

DOBLETE DE SODIO

Laboratorio 4 de Física Moderna
Fecha de realización: 19 de Mayo de 2017.
Fecha de entrega: 29 de Mayo de 2017.

Resumen:

Se midió la separación de las líneas amarillas del doblete de Sodio utilizando el interferómetro de Michelson. En primer lugar, se utilizó una lámpara de Mercurio para encontrar el factor de reducción, de manera que sea posible calibrar el interferómetro, calculando una constante de proporcionalidad que relaciona la distancia efectiva entre los espejos, y distancia desplazada por el micrómetro, lo cual resultó $0,22 \pm 0,04$. Luego, utilizando una lámpara de Sodio (con el interferómetro ya calibrado) se midió la separación entre dos franjas amarillas del espectro, moviendo el tornillo del micrómetro, de manera que se desplace el espejo superior, hasta observar una condición mínima de visibilidad de las franjas. El resultado para $\Delta\lambda_{exp} = (5,6 \pm 0,9) \cdot 10^{-10} \text{ m}$, con un error relativo porcentual de 6,2 % con respecto al valor de literatura $\Delta\lambda = 0,597 \cdot 10^{-10} \text{ m}$. El error se encuentra dentro de lo esperado por los errores aleatorios del experimento, el cual proviene principalmente del error que resulta del micrómetro.

1. INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO

La interferencia de ondas es el proceso mediante el cual dos o más ondas de la misma naturaleza (mecánica o electromagnética) se combinan para originar una nueva onda, cuya amplitud es la suma vectorial de las amplitudes de las ondas que interfieren. Dependiendo de las características que tengan las ondas se pueden distinguir dos tipos de interferencias; la constructiva, que se produce cuando las ondas que chocan están en fases, obteniendo así una onda de mayor amplitud, y tipo destructiva, las cuales corresponden a cuando las ondas que chocan están en desfase, obteniendo una onda de menor amplitud. Para observar interferencias con ondas generadas por átomos o moléculas excitadas, es necesario utilizar una fuente única y desdoblar la luz esta fuente en partes que puedan recombinarse. En este caso, los cambios de amplitud y fase ocurren simultáneamente en cada parte y en el mismo tiempo. Los interferómetros corresponden a instrumentos ópticos que emplean la interferencia de las ondas de luz para medir con mayor precisión longitudes de onda de ésta. Hay muchos tipos de interferómetros, en todos ellos se utilizan dos haces de luz que recorren dos trayectorias ópticas distintas, determinadas por un sistema generalmente de espejos y prismas que, finalmente, convergen para formar un patrón de interferencia.

En la experiencia de laboratorio, se utilizará un interferómetro de Michelson¹, para poder medir la separación entre las dos líneas de espectro del doblete

del Sodio. El espectro óptico del sodio consiste en algunos pares de líneas llamados dobletes. La separación entre los longitudes de onda de cada línea de un doblete es muy pequeña debido a que la energía de una línea espectral se determina por la diferencia entre el nivel de energía inicial y el nivel de energía final de la transición del electrón en el átomo, entonces se postula que existen dos niveles de energía iniciales (doblete) con valores muy cercanos en el átomo de sodio. De hecho, las diferencias son demasiado pequeñas para que se pueden explicar solamente de diferencias en el momento angular de las órbitas de los electrones. Como el electrón tiene una propiedad intrínseca llamada "spin", este momento angular "spin" se acopla con el de la órbita y genera dos niveles de energía con distinto momento orbital total.

En el interferómetro de Michelson, tras emitir luz desde una fuente, ésta incide sobre un vidrio esmerilado², de manera que la luz emitida desde ahí sale en todas direcciones. Consideremos un rayo particular que es emitido con un ángulo θ respecto del eje horizontal del interferómetro, y tomando el caso en que los espejos están paralelos, con una separación efectiva d . Así, resulta que la diferencia de camino Δl entre los haces reflejados resulta:

$$(1) \quad \Delta l = \frac{2d}{\cos(\theta)}$$

Cuando la diferencia de camino es un múltiplo entero de la longitud de onda, se produce interferencia constructiva, resultando una franja brillante. Esto ocurre para la

¹Es un instrumento que permite estudiar cuantitativamente pequeñas diferencias de espesor, índice de refracción, longitud de onda, etc. Se basa en la interferencia de dos frentes de onda que recorren caminos diferentes.

