

Caracterización de fuentes de luz por medio del fenómeno de interferencia en una doble rendija

Juan C. Rojas V.* and Katherin A. Murcia S.**

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

(Dated: 19 de septiembre de 2024)

El experimento de doble rendija pretende comprobar la dualidad onda partícula de la luz registrando los patrones de difracción para un láser y para un bombillo de muy baja intensidad cuando su luz se hace incidir sobre una y dos rendijas haciendo uso de un interferómetro de doble rendija de *TeachSpin*. Por un lado, al realizar el experimento con el láser es posible observar la naturaleza ondulatoria de la luz, pues se observa un patrón de interferencia propio de entidades ondulatorias. Por otro lado, al realizar el experimento con el bombillo de baja intensidad es posible observar la naturaleza corpuscular de la luz, pues es posible verificar que sólo un fotón alcanza el detector en un determinado tiempo. Los resultados obtenidos fueron, además, comparados tanto con el modelo de Fraunhofer como con la de Feynman y Fresnel, obteniendo un mejor ajuste para doble rendija con el primero y para rendijas sencillas con el segundo. Asimismo, se calcularon los valores experimentales para la longitud de onda del láser y la del bombillo, obteniendo, para el láser $\lambda = (0.680 \pm 0.005)\mu\text{m}$, resultado preciso y exacto que está a un sigma del valor reportado por el fabricante, y, para el bombillo $\lambda = (0.320 \pm 0.001)\mu\text{m}$, que está a 221 sigmas del rango reportado por el fabricante.

I. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

La luz presenta propiedades ondulatorias o corpusculares dependiendo de cómo ella interactúa con otras entidades, discrepancia que se conoce como la dualidad onda partícula de la luz. Su carácter ondulatorio es evidente, por ejemplo, al observar patrones de interferencia producidos al obstaculizar caminos de luz con luz misma, como en el experimento de doble rendija llevado a cabo con luz de energía e intensidad no despreciables, ejecutado en primera instancia por Thomas Young en el siglo XIX. En contraste, al tratar con luz de energías muy bajas, se debe tratar a la luz como compuesta por unidades cuánticas, o fotones, como afirmaba Newton y como se confirmó a principios del siglo XX, y como se puede evidenciar en el experimento de doble rendija llevado a cabo con luz de energía e intensidad muy bajas [1] [2] [3].

Por otro lado, se entiende la difracción como la interacción entre entidades ondulatorias y un obstáculo en su camino, que termina por alterar la manera en que la entidad se propaga, y como patrón de difracción al resultado de dicha interacción [1].

Una teoría que pretende modelar este fenómeno para una configuración de doble rendija, como la que se ve en la figura 2, y para una configuración de una sola rendija, es la de Fraunhofer. Esta teoría asume que la luz alcanza el obstáculo y el detector como una onda plana, es decir, la distancia entre la fuente y el obstáculo, así como la distancia entre el obstáculo y el detector, L ,

tienden a infinito. Además, hace una aproximación bidimensional del fenómeno. Asimismo, se modela el ancho de cada rendija como el mismo, a . Así pues, este modelo predice el comportamiento de la intensidad lumínica, I en términos del ángulo de separación entre la posición vertical del detector y el centro del obstáculo, como se ve en la figura 2, como [4] [5]

$$I_1(\theta) = \frac{I_0}{4} \left(\frac{\sin(\alpha)}{\alpha} \right)^2, \text{ para una rendija,} \quad (1)$$

$$I_2(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin(\alpha)}{\alpha} \right)^2 (\cos(\beta))^2, \text{ para dos rendijas,} \quad (2)$$

$$\text{con } \alpha = \frac{\pi a \sin(\theta)}{\lambda} \text{ y } \beta = \frac{\pi d \sin(\theta)}{\lambda},$$

donde I_0 representa la intensidad en el centro del patrón de difracción para dos rendijas. Con esto, se espera que la intensidad en el centro del patrón de difracción para una rendija sea $I_0/4$. Este modelo es comparado con los datos obtenidos experimentalmente en las figuras 5 y 7.

