

Dualidad de onda partícula: Experimento de doble rendija de Young

Sergio Laverde* and Samuel Hernandez**

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

(Dated: 24 de abril de 2025)

En el presente informe se reportan los resultados obtenidos a la hora de usar el montaje experimental de doble rendija con el que cuenta la universidad. En esta práctica se pretendía evidenciar la dualidad de onda-partícula. Además, se buscaba medir experimentalmente ciertos parámetros del montaje, como la longitud de onda de las diferentes fuentes que se utilizaron o la separación entre rendijas en el caso del experimento de doble rendija. En el caso de la rendija sencilla y en el caso del experimento usual usando ondas planas, se obtuvo un valor para la longitud de onda de $\lambda = (1189 \pm 23)\text{nm}$. El código de programación y los datos usado para este informe se encuentran en el siguiente repositorio: Repositorio de GitHub

I. INTRODUCCIÓN

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]. En la siguiente figura se ilustra el esquema del experimento.

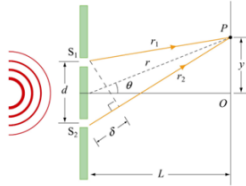


Figura 1. Esquema del experimento de doble rendija de Young. Recordemos que $L \gg d$.

En el caso de rendija, usando la aproximación de ángulos pequeños[2]:

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

Y si la usamos de nuevo:

$$I = A \left(\frac{\sin(Bx' + C)}{Bx' + C} \right)^2. \quad (1)$$

Donde $A = I_0$, $B = \frac{\pi a}{\lambda L}$, $x' = x - x_0$, C es un desfase, a el ancho de la/las rendijas, λ la longitud de onda de la luz incidente. Además, vamos a pasar x a metros para mejor visibilidad. Este ajuste es válido en ángulos pequeños donde $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \frac{x}{L}$.

En el caso de doble rendija [2]

$$\begin{aligned} I &= I_0 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \frac{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta\right)}{\left(\frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta\right)^2} \\ &= I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta\right) \frac{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta\right)}{\left(\frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta\right)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

Donde d es la distancia entre rendijas.

II. MONTAJE EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

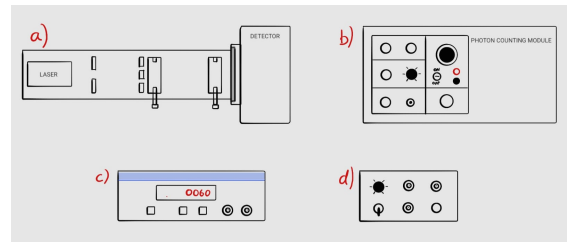


Figura 2. Montaje experimental.

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.

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

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

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 μm . 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 μm .

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 obturador 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.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Láser: Rendija sencilla

A pesar de que se siguieron todos los pasos que sugería la guía para la alineación y toma de datos, los resultados obtenidos no son lo que el modelo teórico

predice. Esto lo podemos apreciar fácilmente en la siguiente figura.

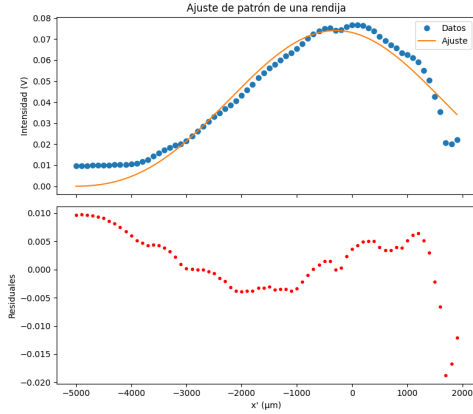


Figura 3. Datos experimentales y ajuste realizado con base en la ecuación 1. Además, podemos apreciar la poca aleatoriedad de los residuales, denotando así que el fit realizado no modela muy bien los datos.

Esto es esperable a simple vista debido a la no simetría que presenta la gráfica. Vemos cómo alcanzamos el máximo, pero la derivada de la función no es simétrica con respecto al máximo. Por lo tanto, el ajuste falla a la hora de modelar los datos. Esto lo podemos evidenciar porque además, la longitud de onda teórica era de 670nm y la que sugiere el ajuste es $\lambda = (1189 \pm 23)\text{nm}$, es decir, aproximadamente el doble a lo esperado con la teoría de Fraunhofer.

Láser: Rendija doble

Los resultados obtenidos para la toma de datos con rendija doble se presentan en la figura 4.

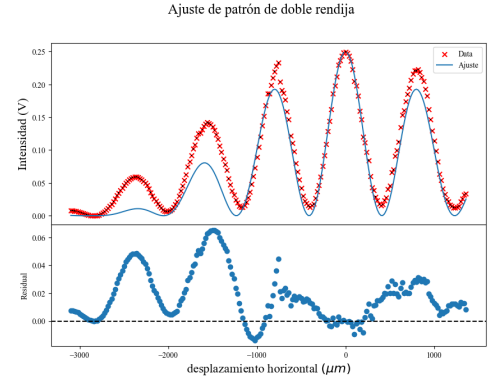


Figura 4. Datos experimentales habiendo usado rendija doble y ajuste realizado con base en la ecuación 2 mediante scipy optimize. No se consideró el residual normalizado pues la incertidumbre de la intensidad es constante. El gráfico del residual muestra que el modelo clásico escogido pierde validez cada vez más lejos del máximo global.

