LABORATORIO DE SEGUNDO CURSO
(FÍSICA MODERNA)

DIFRACCIÓN EN UNA RENDIJA Y PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE DE HEISENBERG

1 OBJETO DE LA PRÁCTICA

- Medir la distribución de intensidad correspondiente al diagrama de difracción de una rendija simple.
- Confirmar el principio de incertidumbre de Heisenberg.

2 MATERIAL

- Láser He-Ne
- Fotodetector con amplificador
- Ajuste regulable horizontal
- Unidad de control para fotodetector
- Banco óptico
- Portadiafragmas
- Diafragma con 3 rendijas simples (0.1, 0.2, 0.4 mm)
- Multímetro
- Cables de conexión

3 TEORÍA

3.1 Difracción en una rendija

La difracción es un fenómeno característico de las ondas, que se produce cuando las ondas se encuentran en su camino con un obstáculo, como es el caso de una rendija.

En principio, cuando un haz de luz pasa a través de una rendija, esperaríamos que pasara sin experimentar ningún cambio. Sin embargo, cuando la rendija es suficientemente pequeña, lo que se observa no es eso. El haz experimenta una dispersión y si lo registramos en una pantalla detrás de la rendija, lo que se observa es el denominado *patrón de difracción o interferencia* (Fig.1). Es posible analizar este fenómeno basándonos en el *principio de Huygens*, que nos dice que cada punto de la rendija por el que ha de pasar la luz se puede considerar como una fuente de ondas secundarias. Por lo tanto, el patrón de difracción no sería otra cosa que el resultado de la superposición de la luz que proviene de

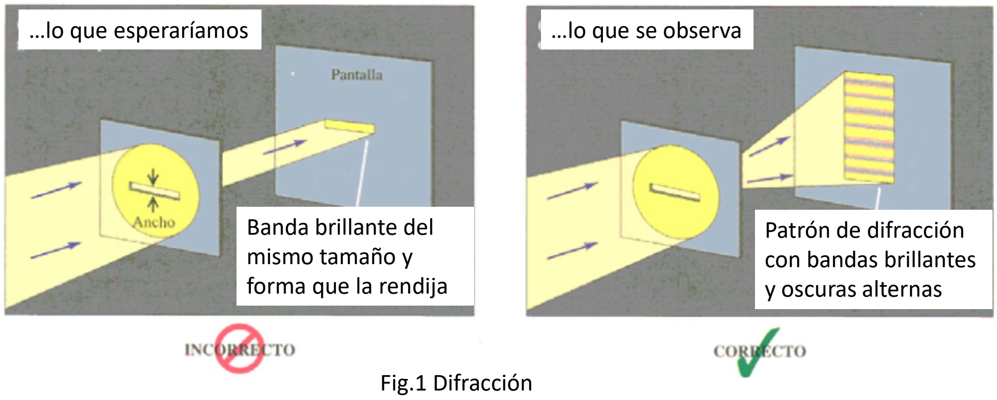

Fig.1 Difracción

estos emisores secundarios, dando lugar a un fenómeno de interferencia. Este hecho hace que no haya una diferencia fundamental entre difracción e interferencia.

Existen dos tipos de difracción:

- *difracción de Fresnel o de campo cercano:* cuando el obstáculo (rendija) y la pantalla sobre la que se forma el patrón están relativamente cerca;
- *difracción de Fraunhofer o de campo lejano:* cuando el obstáculo (rendija) y la pantalla sobre la que se forma el patrón se encuentran suficientemente alejados

El análisis de la difracción de Fraunhofer es más sencillo y es el tipo de difracción que consideraremos en esta práctica.

En el caso de la difracción de Fraunhofer, cuando se tiene una rendija rectangular, el patrón de difracción consiste en una zona central brillante, bordeada de bandas oscuras y brillantes alternas cuya intensidad va decreciendo rápidamente como se observa en la figura 2.

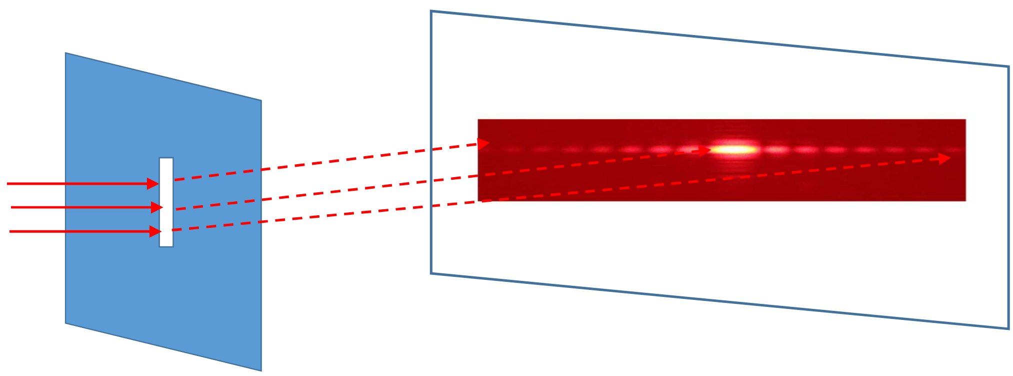

Fig.2 Patrón de difracción de rendija rectangular

La distribución de intensidad de la luz difractada como función del ángulo α entre el punto de observación en la pantalla y la rendija se presenta en Fig.3, mostrando claramente un máximo principal en $\alpha = 0$ y máximos secundarios de intensidad cada vez menor cuanto más nos alejamos del máximo principal (mayor α). Dicha intensidad viene dada por la expresión (*fórmula de difracción de Kirchoff*):

