.1.1 Generalidades

En la mayoría de las mediciones es necesario determinar el desplazamiento (s) del espejo móvil. Ello se realiza sobre la base de las lecturas (L) del tornillo micrométrico y al factor de reducción (f_r) entre uno y otro. Dicho factor está definido por :

$$f_r = \frac{(L_{\text{final}} - L_{\text{inicial}})}{s} = \frac{\Delta L}{s} \quad (1)$$

y depende de las dimensiones de la palanca (i) y (en menor grado) del ajuste de los tornillos (j) y (j'). El equipo se entrega con : $f_r \approx 5$. Cada usuario deberá, como primer tarea, calibrar la carrera de su interferómetro, a fin de determinar f_r con la máxima precisión posible (para lo cual se tomará como patrón alguna luz de longitud de onda conocida).

Luego de esto, podrá utilizar :

$$s = \frac{\Delta L}{f_r} \quad (2)$$

(se lograrán precisiones del orden del 1%).

Utilizaremos como patrón un láser He-Ne ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) u otra fuente de luz mono

cromática de longitud conocida. (Por ejemplo, el Láser Ecyt de 0,5 mW LO805A o los correspondientes a los equipos de óptica física Ecyt 12-850 ó 12-855). Si se utiliza el láser, debe expandirse el haz con un expansor (por ejemplo el de los equipos de óptica física Ecyt 12-850 ó 12-855) o con alguna lente divergente (o convergente) de unas 20 dioptrías. El interferómetro se situará a 3 ó 4 m de distancia del láser y allí el haz (que tendrá un diámetro de 5 ó 6 centímetros) se hará incidir sobre la placa esmerilada f.

No será necesario oscurecer el ambiente (IMPORTANTE : si el láser que se utiliza es de más de 1mW será necesario atenuarlo con filtros adecuados).

No se lograrán precisiones muy superiores al 1 %. La práctica será un factor muy importante, pero no se pueden contar 100 franjas sin despegar los dedos del tornillo micrométrico, y cada vez que esto se hace, no se puede asegurar que no se ha perdido alguna franja.

4.2.1.2 Procedimiento

- a. Ubique el interferómetro sobre una mesa horizontal muy sólida. Asegúrese de poder ubicar la cabeza cómodamente en un apoyo que la mantenga fija y de poder manipular con comodidad el tornillo micrométrico. Asegúrese también de tener un lugar para el láser.
- b. Disponga el láser con el expansor o la lente adecuada. Recuerde las precauciones para el uso de láseres.
- c. Verifique que el semiespejo esté bien ubicado, fijo y sin que los tornillos de fijación ejerzan excesiva presión sobre él. Aunque este punto no ofrece dificultades, tenga presente que, si el semiespejo se mueve, habrá que comenzar nuevamente la experiencia.
- d. Ajuste el espejo móvil hasta que las franjas se vean cómodamente (1 ó 2 mm entre franja y franja) (Procedimiento descrito en 4.1.1.).
- e. Lleve el tornillo micrométrico a su extremo de su carrera (por le

ves defectos de paralelismo en el desplazamiento del espejo móvil, puede ser conveniente volver a ajustar su posición).

- f. Anote la lectura del micrómetro (L_i).
- g. Gire muy suavemente el tornillo micrométrico hasta que un cierto número N elegido de franjas hayan pasado frente a una referencia fija elegida.

Luego tome nota de la lectura final L_f del micrómetro.

Como comentario señalamos que si Vd. ha ubicado su espejo ajustable de modo de tener franjas aproximadamente rectas, puede elegir como referencia fija la intersección de los trazos dibujados sobre la superficie esmerilada (f). Alternativamente (por razones de enfoque del ojo, mencionadas en 4.1.4) puede ser conveniente montar un alfiler frente al espejo fijo, o cubrirlo parcialmente con una tarjeta. Por razones de paralaje, puede ser necesario que la cabeza del observador no cambie de posición mientras cuenta.

Es de señalar que si la experiencia está dispuesta para obtener franjas circulares, lo que se observará será que desaparecerán hacia el centro, o brotarán de él y es probable que en un sentido la cuenta le resulte más difícil que en el otro. Realice algún ensayo para encontrar la forma de operar más conveniente.

