

# Doblete de sodio

## Objetivos

Mediante un interferómetro de Michelson, medir la diferencia entre las longitudes de onda de las dos líneas amarillas del espectro de sodio.

## Introducción

Los átomos tienen niveles discretos de energía, por lo que al absorber y emitir energía lo hacen en cantidades fijas. Los valores de los niveles energéticos están determinados en gran medida de la distribución de los electrones dentro del átomo dependiendo de su energía potencial eléctrica con el núcleo y su momento angular. Sin embargo, al tener en consideración otras interacciones dentro del átomo los niveles adquieren otros valores dependiendo de otros estados cuánticos, como lo es el spin ( $\mathbf{S}$ ) al acoplarse al momento angular orbital ( $\mathbf{L}$ ). Esta interacción se conoce como acoplamiento spin-órbita.

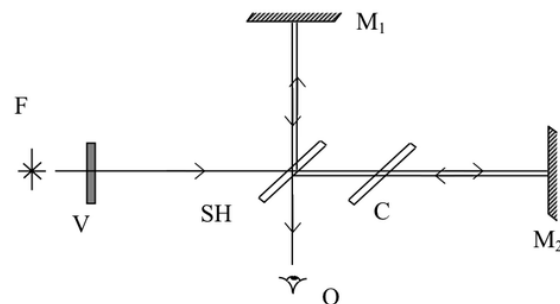
En el caso del sodio, la principal emisión que tiene se produce en la transición del nivel  $3p$  al  $3s$  (líneas D), correspondiendo a una luz amarilla. Sin embargo, debido al acoplamiento spin-órbita, es decir, al considerar el momento angular total ( $\mathbf{J}=\mathbf{L}+\mathbf{S}$ ), el nivel  $3p$  queda dividido en un doblete de estados, correspondientes a los estados de spin *up* y *down*, produciendo las transiciones  $3p_{3/2} \rightarrow 3s$  y  $3p_{1/2} \rightarrow 3s$  que emiten fotones con longitudes de onda ligeramente diferentes. Esta separación de niveles se conoce como estructura fina.

Dado que es necesario medir distancias sumamente pequeñas ( $\sim 0.1 \text{ nm}$ ) para medir la separación del doblete de sodio, se utiliza la técnica de interferometría, que consiste en

la combinación de ondas. De esta manera, observando los patrones de interferencia debido al principio de superposición, es posible medir la diferencia de distancias recorridas entre un haz y otro. El patrón de interferencia se puede observar como una serie de círculos concéntricos de luz intercalados con círculos oscuros, correspondiendo a zonas de interferencia constructiva y destructiva respectivamente.

## Interferómetro de Michelson

El interferómetro de Michelson 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. En la Fig. 1 se muestra el montaje experimental básico de un interferómetro de Michelson.

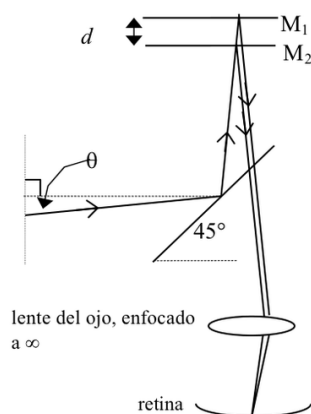


**Figura 1:** esquema de un interferómetro de Michelson.  $F$ , fuente luminosa,  $V$ , vidrio esmerilado,  $SH$ , separador de haz,  $C$ , compensador,  $M_1$  y  $M_2$ , espejos planos,  $O$ , observador.

La luz proveniente de la fuente  $F$  pasa por el vidrio esmerilado  $V$  para que todos los haces comiencen desde la misma posición. Luego, el haz original se divide en dos haces

mediante el semiespejo  $SH$ . Uno de los haces se refleja en el espejo  $M_1$  y atraviesa el semiespejo hacia el observador. El otro haz se refleja en el espejo  $M_2$  y vuelve a reflejarse en el semiespejo hasta llegar al observador. Una vez que ambos haces se combinan, es posible observar el patrón de interferencia.

