



GRADO EN FÍSICA

LABORATORIO DE FÍSICA III

CURSO 2015-2016 1^{er} CUATRIMESTRE

LABORATORIO DE ÓPTICA

PRÁCTICA: Interferómetro de Michelson

1. Objetivos:

- Medida de distancias usando la interferencia con luz blanca
- Estimación de la longitud de coherencia de una fuente de luz blanca
- Medida de índices de refracción de láminas plano paralelas usando la interferencia con luz blanca

2. Fundamentos físicos:

Los interferómetros son dispositivos utilizados para observar la interferencia de la luz. De la interferencia se pueden extraer propiedades y características de la luz como su espectro de emisión, grados de polarización y coherencia, así como las propiedades ópticas del medio material que atraviesa. También se utilizan para medir distancias con una precisión superior a una fracción de la longitud de onda. Los interferómetros dividen un haz de luz en dos partes que posteriormente son recombinadas. Si los dos haces recombinados se solapan en el espacio y el tiempo adecuadamente, observaremos un patrón de franjas de interferencia.

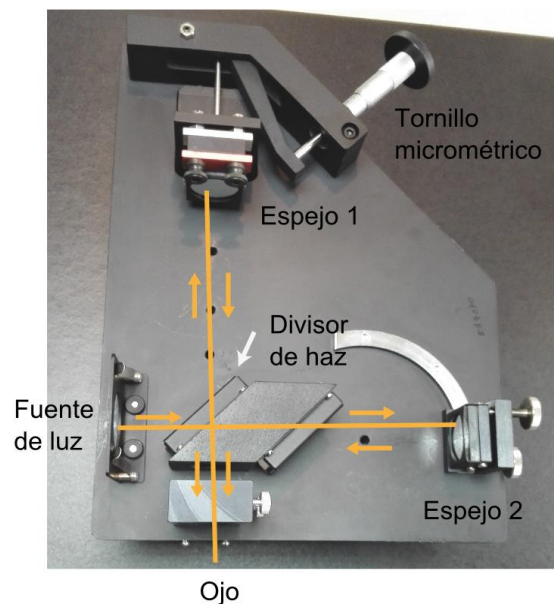
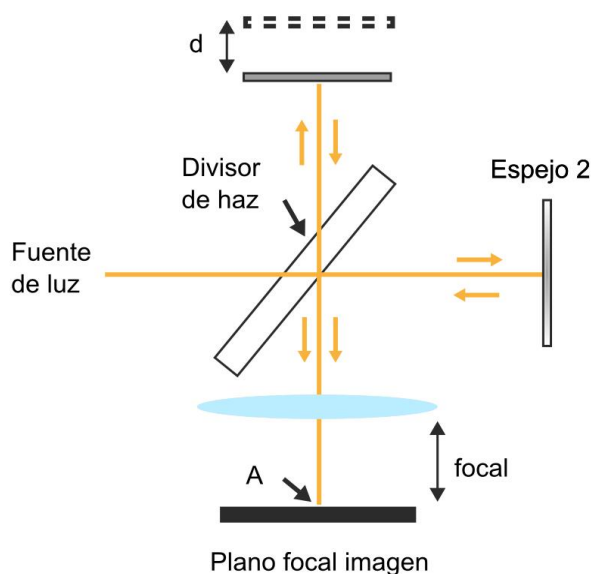


Figura 1. Esquema del interferómetro de Michelson representado esquemáticamente y una fotografía del interferómetro utilizado en el laboratorio.