Para evaluar el número de franjas a contar, considere que el error posible en la cuenta de N franjas no será inferior a una franja. Ello implica que el error relativo nunca será inferior a $: 1/N$. Por lo tanto, N no debe ser muy pequeño. La experiencia muestra, sin embargo, que la idea de que con N muy grande el error relativo podría reducirse tanto como se quiera, es incorrecta, según se desprende del comentario hecho en 4.2.1.1.

Sugerimos tomar $N = 100$.

- h. Repita el procedimiento al menos una vez, y descarte la/s lectura/s si no se termina el desplazamiento dentro de la misma centésima de mm. (Habiendo comenzado en el mismo valor (L_i)). Repita varias veces si prefiere hacer estadística.

- i. Desplace un intervalo elegido (por ejemplo 5 mm) con el tornillo micrométrico y repita (d), (e), (f), (g), (h).

Repita el procedimiento hasta cubrir todo el rango posible del desplazamiento.

- j. Aplique por cada par de valores L_f, L_i la fórmula :

$$f_r = \frac{2 \cdot |(L_f - L_i)|}{N \lambda} \quad (3)$$

obtenida de :

$$f_r = \frac{|\Delta L|}{s} \quad (1)$$

y de :

$$s = \frac{N \lambda}{2} \quad (4)$$

Esta última se deduce del hecho de que, si a partir de una posición dada se desplaza el espejo móvil una distancia : $s = \frac{\lambda}{2}$,

cada franja se habrá corrido hasta ocupar el lugar que antes tenía la franja adyacente. O dicho de otro modo, habrá pasado 1 franja frente a una referencia fija. Cuando sean N las franjas que pasen, tendremos (4) :

$$s = N \frac{\lambda}{2}$$

- k. El diseño de la palanca (i) transmisora del movimiento es tal que f_r debe mantenerse constante en todo el rango del desplazamiento. (Puede Vd. aplicar sus conocimientos de geometría para justificar esta afirmación).

Los valores de f_r determinados según las instrucciones anteriores deberán, por lo tanto, coincidir (dentro del margen de error previsto). Si esto sucede, se los podrá promediar para obtener un único valor.

En caso contrario, debe revisarse la regulación de los tornillos (j), (j'), su ajuste, o la superficie en que apoyan. Eventualmente, podría convenir obtener una curva de calibración, en la que se lea el valor de f_r para las distintas posiciones del micrómetro y no promediar sus valores.

4.2.1.3 Valores obtenidos

Debemos señalar previamente que la apreciación del micrómetro es : $0,01 \text{ mm}$ ($\pm 0,005 \text{ mm}$), pero la extrema sensibilidad del mecanismo induce a leer las posiciones del micrómetro estimando (por interpolación) la milésima de mm .

Los siguientes resultados experimentales muestran que este procedimiento es correcto y que la lectura del micrómetro puede efectuarse con 3 cifras decimales, que resultan perfectamente confiables, dentro de $\pm 0,002 \text{ mm}$ (Tabla n°1)

4.2.1.4 Análisis de resultados

La lectura de la tabla nos indica los siguientes hechos :

- a. Según la columna "c", es correcto leer la milésima de milímetro en el micrómetro. Una lectura cualquiera hecha de este modo no se alejará más de $0,002 \text{ mm}$ del valor medio.
- b. La tanda marcada con *, en la vecindad de $L = 5 \text{ mm}$, muestra una clara irregularidad. En vista de ello se efectuaron más lecturas en esa zona. Se registraron en la tabla sólo las que sobrevivieron al criterio del descarte.

No obstante que la diferencia con lo esperado está por debajo de la apreciación del micrómetro, es clara y previene contra la tentación de atribuir demasiada precisión a las lecturas. Dicha diferencia podría deberse a alguna levísima irregularidad superficial en el apoyo del tornillo (j') - afortunadamente está fuera de la zona de trabajo habitual del instrumento, pero nos sugiere que: podría haber otras irregularidades en la zona de los 10 mm (hay que repasarla pacientemente).

En esta calibración supondremos que no hay otras irregularidades y descartamos las lecturas señaladas con *.