Si los espejos  $M_1$  y  $M_2$  están alineados perpendiculares entre sí, de manera un haz incide en  $45^\circ$  en el separador de haces, el observador podrá observar en el centro de su visión el patrón circular de líneas, en otro caso, solamente podrá observar líneas cuasiparalelas debido a que el patrón se encuentra descentrado.



**Figura 2:** arreglo de espejos equivalente al interferómetro de Michelson. Se observa un haz incidente fuera de la normal.

Para los haces emitidos desde un ángulo  $\theta$  con respecto a los  $45^\circ$  de incidencia del  $SH$ , la diferencia de camino óptico está dada por:

$$\Delta l = 2d/\cos \theta \quad (1)$$

Donde  $d$  es la separación relativa de los espejos.

Si esta diferencia de camino óptico entre los dos haces coincide con un múltiplo de la

longitud de onda, se producirá interferencia constructiva, observándose una línea luminosa en el patrón. De esta manera las líneas del patrón siempre podrán observarse en la misma posición si se cumple la condición:

$$m\lambda = 2d/\cos \theta \quad (2)$$

Donde  $m$  es un entero y  $\lambda$  la longitud de onda. De esta manera, al variar la separación de los espejos, moviendo uno de los espejos, el patrón se desplazará. Por consiguiente, al contar cuántas líneas pasan por un punto es posible cuantificar el desplazamiento del espejo que se movió mediante la ecuación (2).

## Montaje

### Alineación de la lámpara

1. Instale la lámpara al costado del interferómetro. Coloque el filtro verde y el vidrio esmerilado en posición correspondiente. Encienda la lámpara de mercurio. Ponga la flecha metálica sobre el vidrio esmerilado, de modo que se vea claramente en el campo visual. Debe poder verse tres imágenes de la flecha. Una de ellas debe ser ignorada pues corresponde a un reflejo adicional. Ajuste los tornillos de  $M_2$ , hasta que las otras dos imágenes se superpongan. Esto asegura que  $M_1$  y  $M_2$  estén aproximadamente perpendiculares.
2. En estas condiciones es posible percibir franjas de interferencia en el campo visual. Si ello no ocurre, haga pequeños ajustes a los tornillos de  $M_2$ , hasta lograrlo. Realice a continuación ajustes

más finos, hasta ver franjas circulares centradas en el campo visual. En estas condiciones el interferómetro se encuentra alineado.

## Calibración

1. Mueva el tornillo micrométrico que permite desplazar el espejo  $M_1$ , produciendo una variación del espaciamiento efectivo  $d$ . Observe cómo las franjas colapsan hacia el centro o surgen desde la parte central, dependiendo de la dirección del desplazamiento.
2. Observando las franjas y el puntero, introduzca **sin tocar nada**, uno de sus dedos en el haz que va desde el semiespejo al espejo fijo. ¿Qué sucede?
3. Observando las franjas y el puntero, trate de golpear la base del interferómetro ¿Qué observa? Entre el micrómetro y el espejo hay una palanca que reduce el desplazamiento. Así el desplazamiento del espejo,  $d$ , no es igual al del micrómetro,  $D_\mu$ . Hay una reducción constante de un factor  $\eta$ , entonces

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

El instrumento debe ser calibrado, **es decir se debe calcular  $\eta$** , usando una línea espectral de longitud de onda conocida. La línea verde del mercurio corresponde a una longitud de onda de  $546.1 \text{ nm}$ .