$$I(\alpha) = I(0)\left(\frac{\mathrm{sen}\beta}{\beta}\right)^2, \tag{1}$$

donde

$$\beta = \frac{\pi\, d}{\lambda}\,\mathrm{sen}\alpha.$$

d es la anchura de la rendija y λ la longitud de onda de la luz.

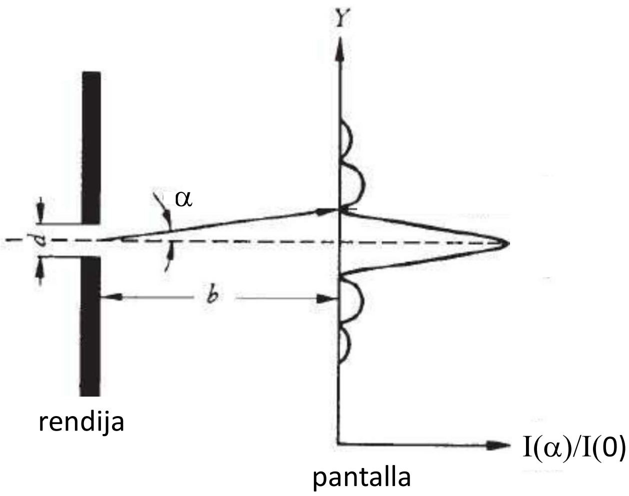

Fig.3 Difracción de Fraunhofer a gran distancia

De acuerdo con esta expresión, los mínimos de intensidad corresponden a las posiciones

$$\mathrm{sen}\alpha_n = n\frac{\lambda}{d}, \tag{2}$$

donde $n = 1, 2, 3...$, mientras que los primeros máximos se encuentran en

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 0 \\ \mathrm{sen}\alpha_1 &= 1.430\,\frac{\lambda}{d} \quad (3) \\ \mathrm{sen}\alpha_2 &= 2.459\,\frac{\lambda}{d} \quad (4) \end{aligned}$$

Las alturas relativas de los primeros máximos secundarios están dadas por

$$\begin{aligned} I(\alpha_1) &= 0.0472\, I(0) \quad (5) \\ I(\alpha_2) &= 0.0165\, I(0) \quad (6) \end{aligned}$$

3.2 Principio de incertidumbre de Heisenberg

El principio de incertidumbre constituye unos de los resultados más importantes de la física cuántica. Enunciado en 1927, indica que no todas las propiedades de un sistema cuántico se pueden conocer simultáneamente de forma precisa:

si conocemos la posición de una partícula, no podemos conocer simultáneamente su cantidad de movimiento con la misma precisión

Cuanto mejor conocemos la posición de una partícula, peor conocemos su cantidad de movimiento y viceversa. Matemáticamente:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}, \tag{7}$$

donde Δx es la incertidumbre en la posición, y Δp corresponde a la incertidumbre en la cantidad de movimiento en la dirección x.

Debe tenerse en cuenta que la incertidumbre de Heisenberg no es un error de medida. Su afirmación es diferente: no podemos conocer a la vez la posición y la cantidad de movimiento de una partícula en el mismo instante, no importa lo preciso que sea el instrumento de medida usado.