Adicionalmente, este modelo permite relacionar la posición angular de un mínimo con la longitud de onda de la luz utilizada en el experimento como

$$n\lambda = d \sin(\theta_n) = \frac{dy_n}{\sqrt{y_n^2 + L^2}}, \quad (3)$$

donde θ_m es la posición angular del mínimo a estudiar y m es el orden del mínimo, es decir a cuántos mínimos de intensidad se encuentra del máximo central [4].

* Correo institucional: jc.rojasv1@uniandes.edu.co

** Correo institucional: k.murcia@uniandes.edu.co

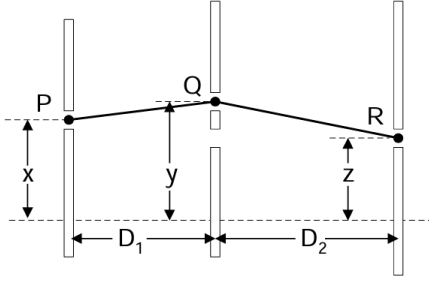


Figura 1. Diagrama de un posible camino que la luz tomaría ante una rendija como obstáculo, desde la fuente de luz hasta un detector. Tomada de [6].

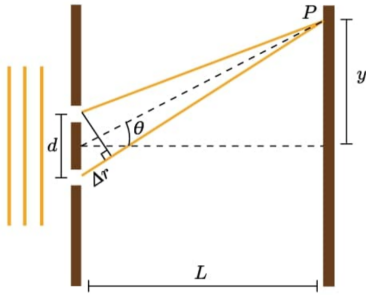


Figura 2. Diagrama de un montaje de doble rendija. Imagen obtenida de [7].

Otro modelo que busca describir el fenómeno de interferencia es el de Fraunhofer, que en esta ocasión se aproximó a primer orden, siendo consistente con el modelo de Fresnel. Por un lado, este modelo resulta más general que el de Fraunhofer porque no asume distancias infinitas entre la fuente, el obstáculo y el detector. Por otro lado, no deja de tener limitaciones, como el hecho de no considerar la polarización de la luz [5] [4]. Esta teoría modela el comportamiento de la luz considerando únicamente su fase, y hace una suma de todos los caminos rectos posibles que la luz podría tomar, sin importar la cantidad de rendijas que obstaculicen su camino, como se muestra en la figura ???. Así pues, se termina por modelar la intensidad en función de la posición x de la fuente de luz y de la posición z del detector, como

$$I(x, z) = \left| \int_{y \in S} dy \exp\left(\frac{\pi i(x-y)^2}{D_1 \lambda}\right) \exp\left(\frac{\pi i(y-z)^2}{D_2 \lambda}\right) \right|^2, \quad (4)$$

donde S representa el/los camino/s que la luz recorrió desde la fuente hasta el detector. Este modelo es comparado con los datos obtenidos experimentalmente en las figuras 5 y 7.

II. MONTAJE EXPERIMENTAL

Para el experimento desarrollado en este informe se utilizó el montaje mostrado en la figura 3. En esta se muestran las conexiones hechas para la realización del experimento.

Como primer momento del experimento, se hizo la alineación del láser dentro del interferómetro. La figura 4 muestra de manera esquemática la configuración dentro del interferómetro. Para hacer el proceso de alineación se necesitó comprobar, usando las tarjetas especializadas para ver el haz de luz, que este pasara efectivamente por la rendija simple inicial y que se muestre un patrón de interferencia luego de la rendija bloqueadora y que este llegue a la rendija detectora.

Una vez alineado el haz, se usó el micrómetro asociado a la rendija bloqueadora para que el patrón de interferencia de la doble rendija pudiese pasar; una vez se verificó que el patrón de interferencia se proyectó en la rejilla detectora, se hizo un barrido desde $y = (0.000 \pm 0.005)$ mm hasta $y = (12.400 \pm 0.005)$ mm en intervalos de (0.100 ± 0.005) mm, midiendo en cada posición el voltaje arrojado por la salida del “Photodiode” del módulo detector. Este proceso se hizo dos veces más, bloqueando en un caso la rendija izquierda y luego la rendija derecha.