- c. Descartando dichas lecturas, la reducción resulta claramente uniforme en los 25 mm de desplazamiento del tornillo micrométrico y obtenemos por cada 100 franjas :

$$\Delta L = (0,1479 \pm 0,0015) \text{ mm}$$

Nº Franjas corridas (±1°)	Lectura micrómetro (mm)	ΔL (por cada 100 franjas) (mm)	ΔL Promedio	o Desviación cuadrática media	$f_r = \frac{2\Delta L}{N\lambda}$ $= \frac{31,605}{\Delta L}$
100	25,000 24,855	0,145			4,583
100	25,000 24,853	0,147	0,1467	0,0012	4,646
100	25,000 24,852	0,148			4,678
100	20,000 19,850	0,150			4,741
100	20,000 19,852	0,148	0,1483	0,0012	4,678
100	20,000 19,853	0,147			4,646
100	11,000 10,853	0,147			4,646
100	10,853 10,704	0,149			4,709
100	10,704 10,555	0,149	0,1480	0,0009	4,709
100	10,555 10,407	0,148			4,678
100	10,407 10,260	0,147			4,646
Esta tanda se hizo distinta para observar las franjas coloreadas, debidas a la luz ambiente que existía superpuesta al λ ser y para detectar alguna posible irregularidad, dado que ésta es la zona en la que habitualmente se va a trabajar. Según se observa, no se detectaron irregularidades.					
100*	5,000 4,860	0,140			
100*	4,850 4,992	0,142			
100*	4,850 4,990	0,140	0,1407	0,0008	
100*	4,850 4,991	0,141			
100	0,000 -0,150	0,150			4,741
100	0,000 -0,149	0,149	0,1493	0,0005	4,709
100	-0,150 -0,001	0,149			4,709

l_i (mm)	l_f (mm)	$l_f - l_i$	Promedio	Medición con micrómetro Apreciación 0,01 mm
10,915	11,792	0,877		
10,939	11,796	0,857		
10,920	11,790	0,870	0,87 $\pm$ 0,01 (σ)	0,88 mm
10,920	11,803	0,883		
10,920	11,790	0,870		

T A B L A I I I

	Lecturas de igual longi- tud de bra- zos	Igual camino óptico-vidrio atravesado sólo 1 vez	Igual camino óptico-vidrio atravesado ida y vuelta (± 3 franjeas)
	10,910	9,805	8,698
	10,910	9,792	8,698
	10,908	9,783	8,708
		9,790	
Promedio $\pm \sigma$	10,911 $\pm 0,001$	9,792 $\pm 0,008$	8,701 $\pm 0,005$
Diferencias		1,12 $\pm$ 0,01	1,09 $\pm$ 0,01

lo que redondeando da :

$$\Delta L = 0,148 \pm 0,002 \text{ mm}$$

Según se observa, la incerteza porcentual es del 1 %

- d. La incerteza que afecta al número de franjas ($N = 100 \pm 1$ ó 2) es tenida en cuenta en la promediación sobre muchas tandas de m lecturas. Por lo tanto, tomamos los resultados de la estadística sin más consideraciones, pero adoptamos σ (error medio cuadrático de cada lectura) y no $E = \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$ (error medio cuádrático del promedio de tandas de m lecturas) como incerteza de nuestro resultado, ya que E cae muy por debajo de la apreciación del micrómetro y por debajo del 1 % que atribuimos a N - (El 1 % puede ser superado, pero con muchas más precauciones que las que se tomaron en esta determinación).

- e. El promedio de los valores de f_r arroja :

$$f_r = 4,68 \pm 0,05$$

Es decir que el error porcentual es del 1 %.

4.2.2. Determinación de la longitud de onda de la luz monocromática

4.2.2.1 Generalidades

Esta experiencia está íntimamente ligada con la anterior; valen para ella todas las consideraciones hechas en 4.2.1.

Se utiliza la fórmula :

$$\lambda = \frac{2 S}{N} \quad (4')$$

La diferencia con 4.2.1 consiste en que ahora se cuentan N franjas de la luz elegida y se toma como patrón la calibración obtenida previamente del instrumento, con la cual se determina S :

$$S = \frac{|\Delta L|}{f_r} \quad (2)$$

Ambas fórmulas podrían condensarse en :

$$\lambda = \frac{2 |L_f - L_i|}{N f_r} \quad (5)$$

y valen todas las consideraciones anteriores acerca del valor óptimo de N y demás detalles.

2.2 Procedimiento

Siga los pasos (a), (b), (c), (d), (f), (g) y (h) del procedimiento 4.2.1.2. y luego aplique (4') ó (5).