4. Mueva ligeramente uno de los tornillos de  $M_2$ , hasta que las franjas circulares cambien a cuasiparalelas. Gire muy lentamente el tornillo micrométrico unas cinco divisiones y cuente el número de franjas de interferencia que pasan frente

al puntero indicador. ¿Qué distancia ha avanzado el micrómetro? ¿Qué distancia ha avanzado el espejo móvil?, ¿Entonces, cuál es el valor de  $\eta$ ? ¿Cuál es la fuente de error más grande en esta medición? Tome distintas mediciones y obtenga  $\eta$  y su error mediante ajuste lineal.

## Medición de la separación del doblete de sodio

La luz emitida por una lámpara de sodio de baja presión emite un espectro cuasi-monocromático (las demás emisiones pueden ignorarse debido a su baja intensidad), con dos emisiones muy cercanas a  $589 \text{ nm}$ .

Al hacer incidir la luz de la lámpara en el interferómetro, se producen dos patrones de interferencia superpuestos, uno para cada longitud de onda,  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ . Es por esto, que al mover el espejo  $M_1$  y variar la distancia  $d$ , las líneas de cada patrón se desplazarán en distinta cantidad.

Si los dos patrones comienzan alineados, las regiones de interferencia constructiva y destructiva coincidirán, respectivamente, y el contraste será máximo, es decir, se pondrán ver claramente las líneas amarillas y oscuras. A medida que un patrón adelanta al otro, las regiones de interferencia constructiva de una longitud de onda coincidirán con las regiones de interferencia destructiva de la otra, haciendo que dejen de verse líneas, dando paso a la visualización de luz amarilla solamente. En esta situación se tendrá mínimo contraste o mínima visibilidad de la interferencia.

Considerando un haz de  $\lambda_1$  incidiendo en un ángulo  $\theta = 0$  se tiene:

$$2d = m_1 \lambda_1 \rightarrow \lambda_1 = \frac{2d}{m_1}$$

Para la condición de mínima visibilidad, debe haber una franja oscura en el patrón de  $\lambda_2$ , de modo que

$$2d = \left(m_2 + \frac{1}{2}\right) \lambda_2 \rightarrow \lambda_2 = \frac{2d}{m_2 + \frac{1}{2}}$$

Así, restando  $\lambda_1 - \lambda_2$  queda,

$$\lambda_1 - \lambda_2 = 2d \frac{(m_2 - m_1) + \frac{1}{2}}{m_1 \left(m_2 + \frac{1}{2}\right)}$$

Además, al multiplicar  $\lambda_1 \cdot \lambda_2$  se tiene,

$$\lambda_1 \lambda_2 = \frac{4d^2}{m_1 \left(m_2 + \frac{1}{2}\right)}$$

Definiendo  $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ ,  $\lambda^2 = \lambda_1 \lambda_2$  y  $\Delta m = m_2 - m_1$ , se puede despejar  $d$ :

$$d = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda} \left(\Delta m + \frac{1}{2}\right) \quad (3)$$

Partiendo desde  $d = 0$ , la condición de mínima visibilidad ocurre para valores de  $d$  correspondientes a  $\Delta m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$

## Procedimiento

- Reemplace la lámpara de mercurio por la lámpara de sodio, cuidando de no alterar el alineamiento del interferómetro.
- Con el micrómetro, mueva el espejo  $M_1$ , hasta obtener una condición de mínima visibilidad de las franjas. Anote el valor de  $d$  correspondiente.
- Desplace  $M_1$  registrando los valores **sucesivos** de  $d$  a los cuales se produce nuevamente la condición de mínima visibilidad.
- Usando un método gráfico y la ecuación (3) obtenga  $\Delta\lambda$  y su error a partir de la pendiente del gráfico. Para esto use el hecho que  $\Delta m$  cambia en una unidad para posiciones adyacentes

de mínima visibilidad. Use  $\lambda = 589 \text{ nm}$  para  $\lambda^2$ . Recuerde que debe incluir el error en  $\eta$  en su cálculo del error de  $\Delta\lambda$ . (¿Porqué?)

- Compare con los valores de tabla para  $\Delta\lambda$ .