En la Fig. 1 se muestra el interferómetro de Michelson que se va a utilizar en esta práctica. Una fuente de luz ilumina el separador de haz que divide el haz incidente en dos iguales, propagándose perpendicularmente entre sí. Los dos haces se reflejan en sendos espejos que, al volver a incidir en el separador de haz, se recombinan propagándose solapados en la misma dirección. El patrón de interferencias se observa en el plano focal imagen de una lente convergente. La intensidad I en función de la longitud de onda λ , evaluada en el centro de la figura de interferencia (Punto A sobre el eje óptico del sistema) es:

$$I(\lambda, d) = I_1(\lambda) + I_2(\lambda) - 2\sqrt{I_1(\lambda) I_2(\lambda)} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} d\right), \quad (1)$$

donde d es la diferencia de longitudes de los dos brazos del interferómetro e $I_1(\lambda)$, $I_2(\lambda)$ son las intensidades que provienen de cada brazo del interferómetro. El signo del término con coseno es negativo debido a un desfase π entre los dos haces que interfieren como consecuencia de que uno de ellos se refleja en el divisor de haz en su cara interna, mientras que el otro lo hace en su cara externa. Si la fuente de luz es policromática, la intensidad total en el plano focal será la suma (integral) de las intensidades correspondientes a cada longitud de onda λ del espectro. Para una posición fija del interferómetro, $d=\text{cte}$, cada longitud de onda contribuye a la intensidad total con un valor diferente dado por la ecuación (1). Así, el espectro en el Punto A es una función oscilante en λ , cuya oscilación depende de d . En particular, las longitudes de onda que contribuyen a la intensidad total con un mínimo son aquellas que hacen que el argumento del coseno sea un múltiplo m de 2π , y satisfacen:

$$d = m \frac{\lambda}{2}. \quad (2)$$

El parámetro m es el *orden interferencial*. Cuando $d=0$ los caminos ópticos son iguales y se dice que estamos en *contacto óptico*. En esta posición el orden interferencial toma el valor mínimo posible, $m=0$, por lo que todas las longitudes de onda producen un mínimo de intensidad. Para cualquier otro valor $d \neq 0$ existirán varias longitudes de onda, con *órdenes interferenciales* diferentes, que producirán un mínimo de intensidad. En el apartado 4.a mediremos precisamente estas longitudes de onda para determinar la distancia d entre los brazos del interferómetro cuando éste es iluminado con luz blanca.

El análisis interferencial también se puede realizar considerando la dependencia temporal de los campos. Así, una fuente de luz blanca se puede considerar formada por la superposición de trenes de onda de duración muy corta. La duración temporal en la que el tren de ondas tiene bien definida la oscilación del campo es el tiempo de coherencia. Teniendo en cuenta que la luz se propaga en aire a la velocidad c , al tiempo de coherencia τ le corresponde una longitud de coherencia dada por $s=c\tau$. Para que se pueda observar interferencia con luz blanca es necesario que la diferencia de camino óptico entre los dos brazos del interferómetro ($2d$) sea menor que la longitud de coherencia, es decir $s > 2d$. De esta forma el tren de ondas que emerge de la fuente de luz se combina consigo mismo en el plano de observación, asegurando una relación de fases entre los dos campos que interfieren definida y constante en el tiempo. Esto da lugar a un patrón de franjas de interferencia estable. Existe una relación entre la longitud de coherencia y el espectro de la fuente de luz, que aproximadamente [2] viene dada por:

$$s \sim \frac{\bar{\lambda}^2}{\Delta\lambda}, \quad (3)$$

donde $\bar{\lambda}$ es la longitud de onda media del espectro y $\Delta\lambda$ la anchura espectral de la fuente de luz. Si se ilumina con luz blanca, $\bar{\lambda} = 575 \text{ nm}$ y $\Delta\lambda = 350 \text{ nm}$, se obtiene una longitud de coherencia $s = 1 \mu\text{m}$ muy pequeña. El valor de s nos da una idea de lo próximo que debemos situar el espejo 1 de su posición de *contacto óptico*, $d=0$, para que se cumpla la condición $s > 2d$ y poder observar la interferencia. En el apartado 4.b estimaremos el espectro de una fuente de luz blanca midiendo su longitud de coherencia. Posteriormente utilizaremos esta propiedad para medir el índice de refracción de una lámina dieléctrica, apartado 4.c.

3. Método experimental:

Para hacer los experimentos con luz blanca es necesario, en primer lugar, alinear el sistema y, en segundo lugar, encontrar la posición de *contacto óptico*, ya que la interferencia será apreciable únicamente alrededor de esta posición.