3 Comparación de longitudes de onda

Una de las fuentes de luz monocromática frecuentemente usada en los laboratorios de física es la luz de sodio. Como es sabido la misma no es realmente monocromática sino que posee dos longitudes de onda principales λ_1 y λ_2 muy próximas entre sí, que dan líneas de intensidad apreciable. Si se dispone de una fuente de sodio o similar, es posible comparar ambas longitudes de onda y conociendo el valor de una de ellas determinar el de la otra. Para ello es conveniente igualar previamente los caminos ópticos, obteniendo franjas coloreadas. Si posteriormente se cambia la luz blanca por la de sodio y se desplaza el espejo móvil, se observará que las líneas brillantes (superposición de dos haces de diferentes colores en la posición inicial) se separan gradualmente hasta que, finalmente, aparecerán dos grupos de franjas correspondientes a cada una de las longitudes de onda. Llamando "s" al desplazamiento del espejo necesario para volver a superponer ambos grupos de franjas y suponiendo $\lambda_1 < \lambda_2$ se cumplirá que

$$s = \frac{1}{2} N \lambda_1 = \frac{1}{2} (N-1) \lambda_2 \quad (6)$$

donde N es el número de franjas de desplazamiento más rápido.

La posición del espejo móvil en la que se cumple estrictamente la igualdad anterior, es difícil de fijar con exactitud por lo que es conveniente repetir varias veces la experiencia y promediar los valores de N y s. La relación entre longitudes de onda es

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{N-1}{N} \quad (7)$$

que depende solamente del número de franjas N que atraviesan el campo entre las dos posiciones. La diferencia entre ambas longitudes es

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{2s}{N(N-1)} \quad (8)$$

4.2.4. Medición de índices de refracción

4.2.4.1 Introducción

Determinando el incremento del camino óptico que se origina cuando se interpone una lámina en el recorrido de uno de los haces del interferómetro es posible medir el índice de refracción del material de dicha lámina. Dicho incremento es descrito por la expresión

$$2a (n - 1) \quad (9)$$

donde n es el índice de refracción de la lámina y " a " es su espesor; el factor 2 aparece debido a que la placa es atravesada dos veces por el haz. Para medir este incremento (que es función de la longitud de onda) es necesario determinar las posiciones del espejo móvil en las que se logra coincidencia de caminos ópticos con y sin la placa, lo que implica, en ambos casos, obtener franjas coloreadas y contar el número N de las que atraviesan el campo entre una y otra posición. La igualdad de caminos ópticos para ambos haces, con la lámina interpuesta, estará menos definida que en ausencia de la placa; ello se debe a que el índice de refracción n del material en estudio es distinto para cada color y en consecuencia, si la igualdad de camino óptico para λ_1 se verifica en la lectura L_1 del micrómetro (con la placa interpuesta), para λ_2 se verificará en L_2 ; no habrá ya un lugar en el que se verifica la igualdad de camino óptico - sino toda una zona en la cual alguno de los colores del espectro está en la situación de igualdad de caminos. Puede estimarse el ancho de esa zona teniendo en cuenta que:

- sin la lámina se tendrá igual camino con el micrómetro en L_0 ;
- al interponer la lámina de espesor a se encontrará
 - para λ_1 , igual camino en L_1 , y
 - para λ_2 , igual camino en L_2

Sin embargo según (9) :

$$2 \cdot \frac{1}{f_r} (L_1 - L_0) = 2 a [n(\lambda_1) - 1]$$

$$2 \cdot \frac{1}{f_r} (L_2 - L_0) = 2 a [n(\lambda_2) - 1]$$

Restando ambas expresiones :

$$\frac{1}{f_r} (L_1 - L_2) = a [n(\lambda_1) - n(\lambda_2)]$$

$$\approx \frac{d n}{d \lambda} \Delta \lambda$$

Concluimos que si se ilumina con luz no-monocromática, con longitudes de onda distribuidas en un espectro de ancho $\Delta \lambda$ la zona en la que alguna longitud estará en condiciones de igual camino óptico abarcará un rango ΔL de lecturas del micrómetro :

$$\Delta L = f_r \cdot a \frac{d n}{d \lambda} \Delta \lambda \quad (10)$$

donde $dn/d\lambda$ es una característica del vidrio.