Como segunda fase del experimento se utilizó el bombillo con filtro verde para medir “un fotón a la vez”. Para esto, se hizo la calibración del discriminador del módulo de detección por medio de un oscilador para que el TTI pudiese contar los fotones que llegan al obturador y al fotomultiplicador. Luego de hacer la calibración, se hizo un proceso análogo que para el láser para tomar los datos de doble rendija y una rendija.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos a partir de la medición y simulación de los patrones de difracción e interferencia de la luz al pasar a través de una y dos rendijas durante las dos secciones del experimento son desarrollados a continuación.

A. Medición con láser

Tras configurar el interferómetro para usar el láser como fuente de luz y el fotodiodo como detector, además de alinear sus componentes, se empezó por medir el voltaje para el máximo de intensidad en la configuración de una rendija, $I_1(\theta = 0)$, y dos rendijas, $I_2(\theta = 0)$, obteniéndose la relación $I_2(\theta = 0) = \frac{5I_1(\theta=0)}{2}$. Así pues, es posible determinar que la intensidad medida en un máximo para la configuración de doble rendija es mayor

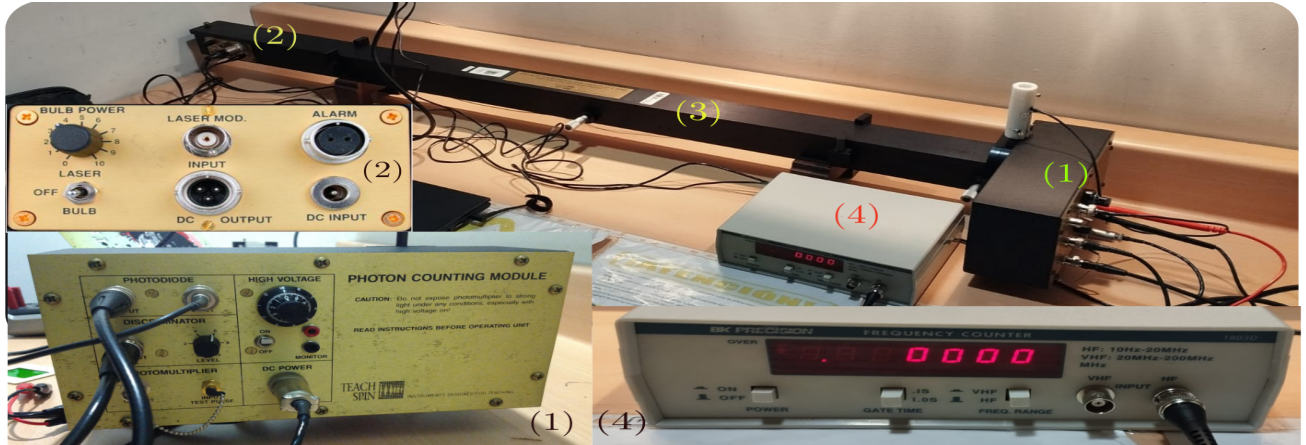


Figura 3. Montaje del experimento del fenómeno de interferencia de la luz. En la imagen se pueden diferenciar: (1) Módulo de detección, (2) módulo fuente, (3) interferómetro y (4) contador de frecuencias (TTi). Las conexiones mostradas se siguen como: Para el módulo de detección, la entrada de la división “Photodiode” está conectada al obturador, mientras que su salida se conecta, por medio de un cable BNC a cocodrilo, a un multímetro. Por otro lado, para la división “Discriminator” está conectado al TTi (4). Para la división, “Photomultiplier” tiene una salida que muestra una señal analógica que corresponde a un pulso TTL dado por la salida del discriminador. La división “DC Power” está conectada al módulo de fuente (2) y esta provee de energía al módulo de detección. Además, la división “High Voltage” tiene dos salidas para que se pueda medir el voltaje usado. Por último, en cuanto a las conexiones del módulo fuente (2), se tiene que la entrada DC está conectada a la corriente y la conexión de alarma está conectada al módulo de detección (1). Imagen (2) tomada de [6] y la imagen (1) fue tomada de [5].

