

# Preinforme: Doble rendija

Sergio Laverde\* and Samuel Hernandez\*\*  
 Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.  
 (Dated: 24 de abril de 2025)

## I. OBJETIVOS

- Realizar un experimento de doble rendija observando el patrón de interferencia
- Medir el patrón de interferencia de doble rendija con ayuda de un fotodiodo y tubo fotomultiplicador evidenciando la dualidad onda-partícula de la luz
- Comparar los resultados de la medición del patrón de interferencia con dos modelos teóricos: Fresnel y Fraunhofer.

## II. MARCO TEÓRICO

Con la llegada de la mecánica cuántica, se introdujo el concepto de *dualidad onda-partícula*, que postula que ciertos objetos físicos pueden comportarse tanto como ondas como partículas dependiendo del tipo de experimento realizado. La luz es uno de estos objetos físicos y su naturaleza ondulatoria ha sido objeto de numerosos estudios. En esta práctica experimental, se busca evidenciar la dualidad onda-partícula de la luz, específicamente su comportamiento ondulatorio.

El experimento de doble rendija de Young es una herramienta fundamental para estudiar la naturaleza ondulatoria de la luz. En él, se observa un patrón de interferencia que solo puede explicarse si consideramos que la luz se comporta como una onda. [1]

### Ejercicio 1:

El desarrollo de este ejercicio se hizo basado en el texto guía de Ondas y luidos de Yenny Rincón y Juan Pablo Salas [2]. En primer lugar, consideremos la figura esquemática para el experimento de doble rendija de Young, el cual se muestra en la siguiente figura:

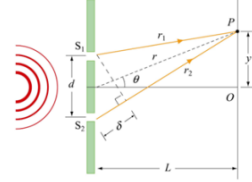


Figura 1. Esquema del experimento de doble rendija de Young. Recordemos que  $L \gg d$ .

Por otro lado, recordemos que al superponer dos ondas con diferencia de camino  $\delta$ , si queremos interferencia constructiva o destructiva, entonces

$$\delta = m\lambda, \quad m \in \mathbb{Z}$$

$$\delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

Siendo  $\lambda$  la longitud de onda. Ahora bien, si consideramos que  $L \gg d$ , entonces los rayos de luz son paralelos y se cumple que  $d \sin \theta = \delta$ . Además, el ángulo es muy pequeño por la misma consideración de antes, por lo tanto  $\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{y}{L}$ . Esto verifica que  $d \frac{y}{L} = \delta$ .

Ahora bien, el enunciado nos tira el hint de que

$$I \propto (E_1 + E_2)^2 = |\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2$$

Y el patrón de interferencia está dado por  $2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2$ . Si quisiéramos interferencia destructiva, necesitaríamos que  $2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = 0$ . Esto pasa si y solo si el ángulo relativo entre los campos, el desfase, es un múltiplo impar de  $\pi$ . Por el contrario, si quisiéramos interferencia constructiva, entonces el desfase debería ser múltiplo par de  $\pi$ .

Si consideramos que tenemos ondas planas con desfase  $\phi$ , entonces los máximos de la primera onda estarán en  $kx_1 = \frac{n\pi}{2}$  y los de la segunda en  $kx_2 + \phi = \frac{n\pi}{2}$ . Luego  $\delta = \frac{\phi}{k}$ . Reemplazamos  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  y  $\delta = d \sin \theta$  tenemos que  $d \sin \theta = \frac{\lambda\phi}{2\pi}$ , como queríamos.