Esta fórmula nos dice que el ensanchamiento de la zona de igual camino óptico es proporcional al espesor del vidrio interpuesto. Además (no lo demostraremos aquí, pero es previsible) las franjas se hacen más palidas, de colores menos definidos y finalmente, si el espesor es suficientemente grande, desaparecerán. Como corolario podemos deducir que en un interferómetro sin placa compensadora, jamás se verían las franjas con luz blanca. A fin de realizar la experiencia se debería tomar como posición del espejo móvil correspondiente a igualdad de caminos ópticos en presencia de la placa, aquella para la cual las franjas observadas corresponden al color de la luz monocromática a usar durante la determinación del número de franjas. Logrado esto se cambia la fuente policromática (luz blanca) por la monocromática; se retira la placa y se desplaza lentamente el espejo móvil hacia la posición de coincidencia previamente determinada, contando el número de franjas que atraviesan el campo visual. La detección de las franjas coloreadas trabajando con luz monocromática se lleva a cabo disponiendo una fuente policromática detrás de la monocromática de manera que ilumine la pantalla translúcida

sin impedir la determinación del número de franjas. Obtenido así el incremento de camino óptico, se verifica que

$$2a (n - 1) = \lambda N = 2S \quad (11)$$

de donde

$$n = \frac{N}{2a} \lambda + 1 \quad (12)$$

donde "a" debe medirse cuidadosamente. Como la posición del espejo móvil correspondiente a iguales caminos ópticos es difícil de determinar con precisión, es conveniente repetir el proceso varias veces y promediar los valores de N.

Resulta ventajoso emplear placas cuyos espesores no sean superiores al milímetro, pues se evitan así las dificultades en la determinación del número de franjas, cuando el recorrido del espejo móvil es muy grande. Si la placa utilizada cubre parcialmente el campo visual, desplazando lateralmente el ojo es posible ver dos imágenes de la misma: una reflejada en el semiespejo en primer plano y la otra reflejada en el espejo móvil (cubierta parcialmente por la primera). Sobre esta última imagen pueden observarse franjas con luz policromática, cuando el recorrido del espejo móvil sea la mitad del correspondiente a las dos posiciones de equidistancia. Esta tercera posición puede emplearse en la determinación de n. Presenta la ventaja de reducir a la mitad el número de franjas a contar y el inconveniente del reducido espacio donde se observan las franjas. En este caso el aumento del camino óptico se reduce a la mitad del caso anterior y

$$n = \frac{N}{a} \lambda + 1 \quad (12')$$

Desde un punto de vista operativo es prácticamente imposible contar las $N=1600$ franjas que corresponden a un vidrio de 1 mm de espesor. Además de la dificultad para contarlas, no se puede saber en qué lugar se produce la igualdad de camino óptico con el vidrio interpuesto, a menos que se use luz blanca; pero con luz blanca, por

el efecto mencionado de variación del índice de refracción con la longitud de onda, resultará que la zona de observación de las franjas coloreadas será mucho más ancha - habrá mayor cantidad de franjas, mas tenues, de colores menos definidos, y ya no se distinguirá cual es la franja blanca. Este efecto aumenta con el espesor del vidrio, por lo cual la gran precisión del método se habrá perdido.

Se sugiere entonces una modificación del procedimiento, que tiene las mismas limitaciones, pero mucha mas rapidez y sencillez, a saber :

- a. Utilice directamente luz blanca.
- b. No cuente las franjas : busque las posiciones de igual camino óptico y obtenga las correspondientes lecturas del tornillo micrométrico.
- c. Utilice (2) y (9) :

$$S = \frac{|\Delta L|}{f_r} \quad (2)$$

$$2 S = 2 a (n-1) \quad (9)$$

Quedará :

$$n = \frac{S}{a} + 1 \quad (13)$$

O bien:

$$n = \frac{|\Delta L|}{a \cdot f_r} + 1 \quad (14)$$

para hacer que atraviesen dos veces la lámina, y :

$$n = \frac{2 S}{a} + 1 \quad (13')$$

o bien :

$$n = \frac{2 |\Delta L|}{a \cdot f_r} + 1 \quad (14')$$

para hacer que la atraviesen una sola vez.

2.4.2 Una aplicación : espesores del orden de 1 mm

- a. Seleccionar el vidrio. Sugerimos un portaobjetos de microscopio. Mida cuidadosamente el espesor del vidrio. Verifique que sea uniforme. Si no lo es, seleccione una zona del mismo y mida el espesor allí.