²Es el producto del grabado de ácido del vidrio claro. Tiene el efecto de hacer el cristal traslúcido por la dispersión de la luz durante la transmisión, por lo tanto las imágenes son borrosas mientras se transmite luz.

condición:

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

Donde m es un número entero. Dada la simetría azimutal en torno al eje del interferómetro, si los espejos están alineados de forma paralela, el observador percibe las franjas de interferencia como círculos concéntricos, que se alternan en franjas brillantes y oscuras. De esta manera, si analizamos la ecuación (2), el menor número de franjas se produce cuando la separación d entre los lentes, es del orden de la longitud de onda λ .

Por otro lado, entre el micrómetro y el espejo, hay una palanca que reduce el desplazamiento. Así el desplazamiento del d del espejo, no es equivalente al del micrómetro D_μ . Hay una reducción constante de un factor η , así:

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

De esta manera, el instrumento debe estar calibrado, i.e. se debe calcular η , usando una línea espectral de longitud de onda conocida, donde la línea verde del Mercurio corresponde a una longitud de onda de 546,1 nm.

Con la lámpara de sodio como fuente de luz para el interferómetro, cada línea del doblete, correspondiente a λ_1 y λ_2 , produce su propio patrón de interferencia, de manera que a la salida del interferómetro se ven los dos patrones superpuestos. Para una posición del espejo, se observan dos franjas brillantes, una correspondiente a la línea 1 y otra a la línea 2, las que se aprecian en el centro del campo visual. En esta posición se ven franjas muy claras, es decir, con una visibilidad o contraste máximo. Mientras se desplaza el espejo los dos patrones que se superponen en el campo visual, quedan mal alineados porque el desplazamiento de las franjas es un poco diferente para λ_1 y λ_2 . Eventualmente se alcanza un desplazamiento del espejo donde una franja brillante para λ_1 , coincide con una franja oscura correspondiente a λ_2 . En esta posición no se ven franjas claras, es decir, la visibilidad o contraste es mínimo. Con más desplazamiento del espejo se encontrará una posición donde, de nuevo, una franja brillante coincide con otra brillante y la visibilidad vuelva a ser máxima. Por medio del período de este cambio de visibilidad se puede calcular el $\Delta\lambda$ del doblete. Sea d la separación entre los espejos para esta situación, si hay una franja brillante correspondiente a λ_1 en el centro del campo visual, es decir, $\theta = 0$, se obtiene:

$$2d = m_1\lambda_1$$

de manera que,

$$(4) \quad \lambda_1 = \frac{2d}{m_1}$$

Para la condición mínima de visibilidad, debe haber una franja oscura en el patrón de λ_2 en ese punto, de modo que:

$$2d = (m_2 + 1/2)\lambda_2$$

despejando,

$$(5) \quad \lambda_2 = \frac{2d}{m_2 + 1/2}$$

restando λ_1 y λ_2 :

$$(6) \quad \lambda_1 - \lambda_2 = 2d \frac{(m_2 - m_1) + 1/2}{m_1(m_2 + 1/2)}$$

Ahora multiplicando λ_1 y λ_2 :

$$(7) \quad \lambda_1\lambda_2 = \frac{4d^2}{m_1(m_2 + 1/2)}$$

Haciendo $\lambda_1 - \lambda_2 = \Delta\lambda$ y $\lambda_1 \cdot \lambda_2 = \lambda^2$, resulta:

$$(8) \quad d = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda} (m_2 - m_1 + 1/2)$$

Partiendo desde $d = 0$, la condición de mínima visibilidad ocurre para valores de d correspondientes a $(m_2 - m_1) = 0, \pm 1, \pm 2$, etc.