Ahora bien, recordemos de ondas que el campo eléctrico va a estar dado por

$$\vec{E}_{12} = 2\vec{E}_0 \sin \left( kz - \omega t + \frac{\phi}{2} \right) \cos \left( \frac{\phi}{2} \right)$$

$$\Rightarrow |\vec{S}| = \frac{4E_0^2}{\mu_0 c} \sin^2 \left( kz - \omega t + \frac{\phi}{2} \right) \cos^2 \left( \frac{\phi}{2} \right)$$

\* Correo institucional: s.laverdeg@uniandes.edu.co

\*\* Correo institucional: sm.hernandezc1@uniandes.edu.co

Siendo  $\vec{S}$  el vector de Poynting . Luego

$$I = \langle |\vec{S}| \rangle = \frac{4E_0^2}{\mu_0 c} \cos^2 \left( \frac{\phi}{2} \right) \left( \frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 \left( kz - \omega t + \frac{\phi}{2} \right) dt \right)$$

$$= \frac{4E_0^2}{\mu_0 c} \frac{1}{2} \cos^2 \left( \frac{\phi}{2} \right) = 4I_0 \cos^2 \left( \frac{\phi}{2} \right).$$

Siendo  $I_0 = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c}$ . Queremos considerar ahora la difracción en una rendija. Para esto, consideremos  $N$  fuentes puntuales. Los campos eléctricos estarán con desfase  $\phi$  dada la coherencia. Al sumarlos tendremos algo así

$$\vec{E}_T = \vec{E}_0 e^{i(kz - \omega t + \phi)} \left( \sum_{n=0}^{\infty} e^{in\phi} \right)$$

Esta suma es geométrica. Si además usamos la definición de sin complejo, entonces

$$\vec{E}_T = \vec{E}_0 e^{i(kz - \omega t + \phi)} e^{i(N-1)\phi/2} \left( \frac{2i \sin(N\phi/2)}{2i \sin(\phi/2)} \right)$$

$$= \vec{E}_0 e^{i(kz - \omega t + \phi)} e^{i(N-1)\phi/2} \left( \frac{\sin(N\phi/2)}{\sin(\phi/2)} \right)$$

Recordemos que  $I \propto |\vec{E}|^2$ . Luego

$$I = I_0 \frac{\sin^2(N\phi/2)}{N^2 \sin^2(\phi/2)}.$$

Si consideramos el principio de Huygens y pensamos en dividir la rendija en  $N$  rendijas, es decir,  $\delta = \frac{a}{N} \sin \theta$ , entonces

$$\phi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{a}{N} \sin \theta$$

Por lo tanto

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \left( \frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta \right)}{N^2 \sin^2 \left( \frac{\pi}{\lambda} \frac{a}{N} \sin \theta \right)}$$

Considerando ángulos pequeños aproximamos el seno de abajo

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \left( \frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta \right)}{\left( \frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta \right)^2}.$$

Como queríamos.

Ejercicio 2:

#### ■ Cambio total en la fase de la onda:

$$\Delta S_1 = |\vec{r}_Q - \vec{r}_P| = D_1 \sqrt{\left( \frac{y-x}{D_1} \right)^2 + 1}$$

$$\approx D_1 \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{y-x}{D_1} \right)^2 \right)$$

$$\Delta S_2 = |\vec{r}_R - \vec{r}_Q| = D_2 \sqrt{\left( \frac{y-z}{D_2} \right)^2 + 1}$$

$$\approx D_2 \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{y-z}{D_2} \right)^2 \right)$$

$$\Delta \phi_1 \approx \frac{2\pi D_1}{\lambda} \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{y-x}{D_1} \right)^2 \right)$$

$$\Delta \phi_2 \approx \frac{2\pi D_2}{\lambda} \left( 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{y-z}{D_2} \right)^2 \right)$$

#### ■ Integral de caminos:

$$I(x, z) = \int_{y \in S} e^{\Delta \phi_1 + \Delta \phi_2} dy$$

$$= e^{\frac{2\pi i}{\lambda} (D_1 + D_2)} \int_{y \in S} e^{\frac{\pi i}{\lambda} \left( \frac{(y-x)^2}{D_1} + \frac{(y-z)^2}{D_2} \right)} dy$$