Le sugerimos efectuar la medición con el mismo tornillo micrométrico del interferómetro, con el procedimiento siguiente:

- I. Disponga su interferómetro con la fuente de luz blanca. Ubique las franjas coloreadas según procedimiento 4.1.3. y regule los tornillos hasta que la franja central blanca coincida con alguna referencia determinada. Anote el valor de la lectura L_i del tornillo micrométrico.
 - II. Con muchísimo cuidado introduzca el vidrio entre el palpador del micrómetro y el tornillo de apoyo del brazo basculante. Luego retroceda el micrómetro hasta que aparezcan las franjas y la franja blanca ocupe el mismo lugar anterior. Anote la lectura L_f .
 - III. Nuevamente, con muchísimo cuidado, retire el vidrio, ubique la franja blanca y verifique que se reproduzca la lectura L_i hasta la misma centésima. En caso contrario, algo se ha movido y debe repetirse todo el procedimiento.
 - IV. Repita varias veces el procedimiento si desea hacer estadística.
- b. Sujete el vidrio por medio de una banda elástica o cinta adhesiva sobre el espejo fijo, de modo que cubra sólo la mitad del mismo.
- c. Ubique las franjas coloreadas en la mitad del campo visual que ha quedado libre (deben estar cerca de L_i). Regule el espejo móvil hasta que las franjas sean aproximadamente perpendiculares al borde del vidrio y estén razonablemente separadas.

Desplace ahora el espejo móvil hasta que las franjas vuelvan a aparecer, pero en la mitad cubierta por la placa de vidrio. Seguramente estarán muy distorsionadas, y será necesario buscar una regulación de compromiso en la inclinación del espejo móvil.

- d. Efectúe varias lecturas de la posición del micrómetro con la franja central blanca en la referencia elegida, alternativamente en una mitad y otra del campo visual. Notará la dificultad para decidir cual es la franja central a través del vidrio.

Pueden registrarse las lecturas cuando, en el bordecito del vidrio, aparecen las franjas debidas a la luz que lo atraviesa una sola vez.

- e. Obtenga las diferencias, su promedio y finalmente n , con (13), (14), (13') ó (14').

4.2.4.2.2 Resultados experimentales

La medición del espesor, con micrómetro indicó que el mismo variaba desde 0,70 a 0,90 mm. Debido a ello, se decidió presentar el vidrio en el lugar en que iba a colocarse, se eligió la zona que se iba a trabajar y se midió el espesor allí, con el procedimiento descrito en 4.2.4.2.1. a. y luego con micrómetro para verificar los resultados. (Ver Tabla II)

Las lecturas correspondientes a los pasos d. y e. del procedimiento fueron las indicadas (Tabla III).

Se decidió descartar la columna central de los datos (Tabla III) pues contribuye a aumentar el error.

En consecuencia y con los promedios de las lecturas extremas solamente se obtiene :

$$\Delta L = 10,911 - 8,701 = (2,210 \pm 0,006) \text{ mm}$$

Note que el error porcentual es del 0,3 % pues se suman los errores absolutos.

El desplazamiento correspondiente del espejo móvil es :

$$S = \frac{\Delta L}{f_r} = \frac{2,210 (0,3\%)}{4,68 (1\%)} = (0,473 \pm 0,007) \text{ mm}$$

Note que en este último caso se suman aquí los errores relativos resultando un error porcentual del 1,5 %.

Finalmente, según (13) :

$$\eta = \frac{0,473 (1,5\%)}{0,88 (1\%)} + 1$$

$$= (0,537 \pm 0,015) + 1 =$$

$$= 1,537 \pm 0,015 = 1,54 \pm 0,02$$

El error absoluto 0,015 surge de sumar los errores relativos 1,5% y 1 %, calcular el 2,5 % de 0,537 y redondear.

4.2.4.2.3 Análisis de resultados

A modo de verificación, a la misma placa de vidrio se le midió el ángulo de Brewster para la longitud de onda del láser He-Ne y se obtuvo:

$$\eta_{\lambda_{\text{He-Ne}}} = \arctg (56,8 \pm 0,7) = 1,53 \pm 0,04$$

Ambos resultados concuerdan perfectamente dentro de su margen de error. No obstante, la medición primera, con el interferómetro, fue hecha con luz blanca y se la supone un promedio de los valores del índice de refracción sobre las distintas longitudes de onda del espectro visible.