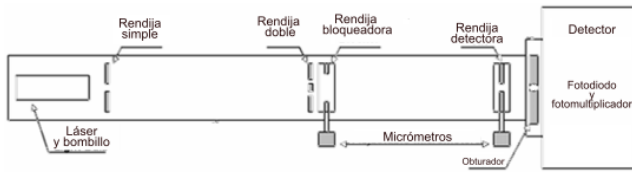


Figura 4. Esquema dentro del interferómetro. De izquierda a derecha se pueden encontrar: módulo donde se encuentran las fuentes de luz ya sea láser o bombillo; un orificio para poner una rendija simple; dos orificios, el primero para ubicar una rendija doble y un segundo para ubicar una rendija bloqueadora; seguidamente se ubica una rendija simple que sirve como detectora del patrón de interferencia; y, por último, se encuentra el módulo de detección. Nótese, además, que la rendija bloqueadora y la rendija detectora están acopladas, cada una, a un micrómetro. Imagen tomada y modificada de [6].

que la suma de las intensidades individuales de cada rendija, lo que sería posible bajo el fenómeno ondulatorio de interferencia, descrito por el modelo de Fraunhofer, por ejemplo, en las ecuaciones (1) y (2). En virtud de lo anterior, resulta posible establecer que la luz presenta un comportamiento ondulatorio. Es de notar que no se obtuvo la relación extrema de $I_2(\theta = 0) = 4I_1(\theta = 0)$ dado que la alineación del aparato no fue perfecta.

A continuación, para la configuración de doble rendija, se midió la posición del primer máximo de intensidad con respecto al máximo central, $y_1 = (700 \pm 7) \times 10^{-6} \text{m}$,

con objetivo de calcular la longitud de onda del láser siguiendo la ecuación (3) con $n = 1$, $d = (457 \pm 1) \times 10^{-3} \text{m}$ y $L = (500 \pm 1) \times 10^{-3} \text{m}$. Así pues, se obtuvo un valor de $\lambda = (0.680 \pm 0.005) \mu\text{m}$ para la longitud de onda del láser, valor preciso y exacto que se encuentra a un sigma del valor reportado por el fabricante de $\lambda = (0.670 \pm 0.005) \mu\text{m}$.

Posteriormente, se registraron los patrones de difracción para dos rendijas, la rendija izquierda y la rendija derecha, comparando los resultados obtenidos con los modelos de Fraunhofer y de Feynman y Fresnel, como se puede observar en la figura 5. De esta manera, se obtuvo un mejor ajuste a los datos experimentales con el modelo de Fraunhofer para doble rendija, y con el modelo de Feynman y Fresnel para rendijas sencillas.

Al ver los datos para la doble rendija (mostrados en la parte superior de la figura 5), en efecto, se puede ver un patrón de interferencia de la luz, lo que confirma su carácter ondulatorio.

B. Un fotón a la vez

Los datos que se tomaron en el laboratorio para la parte de “Single Photon at A Time” se perdieron debido a un error en el almacenaje de los mismos. Sin embargo, nos facilitaron datos tomados anteriormente para este experimento.