3.1 Alineación del sistema:

La forma más sencilla para alinear el sistema es utilizar una fuente de luz de elevada longitud de coherencia. Así, iluminamos el interferómetro con la Lámpara de Na. En el montaje experimental, Fig. 1, la lente y el plano focal imagen donde se realiza la observación serán, respectivamente, la combinación cornea-cristalino y la retina de nuestro ojo. El Espejo 2 dispone de dos tornillos (en su cara posterior) para variar su orientación hasta conseguir la alineación del sistema. Observando en la dirección del Espejo 1 veremos la superficie de la lámpara de Na enfocada sobre nuestra retina. Observaremos 2 imágenes, cada una de ellas ha seguido un camino óptico en el interferómetro. El interferómetro está alineado cuando los espejos 1 y 2 son perpendiculares entre sí, o lo que es lo mismo, cuando las 2 imágenes de la lámpara de Na se solapan. Cuando esto sucede, veremos una única imagen afectada de un patrón de franjas de interferencia. En principio la orientación de las franjas es arbitraria, indicando que si bien estamos próximos a la alineación, todavía no lo hemos conseguido. En este punto introducimos un difusor (una hoja de papel) entre la fuente de luz y el separador de haz. El difusor actúa como una nueva fuente de luz de extensión mucho mayor que la abertura de la lámpara de Na. Así, aumentamos el campo de visión pudiendo observar máximos y mínimos de interferencia más alejados del centro. Lo que resta es variar la orientación del espejo 2 finamente en el sentido en el que las franjas de interferencia se vuelven anillos concéntricos. Cuando esto sucede el interferómetro está alineado y, por simetría, es invariante bajo rotaciones alrededor del eje óptico del sistema (de ahí la simetría del patrón de franjas de interferencia). Es importante notar que una vez que está alineado el sistema, nuestro ojo enfoca automáticamente al infinito para maximizar el contraste de las franjas de interferencia y por tanto la observación se realiza en el plano focal imagen de la lente de nuestro ojo, como se muestra en la Fig. 1.

El Espejo 1 se puede desplazar sobre el eje óptico del sistema utilizando un tornillo micrométrico. De esta forma se varía d . El Espejo 1 está dispuesto en un dispositivo en el que EL MOVIMIENTO EFECTIVO ES LA QUINTA PARTE DEL DESPLAZAMIENTO DEL TORNILLO. Esta corrección se tendrá que tener en cuenta sistemáticamente a lo largo de la práctica en todos los cálculos que se realicen.

3.2 Contacto óptico:

Encontrar la posición de *contacto óptico* es una labor tediosa pero muy satisfactoria cuando se consigue. Para ello hay que seguir los siguientes pasos:

1. Utilizamos la lámpara de Na. Una vez alineado el sistema desplazamos el Espejo 1 en el sentido en el que el tamaño de los anillos crece, hasta que lleguemos a una posición d en la que los máximos de intensidad ocupan todo el campo de visión (periodo de los anillos muy grande). Estamos próximos a *contacto óptico*. Desalineamos ligeramente el sistema con el Espejo 2 hasta observar franjas de interferencia lo más verticales posible. Si seguimos desplazando el Espejo 1 en el mismo sentido veremos que la orientación de las franjas varía de ligeramente curvadas, a franjas verticales paralelas y finalmente a franjas curvadas en el sentido contrario. Este cambio de curvatura indica que hemos sobrepasado el *contacto óptico*, situándose éste exactamente en la posición en la que las franjas son perfectamente verticales. Como esta posición es muy difícil de estimar conviene sobrepasarla para asegurarnos que un desplazamiento del Espejo 1 en el sentido contrario alcanzará en algún momento el *contacto óptico*.
2. Para hallar la posición exacta de *contacto óptico*, sustituimos la lámpara de Na por la fuente de luz blanca y desplazamos el Espejo 1 muy lentamente en el sentido contrario con el fin de alcanzar el *contacto óptico*. Cuando esto sucede aparece un patrón de franjas de interferencia de colores con orientación vertical. Finalmente volvemos a alinear el Espejo 2 hasta que cada color del patrón de franjas ocupe todo el campo de visión.