Con este resultado experimental se confirma la descripción de la luz como onda, ya que el patrón de interferencia evidenciado es propio del fenómeno ondulatorio de difracción.

Como se puede evidenciar en la gráfica del residual, se presenta error aleatorio cerca del máximo global y, a medida que se aleja de este, el error se considera sistemático. Para desarrollar el ajuste, se reescribió la ecuación 2 simplificada en los parámetros del ajuste (C,D) y haciendo uso de la aproximación de ángulo pequeño $\sin\theta \approx x$:

$$I = I_0 \cos^2(Dx) \frac{\sin^2(Cx)}{(Cx)^2} \quad (3)$$

Pudiendo hallar experimentalmente la longitud de onda del láser (λ) y la distancia entre rendijas (d) de la forma:

$$\lambda = \frac{\pi}{C}a, d = \frac{D}{C}a, a = 0,1\text{mm}$$

Obteniendo $\lambda = 670\text{nm}$ y $d = 356\text{nm}$, los cuales corresponden exactamente a los valores reportados por el fabricante. Esto se debe al software de scipy optimize que requiere unos parámetros iniciales (los valores reportados en este caso) desde los cuales inicia la búsqueda de los parámetros del mejor ajuste y, por tanto, se concluye que no encontró un mejor ajuste que el dado por los valores iniciales. Es por esto por lo que tampoco se reporta incertidumbres asociada a los valores hallados mediante el ajuste. Se probó con parámetros iniciales ligeramente desviados de los valores reportados; sin embargo, el ajuste continúa dando como resultado los valores iniciales.

Bombillo: Rendijas sencilla y doble

Para el caso del conteo fotón a fotón, las medidas son un poco extrañas. Esto es porque, en primer lugar, para la rendija sencilla no se observó el patrón esperado. Como se aprecia en la figura, el voltaje cambia muy drásticamente y además, después de un punto, es casi constante.

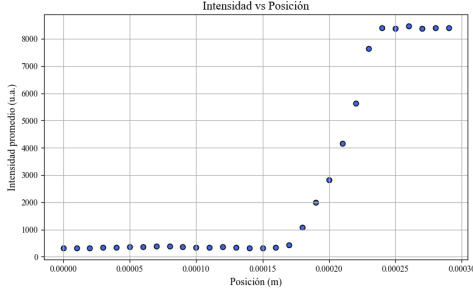


Figura 5. Gráfica para el patrón de rendija sencilla usando el conteo de fotones por punto. Podemos apreciar como la derivada del voltaje cambia muy rápido, más rápido de lo que esperaríamos. Además, el voltaje se vuelve casi constante después de un punto. Esto indica un error en la medición.

En el caso de rendija doble, pareciera que se viera mejor el patrón de interferencia. Sin embargo, lo sospechoso es que los datos se empezaron a tomar prácticamente desde el cero del micrómetro. Y aún así, el patrón nunca obtiene un valor cercano al cero. A pesar de esto, el patrón de interferencia que obtenemos sí es simétrico con respecto al máximo, lo cual nos hace conjeturar que el patrón es en efecto el de doble rendija. Esto lo evidenciamos en la siguiente figura.

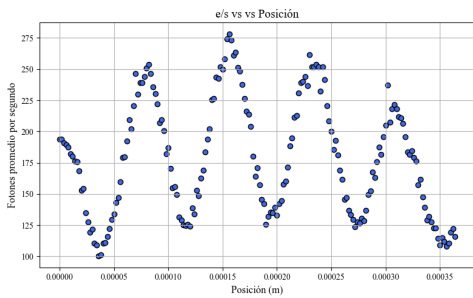


Figura 6. Patrón de interferencia para la rendija doble, usando conteo de fotones. Nótese que teóricamente, lo que estamos midiendo es $|\psi|^2$, donde ψ es la función de onda de un fotón antes de pasar por la rendija.

IV. CONCLUSIONES

A la hora de observar el patrón de interferencia con el láser de una sola rendija no se logró el ajuste esperado debido a posibles errores sistemáticos, como lo son una mala alineación o fallos en los circuitos internos del montaje experimental. Sin embargo, gracias a las 'bondades' del mismo y a mucha paciencia, se obtuvo una medida muy precisa. Esto es porque se obtuvo una precisión de 0,022. Es decir, debido al error sistemático que presentó nuestra toma de datos, no obtuvimos una medida exacta (nos alejamos 20σ), pero al menos fue precisa.

En cuanto al resultado obtenido para el láser con rendija doble, al no obtener las incertidumbres por parte del ajuste y al haber obtenido valores totalmente exactos, consideramos que el software usado no funcionó.

En el caso de las medidas realizadas con el bombillo, los patrones son bastante sospechosos y hacen pensar que algo raro estaba sucediendo con el montaje experimental. Lamentablemente, no se puede saber a ciencia cierta qué es lo que falló, ya que todo parecía ser correcto, tanto la alineación como la escogencia de las rendijas. A pesar de estas ambigüedades, los patrones no son del todo alejados de la realidad y pudimos apreciar la dualidad onda-partícula que predice la mecánica cuántica básica.

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

V. ANEXOS

A. Criterios

- Precisión: $\frac{\sigma}{X_{exp}} \leq 0,1$
- *Exactitud* := $|X_{real} - X_{exp}| \leq 3 \cdot \sigma$

B. Apéndice de cálculo

■ Propagación de errores:

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma x_i \right)^2} \quad (4)$$