4 MÉTODO EXPERIMENTAL

1. Realizar el montaje de la figura.

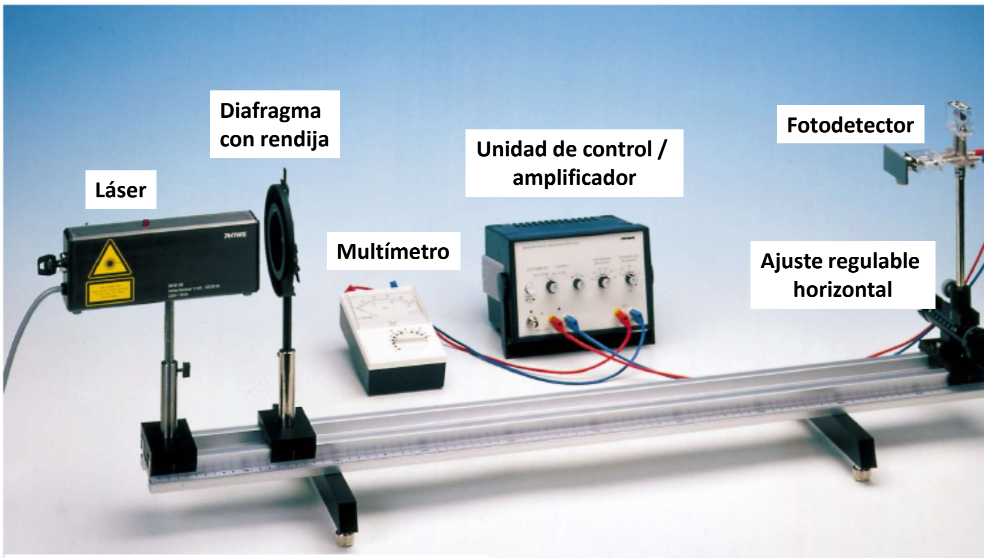

Fig.4: Montaje del experimento

2. Situar una de las rendijas (por ejemplo 0.2 mm) en el diafragma y colocar el fotodetector tan lejos como sea posible de la rendija.

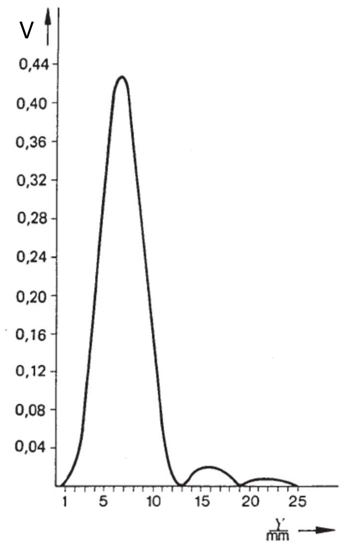

Fig.5 Voltaje medido (proporcional a la intensidad) como función de la distancia

3. El voltaje medido en el multímetro es proporcional a la intensidad de luz que llega al fotodetector.
4. Con ayuda del ajuste regulable horizontal del fotodetector buscar la posición del máximo central del patrón de difracción.
5. Mediante el ajuste regulable horizontal moverse poco a poco a uno de los lados del máximo central. Registrar el voltaje medido en el multímetro como función del desplazamiento horizontal y (debe tenerse en cuenta que una vuelta completa del mando de ajuste equivale a 0.5 mm). Deben registrarse por lo menos los dos primeros máximos secundarios y los tres primeros mínimos (Fig.5).
6. Cambiar la rendija inicial por las otras dos rendijas. En cada uno de estos casos, sólo es necesario determinar la posición del primer mínimo.

IMPORTANTE: Para asegurarse de que la intensidad de luz procedente del láser es constante, el láser debería encenderse alrededor de media hora antes del comienzo del experimento. Las medidas debería tomarse en una habitacíon oscura con luz natural constante.

PRECAUCIÓN: **No mirar nunca directamente al láser de luz.**

5 CUESTIONES

- Para la primera rendija, dibujar la intensidad en el fotodetector (voltaje) como función del desplazamiento horizontal y.
- Calcular las posiciones (ángulo α) de los tres primeros mínimos y los dos primeros máximos secundarios usando las fórmulas de difracción de Kirchoff [ecuaciones (2) - (4), respectivamente], y compararlas con los valores medidos.

- Comparar las intensidades relativas medidas para los dos primeros máximos secundarios con Ecs. (5)y (6).

- El experimento de la difracción de una rendija permite ilustrar el principio de incertidumbre de Heisenberg. La luz está compuesta de fotones y para un fotón que atraviesa la rendija, la difracción en la misma hará que el fotón cambie su dirección de movimiento:

  - Determinar para un fotón que es desviado un ángulo α (ver Fig.3), cuál debe ser la componente y de su cantidad de movimiento.
  - Teniendo en cuenta que prácticamente todos los fotones son difractados entre el máximo central y el primer mínimo, estimar la incertidumbre en la componente y de la cantidad de movimiento de los fotones difractados. Usar la ecuación (2) para el primer mínimo del patrón de difracción, y la relación de De Broglie $\lambda = h/p$ para la longitud de onda de una partícula cuántica (el fotón en nuestro caso).
  - Usar el resultado anterior para estimar la incertidumbre en la componente y de la cantidad de movimiento de los fotones difractados para cada una de las rendijas utilizadas. Comprobar que cuanto menor es la anchura de la rendija, la incertidumbre en la cantidad de movimiento de los fotones difractados aumenta.
  - Teniendo en cuenta que la incertidumbre en la coordenada y de los fotones viene dada por la anchura, d, de la rendija, $\Delta y \sim d$, comprobar que se verifica la condición

    $$\Delta y \cdot \Delta p_y \sim h,$$

    en consistencia con el principio de incertidumbre de Heisenberg.

    Fijarse en que reduciendo la anchura de la rendija d, se puede medir la coordenada y de forma tan precisa como se quiera, $\Delta y \sim d$, pero al ser más pequeño Δy, la incertidumbre en p_y, $\Delta p_y \sim \frac{h}{d}$ se hace mayor. Cuanto más sepamos sobre y, menos sabremos sobre p_y.