3.3 Medida de distancias usando la interferencia con luz blanca

Una vez el sistema está alineado y en *contacto óptico*, introducimos la lente convergente a la salida del interferómetro y situamos una pantalla (papel) en su plano focal imagen. Observamos franjas del mismo color que cuando hicimos la medida a ojo. Una variación ligera de d cambia los colores observados sobre la pantalla. Para determinar el espectro a la salida del interferómetro disponemos el extremo de la fibra óptica del espectrómetro en el centro de la pantalla y observamos la gráfica del espectro en la pantalla del ordenador en función de λ . El espectro viene afectado de una oscilación dada por la ecuación (1). Debe contestar lo indicado en la Plantilla.

3.4 Medida de la longitud de coherencia de una fuente de luz blanca

Para resolver este apartado debe disponer el interferómetro en *contacto óptico*. Retire el espectrómetro y la lente convergente del experimento y haga las observaciones a ojo. Si desplaza el Espejo 1 observará que a partir de una cierta distancia desaparece la interferencia (se dejan de ver colores). La longitud de coherencia de la fuente de luz se puede estimar considerando el rango d en el que se observa interferencia. Debe contestar lo indicado en la Plantilla.

3.5 Medida de índices de refracción de láminas usando la interferencia de luz blanca

Introduzca la lámina de vidrio en uno de los brazos del interferómetro. Observará que la interferencia ha desaparecido ya que la lámina de vidrio tiene un índice de refracción distinto del aire, por lo que ha aumentado el camino óptico en ese brazo del interferómetro. Para encontrar el nuevo *contacto óptico*, tendrá que desplazar el Espejo 1 en el sentido que compense el camino óptico extra introducido por el

vidrio. Si a ese desplazamiento, medido desde la posición de *contacto óptico* sin vidrio, le llamamos x , se cumple aproximadamente que:

$$x = (n - 1)L \quad (4)$$

donde n es el índice de refracción del medio. Debe contestar lo indicado en la Plantilla.

4. Bibliografía:

- [1] [Optics](#), A. Ghatak, Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2010. pp: 216
- [2] [Óptica](#), J. Casas, Zaragoza: Librería Pons, 1994. pp: 317-320.
- [3] [Optics](#), A. Ghatak, Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2010. pp: 131-137

Plantilla

El informe de esta práctica debe contener única y exclusivamente las respuestas solicitadas en esta plantilla. En esta plantilla no debe calcular las incertidumbres de los resultados

Medida de distancias utilizando la interferencia con luz blanca

En posición cercana a contacto óptico:

- Tape uno de los brazos del interferómetro, ¿desaparece la oscilación del espectro? ¿Qué representa la gráfica que observa?
- Demuestre teóricamente a partir de ecuación (1) que la representación del espectro en función de v es una función de periodo constante.
- Especifique clara y brevemente el procedimiento experimental para medir la distancia d a partir de los resultados obtenidos con el espectrómetro cuando opera en frecuencias.
- Estime la distancia d para 3 posiciones distintas del tornillo micrométrico y compárelas con los resultados obtenidos midiendo directamente sobre el tornillo micrométrico. ¿Qué método es más preciso a la hora de determinar distancias?

Estimación de la longitud de coherencia de una fuente de luz blanca

- Especifique clara y brevemente el procedimiento experimental para determinar la longitud de coherencia s de la fuente de luz. Estime la longitud de coherencia.
- A partir de la ecuación (3) estime la anchura espectral de la fuente de luz. ¿Coincide aproximadamente con el espectro medido en el apartado 4.a cuando se bloqueaba uno de los brazos del espectrómetro?

Medida de espesores e índices de refracción de láminas usando la interferencia de luz blanca

Introduzca la lámina de vidrio de espesor $L=1\text{mm}$ en uno de los brazos del interferómetro:

- Especifique clara y brevemente el procedimiento para encontrar el valor del índice de refracción medio del vidrio.