En cambio : $\eta_{\lambda_{\text{He-Ne}}}$ es el valor en el extremo rojo del espectro y es razonable que sea menor, con lo cual la similitud de ambos resultados es aún mayor.

Consultas con una tabla nos muestran valores típicos de la variación de η con λ tales como :

$\Delta\eta \approx 0,01$ por cada 1000 Å de variación. Como hay $\approx 1000\text{Å}$ del rojo al centro del espectro, 0,01 es la disminución que cabe esperar en η . Queda por debajo de los errores experimentales cometidos. Esta diferencia está por debajo de las incertezas de la experiencia. La diferencia entre los dos valores obtenidos se debe más probablemente a errores experimentales.

.2.4.3. Otra aplicación : espesores del orden de 10^{-2} mm

.2.4.3.1 Procedimiento

- a. Corte una tira delgada de un material transparente, tal como celofán, (de un cm de ancho). Cuide que esté en buen estado y mida el espesor con el tornillo micrométrico del interferómetro, utilizando el método descrito en 4.2.4.2.1. pero iluminando con el láser (o fuente monocromática equivalente), superpuesto a la luz ambiente. Para esta determinación cuente directamente el número de franjas (monocromáticas) que quedan entre la posición de la franja central cuando el celofán está interpuesto en el extremo del palpador y la posición de la misma cuando no lo está.

Note que para esta medición hay que ajustar la inclinación del espejo móvil para que el desplazamiento de las franjas esté dentro del campo visual cuando se retira (muy suavemente) el celofán.

- b. Sujete suavemente el celofán sobre el soporte del espejo móvil (con cinta adhesiva o banda elástica) cuidando de que quede lo más liso y plano posible, y obstruya aproximadamente la mitad del campo visual.
- c. Ubique las franjas coloreadas según se ha descrito en 4.2.4.2.1. pero ahora con la luz del láser superpuesta a la luz blanca natural.
- d. Desplace suavemente el espejo móvil con el tornillo micrométrico mientras cuenta las franjas de luz monocromática que pasan por la referencia elegida desde que la franja blanca está en la referencia, en la mitad del campo, hasta que llega al mismo punto en la otra mitad del campo. Repita varias veces y promedie sus lecturas, como en los casos anteriores.
- e. Calcule η con la expresión siguiente :

$$\eta = \frac{N}{N_1 f_r} + 1 \quad (15)$$

donde N son las franjas correspondientes al punto d. (diferencia de camino óptico con el celofán interpuesto o sin él) y N_1 son las que corresponden al punto a (medición del espesor del celofán).

La fórmula se obtuvo de :

$$\eta = \frac{N \lambda}{2a} + 1 \quad (12)$$

pero ahora el espesor a se sustituye en función de N_1 :

$$a = \left(\frac{N_1 \cdot \lambda}{2} \right) \cdot f_r$$

donde el primer factor es el desplazamiento s del espejo móvil mientras el extremo del palpador se desplaza una distancia S' (espesor del celofán).

4.2.4.3.2 Resultados experimentales

a. Medición del espesor:

$$N_1 = (13 \pm 1) \text{ franjas}$$

El error es del 8 %.

El valor del espesor es :

$$\begin{aligned} a &= \frac{N_1 \times \lambda}{2} f_r = \\ &= \frac{13 \times 0,6328 \times 10^{-3}}{2} \times 4,68 = \\ &= (0,019 \pm 0,002) \text{ mm} \end{aligned}$$

En medición directa con micrómetro de apreciación 0,01 mm se encontró :

$$a = 0,02 \text{ mm}$$

d. Aumento de camino óptico al atravesar la luz al celofán ida y vuelta :

$$N = (35 \pm 2) \text{ franjas}$$

El error es del 6 %.

e. Resultado obtenido aplicando (15) :

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{35}{13(8\%) \times 4,68(1\%)} + 1 = \\ &= (0,575 \pm 0,086) + 1 = \\ &= 1,57 \pm 0,09 = 1,6 \pm 0,1 \end{aligned}$$

El valor de incerteta se obtuvo sumando las incertezas porcentuales $(6+8+1) = 15\%$ y calculando el 15% de $0,575$. Resulta un error porcentual de la medición del 6% .