Primeramente se hizo un barrido sobre la intensidad

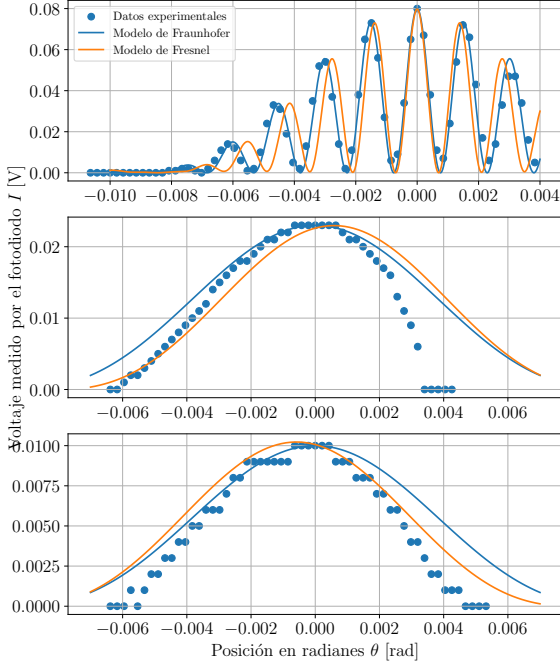


Figura 5. Datos experimentales (puntos azules) para la doble rendija, comparados con los modelos de Fraunhofer y Fresnel/Feynman para los casos en que la luz pasa por la doble rendija (superior), la rendija izquierda (mitad) y la rendija derecha (inferior). Se obtuvo un mejor ajuste a los datos medidos para la doble rendija con el modelo de Fraunhofer, mientras que el ajuste es mejor para rendijas sencillas con el modelo de Fresnel/Feynman.

del bombillo en su punto de mayor conteo de fotones (i.e. $I(\theta = 0)$) con lo que se consiguieron los resultados mostrados en la figura 6. En la figura se puede ver el comportamiento esperado en el conteo de fotones: el número de fotones aumenta con la intensidad del láser.

Por otro lado, las figuras 7 y 8 muestran el comportamiento para un único fotón al atravesar una doble rendija y una rendija simple, respectivamente.

Usando el ajuste de doble rendija, se pudo conseguir una longitud de onda para el bombillo de $\lambda = (0.320 \pm 0.01)\mu\text{m}$.

IV. CONCLUSIONES

El experimento de doble rendija permitió la obtención de datos que posibilitaron la caracterización de las fuentes de luz que se utilizaron a lo largo del experi-

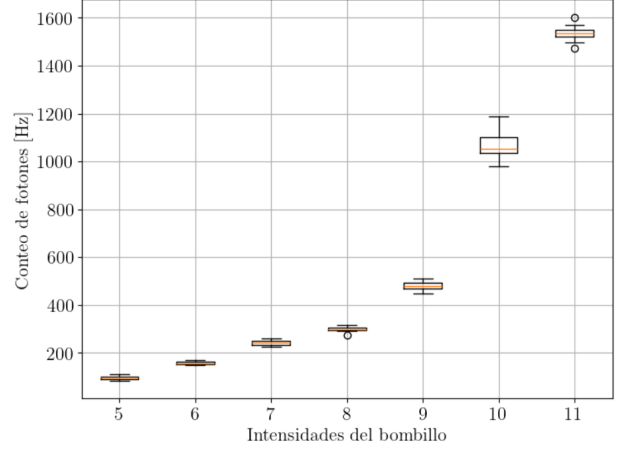


Figura 6. Diagrama de cajas y bigotes para cada intensidad del bombillo y el número de conteo de fotones en la franja con mayor intensidad. En la gráfica se puede apreciar que, en efecto, el número de fotones contados es proporcional a la intensidad del bombillo.

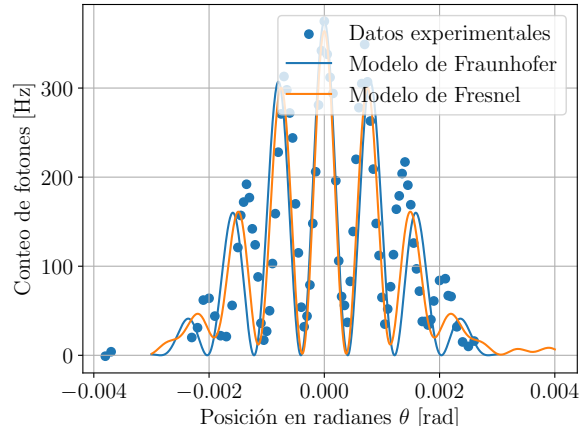


Figura 7. Datos experimentales (puntos azules) para la doble rendija, comparados con los modelos de Fraunhofer y Feynman/Fresnel para doble rendija.