2. MONTAJE Y PROCEDIMIENTO

En primer lugar, para calibrar el interferómetro, se posiciona la lámpara de Mercurio al costado del interferómetro, de manera que la luz incida sobre el vidrio esmerilado, utilizando un filtro verde entre la fuente de la luz y el vidrio mencionado anteriormente. Tras ello, se posiciona una flecha metálica sobre el vidrio esmerilado, de manera que al observar por el campo visual se aprecian tres imágenes de la flecha. Tras ello, se ignora una de las imágenes con la finalidad de recibir sólo el haz de luz perpendicular y el paralelo, y así observar claramente el efecto de superposición, ajustando el tornillo del espejo fijo M_2 que se aprecia en la FIGURA 1. Tras esperar unos minutos para que la lámpara se caliente para alcanzar su máximo nivel de luminosidad de manera que las franjas sean visibles a simple vista, se comienza a mover el tornillo micrométrico que permite desplazar el espejo M_1 , produciendo un espaciamiento efectivo d . Dependiendo de la dirección en la que se mueve el tornillo las franjas irán saliendo o entrando al centro del círculo. El instrumento debe ser calibrado, es decir, se debe calcular la constante de proporcionalidad η la cual relaciona la distancia efectiva d entre los espejos, y la distancia desplazada por el micrómetro D_μ , a través del uso de una línea espectral de longitud de onda conocida, i.e., línea verde del mercurio, con una longitud de onda de 546,1 nm. Para obtener el valor de η , se mueve los tornillos del lente M_1 , hasta que las franjas circulares de interferencia cambien a cuasi-paralelas, de manera que sea posible contar la cantidad de veces en que éstas últimas pasan frente a la flecha metálica.

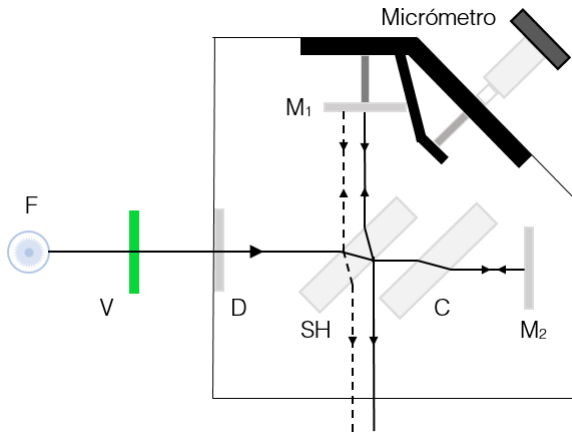


FIGURA 1. Montaje utilizado en experimento. Donde F corresponde a la fuente de luz (lámpara de mercurio o sodio), V es el filtro verde, D es el vidrio esmerilado, M1 y M2 son los espejos donde la luz se refleja, SH es el separador de haz, y finalmente C es el compensador, para igualar el recorrido en vidrio de los haces.

Finalmente, se reemplaza la lámpara de mercurio por una de Sodio, manteniendo el mismo alineamiento del interferómetro de la sección anterior. De esta manera, se comienza a mover el tornillo del micrómetro, y así se moverá el espejo superior, hasta observar una condición mínima de visibilidad de las franjas. Finalmente, se registran varios mínimos consecutivos encontrados, considerando que $|m_2 - m_1|$ cambia en 1 para dos posiciones consecutivas de mínima visibilidad.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Debido a limitaciones en el tiempo, la cantidad de líneas que se contaron para determinar el factor de conversión entre el micrómetro y el movimiento del espejo no superó las treinta y cinco líneas por medición. Debido a esto el micrómetro media cantidades muy pequeñas, por lo que en algunos casos se estimó un valor intermedio entre dos valores, con el objetivo de no repetir resultados en mediciones con diferente cantidad de líneas. A pesar de esto durante los cálculos se utilizó el error correspondiente de $5 \mu m$ que proviene del hecho que el micrómetro media en intervalos de $10 \mu m$.

Luego, se realizó un ajuste de mínimos cuadrados de la forma $y = ax$, con error en el eje vertical, y . Como el error que podría proceder del número de líneas contadas no es significativo en comparación con el error aleatorio que se encuentra en el valor dado por el micrómetro, el ajuste realizado fue del tipo d vs D_μ , y luego el factor de conversión vendrá de invertir la pendiente. En la **Figura 2** se encuentra una tabla con estos resultados, y en la **Figura 3** el gráfico del ajuste. A partir de este se obtuvo que el factor de conversión era de $0,22 \pm 0,04$.

Movimiento del micrómetro (D_μ)	Número de líneas	Movimiento del espejo (d)
$5 \pm 5 \mu m$	5	$1.36525 \mu m$
$10 \pm 5 \mu m$	10	$2.7305 \mu m$
$20 \pm 5 \mu m$	15	$4.09575 \mu m$
$25 \pm 5 \mu m$	20	$5.461 \mu m$
$30 \pm 5 \mu m$	25	$6.82625 \mu m$
$35 \pm 5 \mu m$	30	$8.1915 \mu m$

FIGURA 2. Tabla con los resultados del procedimiento para encontrar el factor de conversión. Notese que se omitieron los errores del número de líneas ya que, asumiendo que el error no es más de una línea, el error no es significativo en los resultados finales.