En todos los apartados debe exponer los resultados de todas las medidas realizadas y el resultado final. Debe añadir aquí algo que haya observado o ideado y que no esté incluido en lo anterior

Fenómenos interesantes para los curiosos

En este apartado no se evaluarán las preguntas solicitadas

- Introduzca una lámina de vidrio en uno de los brazos del interferómetro y encuentre el *contacto óptico*. Mida el espectro alrededor de esta posición. ¿El periodo de la oscilación representada en frecuencias es contante?
- Introduzca la lámina de vidrio de espesor $L = 1\text{mm}$ **entre la fuente de luz y el separador de haz**, ver Fig. 1(a). ¿Ha variado la longitud de coherencia de la fuente de luz respecto del caso sin lámina? Intente dar una respuesta, si no la encuentra consulte con su profesor de laboratorio.

5. Quiero saber más

El interferómetro de Michelson se utilizó para demostrar la no existencia del éter en el experimento conocido como de **Michelson-Morley**. Por estos descubrimientos se le otorgó el premio Nobel de física en 1907. Demostró que la luz no necesita un soporte material (el éter) para su propagación, lo cual desembocó en la teoría de la relatividad especial de Einstein. Este experimento está considerado como uno de los más importantes de la física porque suministró la evidencia experimental para una nueva concepción de las leyes de la Naturaleza.

http://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Michelson_y_Morley

<http://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/10/posts/el-viento-del-ter-lumifero-y-el-experimento-de-michelson-morley-10195>

El interferómetro de Michelson tiene actualmente multitud de aplicaciones. Destacamos las tres siguientes:

1) **Medidas de ondas gravitacionales.** Las ondas gravitacionales fueron predichas por Albert Einstein en 1916. Son ondulaciones del espacio-tiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Se generan por acontecimientos muy distantes y antiguos, como la colisión de dos estrellas de neutrones o agujeros negros, por lo que esas ondas causan movimientos relativos, extremadamente pequeños, de los objetos. Para detectar las ondas gravitacionales es necesario utilizar instrumentos capaces de medir distancias con una precisión muy elevada, como el interferómetro de Michelson. Se han desarrollado los siguientes interferómetros de Michelson aplicados a la detección de ondas gravitacionales: LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory: <http://www.ligo.caltech.edu/>) y VIRGO (<http://www.ego-gw.it/public/about/whatis.aspx>).

En este enlace aparece un resumen de los descubrimientos relacionados con las ondas gravitacionales: <http://www.nature.com/news/b-mode-1.14884> y en este otro <http://www.nature.com/news/no-evidence-for-or-against-gravitational-waves-1.15322> se hace una discusión sobre la evidencia o no del descubrimiento de las ondas gravitacionales.

2) **Interferometría espectral.** La interferometría espectral es una técnica utilizada para medir la fase relativa asociada a cada longitud de onda del espectro de la luz (*fase espectral*). Para ello se utiliza un interferómetro de Michelson y se mide el espectro a la salida del mismo. El conocimiento de la *fase espectral* permite determinar la forma y duración temporal de los pulsos de luz. De hecho, se ha utilizado para detectar y caracterizar pulsos ultracortos del orden de cientos de attosegundos (10^{-18} s) de duración, que son los eventos más cortos generados por el ser humano.

http://en.wikipedia.org/wiki/Ultrashort_pulse

http://www.venteon.com/four_SPIDER.php

Avanzado: <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=3131649&fileId=3158837>

3) **Tomografía por coherencia óptica** (Optical Coherence Tomography, OCT). Es una técnica de imagen médica que utiliza fuentes de luz blanca para realizar tomografía 3D de objetos microscópicos con resolución de la fracción de la micra. Se pueden visualizar tejidos, células, dispositivos ópticos, etc, en tres dimensiones.

http://es.wikipedia.org/wiki/Tomograf%C3%ADa_de_coherencia_%C3%B3ptica

<http://www.zmpbmt.meduniwien.ac.at/index.php?id=327>