mento y que además presentaban el fenómeno de interferencia consolidando, una vez más, la visualización de la dualidad onda partícula de la luz. En cuanto a la caracterización de las fuentes de luz utilizadas, se obtuvieron los valores de: $\lambda = (0.680 \pm 0.005)\mu\text{m}$ para el láser, resultado preciso y exacto que difiere en un sigma del valor reportado por el fabricante; por otro lado, para el bombillo se obtuvo un valor para su longitud de onda de $\lambda = (0.320 \pm 0.001)\mu\text{m}$ un valor inexacto pero preciso que está a 221σ del rango facilitado por el fabricante ($0.541\mu\text{m}$ a $0.551\mu\text{m}$) [6]. Si

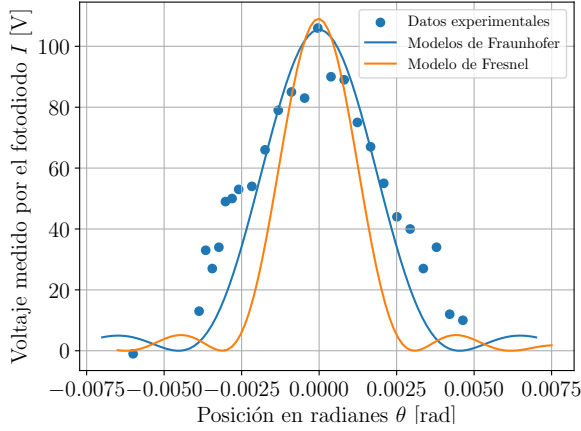


Figura 8. Datos experimentales (puntos azules) para la doble rendija, comparados con los modelos de Fraunhofer y Feynman/Fresnel para una rendija simple.

-
- [1] F. R. P., L. R. B., and S. M., *The Feynman lectures on Physics. Volume III*. (Adisson Wesley, 1965).
 - [2] F. R. P., *QED, the strange theory of light and matter* (Princeton University Press, 2006).
 - [3] S. Florian, *Quantum Physics* (Springer, 2013).
 - [4] H. Eugene, *Optics* (Addison Wesley, 2002).
 - [5] U. de los Andes, .
 - [6] I. TeachSpin, *Two-Slot interference, one photon at a time. "The Essential Quantum Paradox"*, New York (2013).
 - [7] J. P. Salas and Y. Hernández, *Ondas y fluidos* (Universidad de los Andes, 2023).

B. Propagación de error para valores calculados

Se hicieron los cálculos de propagación de error siguiendo la ecuación

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=0}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2} \quad (5)$$

donde las variables de la función $f(x_0, \dots, x_n)$ tienen incertidumbre σ_{x_i} .

Así pues, se usó la ecuación (5) para calcular la incertidumbre del cálculo de θ y la longitud de onda para el láser usado, λ . Por tanto, las incertidumbre para θ y λ son:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{L^2 + y^2} \sqrt{L^2 \sigma_y^2 + y^2 \sigma_L^2}$$

y

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\sin^2 \theta \sigma_d^2 + d^2 \cos^2 \theta \sigma_\theta^2}.$$

Donde L es la distancia entre la doble rendija y la pantalla de detección; y es la distancia entre la mitad de la pantalla y la rendija de detección; y θ es el ángulo que se forma entre la posición del máximo de intensidad, la doble rendija y la rendija detectora. Para un mayor entendimiento, véase la figura 2.

APÉNDICE DE CÁLCULO DE ERRORES

A. Incertidumbre de los aparatos de medición

Se tomaron como incertidumbres del voltímetro y posición posición del micrómetro como $\sigma_V = 0.001$ V y $\sigma_y = 0.005$ mm, respectivamente. Estos valores corresponden a la cantidad mínima que pueden medir los instrumentos que se utilizaron en el experimento.