Haciendo uso del archivo de Mathematica suministrado, usando valores de  $a = 0,0001$ ,  $d = 0,000356$ ,  $D_1 = D_2 = 0,5$ ,  $\lambda = 63 \times 10^{-9}$  y  $x = 0$  y regiones de integración de  $y \in [-d/2 - a/2, -d/2 + a/2]$  para la rendija inferior y de  $y \in [d/2 - a/2, d/2 + a/2]$  para la rendija superior. Se calculó numéricamente la integral anterior para los 3 diferentes casos mostrados a continuación en las figuras 2, 3 y 4:

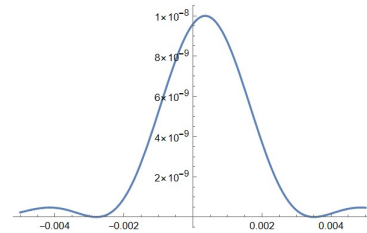


Figura 2. Rendija inferior sellada.

#### ■ Fotodiodo y Fotomultiplicador:

Un fotodiodo es un dispositivo electrónico semiconductor, de similar construcción que un diodo PN, sensible a radiación electromagnética que la transforma en corriente. El proceso que sucede en un diodo pero al revés.

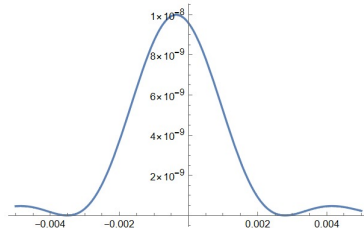


Figura 3. Rendija superior sellada.

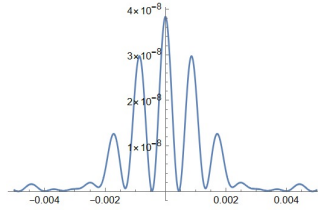


Figura 4. Ambas rendijas.

Un fotomultiplicador consiste en un tubo de vacío con un fotocátodo, muy sensible a radiación electromagnética que emite electrones ante la incidencia de luz, y un ánodo. Sirve para detectar y amplificar con alta precisión luz tenue.

### III. MONTAJE EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

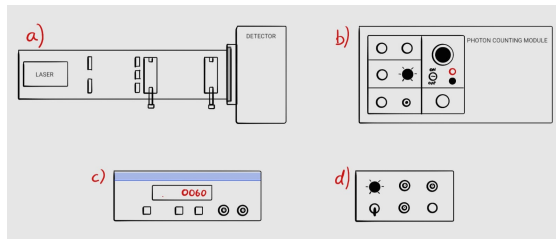


Figura 5. Montaje experimental.

Consiste en: a) Interferómetro con láser, detector y kit de rendijas, b) Módulo de detección: cuenta con 2 detectores: fotodiodo y fotomultiplicador, c) Contador de frecuencia TTI: cuenta el número de fotones incidentes en el detector, d) Módulo fuente: ubicado a un costado del interferómetro, controla los parámetros de la fuente de radiación.

#### Alineación

Primero, se verificó que el alto voltaje del módulo de medición estuviera en cero. Luego, se conectó la alarma de este módulo al módulo fuente para detectar cualquier

posible problema y se enlazó el fotodiodo al módulo de medición.

Dado que las intensidades serían medidas a partir del voltaje generado por el fotodiodo, se conectó un multímetro en la sección "photodiode" del módulo de medición.

A continuación, se colocaron las rendijas en el interferómetro, de derecha a izquierda, se organizaron de la siguiente manera: primero, se ajustó una rendija simple en el espacio destinado a la rendija detectora; después, se ubicó la rendija bloqueadora en el centro del interferómetro; posteriormente, se colocó una rendija doble justo después de la rendija bloqueadora y, por último, una rendija simple en la posición de la rendija colimadora.