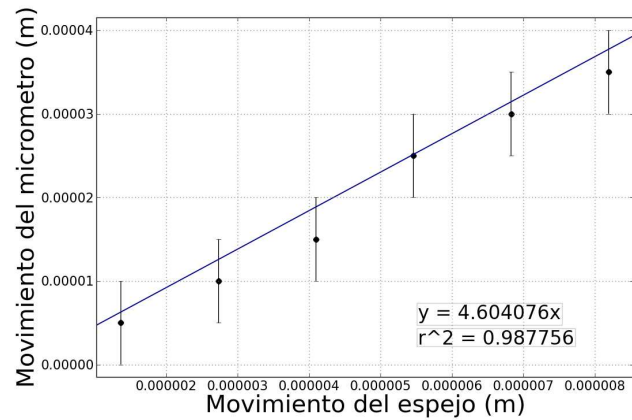


FIGURA 3. Línea de tendencia entre movimiento del espejo y movimiento del micrómetro. Notese que el inverso de la pendiente corresponde al factor buscado.

Usando el factor de conversión se obtuvieron los valores en que el movimiento del espejo (d) cumplía con la condición de mínima visibilidad. Luego se realizó otro ajuste del mismo tipo que el anterior, entre $(m_2 - m_1 + 1/2)$ y d (ver **Figura 4**).

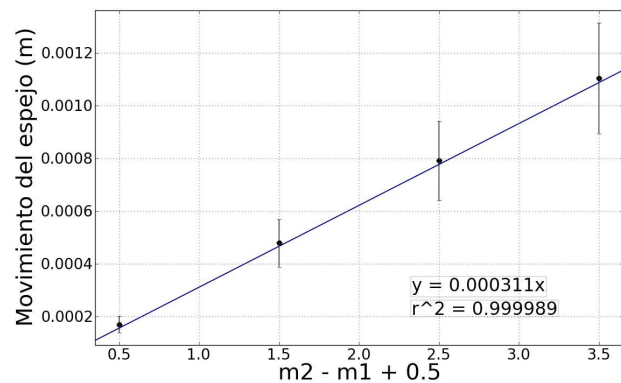


FIGURA 4. Línea de tendencia entre $(m_2 - m_1 + 1/2)$ y el movimiento del espejo.

Comparando el ajuste con la formula (8), se tiene que la pendiente corresponde con $\frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda}$, de manera que despejando y usando $\lambda = 589 \text{ nm}$, se obtiene que el valor encontrado de $\Delta\lambda$ es $(5,6 \pm 0,9) \cdot 10^{-10} \text{ m}$. El valor de la literatura corresponde a $5,97 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3$, por lo tanto el valor experimental tiene un error relativo de 6,2 %, el cual queda completamente justificado por el error aleatorio obtenido.

Ahora, el error aleatorio obtenido podría haberse mejorado, si por ejemplo, en el calculo del factor de conversión se hubieran medido más datos, dado que el error propagado en un ajuste de mínimos cuadrados dependerá de los valores del eje x (movimiento del espejo), y de los errores en el eje y ($5 \mu\text{m}$), pero dado que este último tiene un valor constante, queda claro que haber realizado mayor número de mediciones habría mejorado el error.

4. CONCLUSIÓN

A partir de este experimento se logró obtener satisfactoriamente el valor de $\Delta\lambda$ del doblete de Sodio, obteniéndose que $\Delta\lambda = (5,6 \pm 0,9) \cdot 10^{-10} \text{ m}$, lo que tiene un error relativo del 6,2 % con respecto al valor indicado por la literatura. Este error se encuentra dentro de los esperado por los errores aleatorios del experimento, el cual proviene principalmente del error que resulta del micrómetro. Sin embargo, el error resultante podría haberse mejorado de varias maneras, por una parte, usando un micrómetro más preciso, pero principalmente porque el factor de conversión obtenido ($0,22 \pm 0,04$) se podría haber mejorado realizando más mediciones, que por falta de tiempo, y debido a la dificultad que hay en contar a ojo las líneas, no pudo realizarse.

³Valor resultante de restar las longitudes de onda correspondientes, cuyos valores fueron obtenidos del libro Tables of Spectrum Lines, A.N. Zaidel (1961), pagina 405.