4.2.5 Medición de pequeños espesores

Desde el punto de vista operativo, esta experiencia es idéntica a la anterior. Difiere en que en este caso debe conocerse el índice de refracción n del material cuyo espesor se desea evaluar. Para realizar la determinación, se mide el aumento del camino óptico debido a la lámina y se obtiene el espesor buscando a partir de la expresión

$$a = \frac{N \lambda}{2 (n-1)} \quad (16)$$

válida para haces que atraviesan dos veces la lámina, o bien :

$$a = \frac{N \lambda}{(n-1)} \quad (17)$$

válida para haces que la atraviesan sólo una vez. Las expresiones (16) y (17) han sido deducidas de las (12) y (12').

Este equipo permite, adquiriendo o construyendo algunos accesorios, realizar diversas experiencias entre las que hemos seleccionado las que se describen someramente a continuación.

4.3.1 Determinación de uniformidad de espesores

La diferencia de camino óptico a que da lugar una placa transparente es función del espesor y del índice de refracción de la misma. Si ambos parámetros son constantes en toda la placa y las caras son planas, las franjas observadas con y sin placa deben presentar un aspecto similar variando sólo el ancho y la orientación de las mismas.

Basándose en estas consideraciones, es posible verificar la uniformidad del espesor de una placa observando la deformación de las franjas que se produce al introducirle en el camino de uno de los haces (debe obviamente asegurarse por algún otro método la homogeneidad del índice de refracción, ya que es muy difícil poder separar los efectos de las irregularidades superficiales y de las variaciones de índice de refracción en observaciones por transmisión a través de placas).

4.3.2 Determinación de irregularidades superficiales

Un método para determinar irregularidades superficiales es el de lograr franjas de interferencia por reflexión de uno de los haces sobre la cara de la placa a investigar. Este método presenta dificultades debido a la intensidad sumamente débil de las franjas observadas. Una forma de salvar estos inconvenientes es especular la superficie. De esta última manera es posible investigar irregularidades de cualquier superficie.

Si la irregularidad es muy localizada de manera que pueda contarse el número de franjas en que modifica el camino óptico, podrá estimarse el defecto de planitud de la superficie. El sentido del defecto

(concavidad o convexidad) se conoce comparando la velocidad de las franjas en la zona irregular respecto a las franjas en la zona plana.

3.3 Determinación de heterogeneidades en sólidos transparentes

Para realizar esta experiencia debe verificarse previamente la planitud de las caras de la placa transparente. La observación y localización de heterogeneidad del material (cambios en el valor del índice de refracción) se realiza observando franjas de interferencia por transmisión del haz a través de la placa. Las variaciones de índice pueden determinarse, en el caso de heterogeneidades muy localizadas, tal como se describió en la experiencia anterior.

3.4 Observación de una distribución de esfuerzos

Un material transparente no extremadamente rígido sometido a esfuerzo, se verá afectado por variaciones de su densidad. A estas variaciones de la densidad corresponden variaciones del índice de refracción del material, lo que produce cambios en la forma de las franjas de interferencia.

Este hecho puede emplearse para observar la distribución de esfuerzos dentro de un modelo.

3.5 Medición del índice de refracción de un gas

Desde el punto de vista operativo, esta experiencia es también similar a las precedentes, pero con la ventaja respecto a igual determinación en un sólido, de que el gas es introducido gradualmente en el camino de uno de los haces, evitándose de esta manera el desplazamiento brusco de las franjas de interferencia.

La segunda diferencia entre esta determinación y las anteriores está dada por la forma de contar franjas. En este caso se ilumina con luz monocromática, se quita el aire de la celda de vacío (10^{-4} a 10^{-5} atm.) y se obtiene franjas coloreadas. Se cambia la fuente de luz blanca por luz monocromática y dejando entrar lentamente el gas cuyo índice se desea conocer, se cuenta el número de franjas que atraviesan el campo. El número de franjas contadas permite conocer el incremento de camino óptico debido al

gas introducido en la cámara de vacío sin necesidad de desplazar el espejo móvil.

Los índices obtenidos de esta manera están referidos al vacío, mientras que los obtenidos con sólidos lo están con respecto al aire. Como en las experiencias anteriores se utiliza la relación (12), siendo en este caso "a" la distancia entre las caras internas de la celda de vacío.