Para asegurar la correcta alineación, se empleó el micrómetro de la rendija bloqueadora y una tarjeta, lo que permitió observar el paso de la luz a través de cada rendija por separado, a través de ambas rendijas y en condiciones de bloqueo total.

#### Medición con rendija detectora

Se ajustó la posición de la rendija bloqueadora hasta obtener una intensidad tenue al interrumpir el paso de la luz con una tarjeta. Luego, se desplazó la rendija detectora hacia uno de los extremos del interferómetro utilizando el micrómetro.

El experimento se realizó sin cubrir el interferómetro y en condiciones de ausencia de luz ambiente. Las mediciones se tomaron cada 20 divisiones del micrómetro, considerando que cada unidad de separación equivale a 10  $\mu\text{m}$ . Todas las posiciones fueron registradas en esta unidad.

#### Medición con dos rendijas

Se ajustó la posición de la rendija bloqueadora con el objetivo de maximizar la intensidad luminosa, lo cual se verificó interrumpiendo el haz de luz con una tarjeta.

Luego, se desplazó la rendija detectora hacia los extremos del interferómetro, asegurándose de que el multímetro registrara variaciones perceptibles en la señal.

Las mediciones se realizaron en condiciones de oscuridad, apagando la iluminación de la habitación. A diferencia de otras configuraciones, no se utilizó la cubierta de aluminio del interferómetro. Los valores de voltaje se registraron cada 2 divisiones del micrómetro, equivalentes a 20  $\mu\text{m}$ .

### Medición con un fotón a la vez

Antes de encender el interferómetro, se conectaron las salidas del fotomultiplicador y del discriminador a los dos canales del osciloscopio. Las entradas de alto voltaje se enlazaron con un multímetro que realizaba una conversión de 1000:1, permitiendo que el rango de voltajes de interés [550V, 660V] se interpretara como [0,55V, 0,66V].

Con el interferómetro encendido y en modo "bulb", se retiró el filtro verde de la salida del bombillo y se ajustó su intensidad al máximo mediante la perilla del módulo fuente. Dado que la intensidad de la luz era menor en comparación con la de un láser, se posicionó la tarjeta  $T$  justo detrás de la rejilla bloqueadora para identificar los intervalos del micrómetro en los que la luz atravesaba ambas rendijas, solo una o ninguna. Finalmente, se colocó la tapa de aluminio para evitar la entrada de luz residual, lo que ayudó a prevenir la saturación del obturador y posibles interferencias en las mediciones.

Para la calibración del pulso análogo, se abrió el obtu-

rador identificado por el cilindro blanco sobre la entrada de luz del medidor y se verificó la recepción de la señal de voltaje en el canal del fotomultiplicador. Luego, se ajustó la posición vertical de ambos canales en el osciloscopio: en la parte superior, los pulsos cuadrados TTL con una escala de 2V, y en la parte inferior, los pulsos análogos del fotomultiplicador con una escala de 50mV.

Utilizando la perilla de alto voltaje, se incrementó la amplitud del pulso análogo, estableciendo el voltaje en 650V mediante el multímetro y configurando el discriminador en 5. Esto permitió alcanzar una amplitud superior a 50mV, garantizando mediciones significativas. Una vez finalizada la calibración del discriminador, se conectó al contador de frecuencias, configurado para realizar conteos cada 0.1 segundos.

Finalmente, se realizó un barrido para diferentes intensidades y se obtuvieron datos del número de fotones en función de la posición de la rendija detectora. Para el caso de una rendija, se tomaron datos cada 50 líneas del micrómetro, mientras que para la doble rendija, cada 2 líneas.

---

[1] Daniel Daza, Samuel Hernández, J. D. C. (2024). Informe sobre el experimento de doble rendija. *Informe de Física Moderna*. Presentado el 2 de marzo de 2024.

[2] Salas Galindo, J. P. and Hernández Pico, Y. (2023). *Ondas y Fluidos*. Universidad De Los Andes, Bogotá, 1st ed. edition.