

# Experimentos Básicos de Interferencia de un Fotón

Andrés Schlieff - 200816046\* and Sebastián Restrepo - 200823523\*\*  
Universidad de los Andes  
(Dated: 30 de Noviembre de 2011)

## OBJETIVOS

- Recrear el experimento de Young (experimento de la *doble rendija*) para un sólo fotón y recrear el patrón de interferencia característico del experimento.
- Desarrollar el montaje del interferómetro de Mach-Zehnder con el fin de tomar datos de interferencia con un fotón a futuro.

## MARCO TEÓRICO

En 1905 Einstein introdujo la idea de considerar la luz como pequeños paquetes discretos e indivisibles. Aunque en un principio esta idea se propuso de forma heurística hoy en día sabemos que la luz puede comportarse o como partícula o como onda bajo diferentes condiciones físicas. Esto es lo que se conoce como la dualidad onda-partícula de la luz. El carácter de partícula en la luz viene dado al considerarla luz como partículas energéticas sin masa llamados fotones (estos son los cuantos de los que Einstein hablaba).

El carácter ondulatorio de la luz es un fenómeno altamente comprendido y estudiado. Una de las formas de evidenciar este comportamiento es mediante un interferómetro, que consiste en dividir la luz proveniente de una misma fuente en dos trayectorias distintas para luego recombinarla observando patrones de intensidad. En este proyecto se realizó el montaje del interferómetro de Young y se dio inicio al montaje Mach-Zehnder.

Si se considera ahora la luz como una partícula, resulta complicado entender los fenómenos de interferencia. En un interferómetro al dividir la luz en dos trayectorias distintas creeríamos que el fotón solo puede ir por una. Por ejemplo en el experimento de doble rendija se esperaría que el fotón pase por una sola de las dos rendijas y no genere ningún patrón de interferencia. Si observáramos la pantalla donde impactan los fotones luego de pasar por alguna de las dos rendijas esperaríamos observar lo siguiente:

Sin embargo, esto no es lo que sucede. El patrón mostrado en la *figura 1* solo se presenta cuando conocemos la trayectoria del fotón, es decir sabemos por cual rendija pasó. En el caso de no saberlo, se observa un

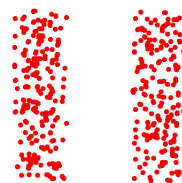


Figura 1: Patrón que se esperaría observar en el experimento de doble rendija al tratar la luz como una partícula.

patrón de interferencia como el de la *figura 2*.

No tener información sobre la rendija por la cual pasa el fotón es crucial para que se presente un patrón de interferencia. Una forma de entender esto es pensar que cuando no sabemos por que rendija pasa el fotón, es decir no se ha realizado ninguna medición sobre el sistema, este se encuentra en una combinación lineal de varios estados y al hacer una medición sobre el sistema, colapsa la función de onda haciendo comportar al fotón como una partícula (no hay interferencia).

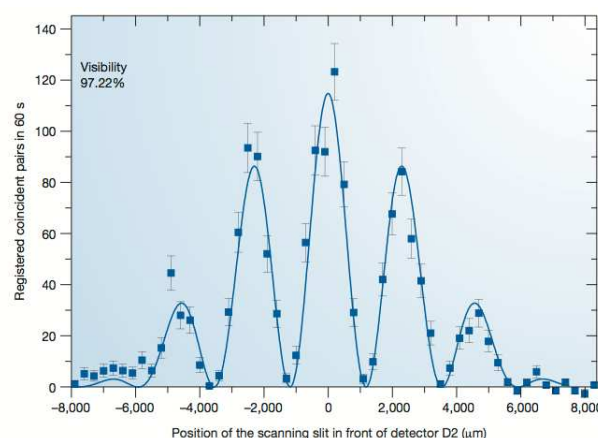


Figura 2: Patrón que se observa en el experimento de doble rendija al no tener información sobre la trayectoria de los fotones. Tomado de [2]

## MONTAJE EXPERIMENTAL

### Doble Rendija

Un cristal no lineal de  $\beta$ -borato de bario (BBO) es usado como fuente de pares de fotones enredados. Estos fotones se obtienen a partir de un proceso llamado conversión paramétrica espontánea (SPDC) que enreda los fotones en alguna variable continua (frecuencia o momentum).

Como se muestra en el esquema (*figura 4*) un fotón va dirigido al detector 1 y el otro hacia la doble rendija. Los detectores envían una señal al computador cada vez que detectan un fotón. Y este muestra el número de coincidencias en los detectores para algún intervalo de tiempo dado. Cuando se detectan coincidencias significa que el fotón dos al pasar por la doble rendija interfiere consigo mismo constructivamente mientras que cuando el número de coincidencias disminuye significa que el fotón presenta interferencia destructiva.

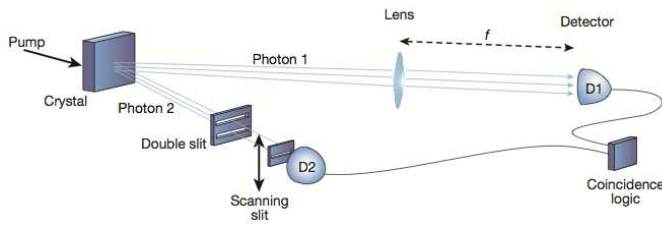


Figura 3: Montaje para interferómetro de doble rendija.

El patrón de intensidad para un interferómetro de doble rendija (*figura 2*) está dado por [4]:

$$\frac{I(\theta)}{I_0} = \frac{\sin^2 [(kd/2)\sin\theta]}{[(kd/2)\sin\theta]^2} \cos^2 [(kd/2)\sin\theta] \quad (1)$$

Donde  $I_0$  es la intensidad máxima del patrón,  $\theta$  el ángulo entre la doble rendija y el detector (*figura 4*),  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $d$  es el ancho de cada rendija y  $a$  su separación. Los máximos de este patrón ocurren cuando:

$$\theta = \frac{n\lambda}{a}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

En el montaje realizado, el patrón de intensidad se obtiene como función de la distancia  $x$  y no el ángulo. Como las distancias registradas son muy pequeñas (del orden de  $mm$ ) el ángulo se aproxima como:  $\sin\theta \approx \theta \approx x/r$ .

Para el montaje  $a = 0,356mm$  y  $\lambda = 810nm$  por lo que se espera que la distancia entre máximos sea de  $1,23mm$ .

Se desarrollaron 5 resultados distintos para el patrón de interferencia de doble rendija. A continuación se muestran sus respectivas gráficas y se explica el montaje de cada uno

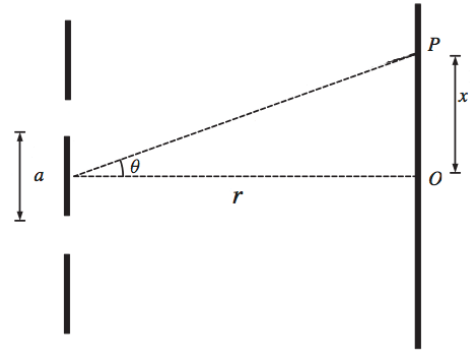


Figura 4: Dado el tamaño de los ángulos se usa la aproximación  $\theta \approx x/r$ .

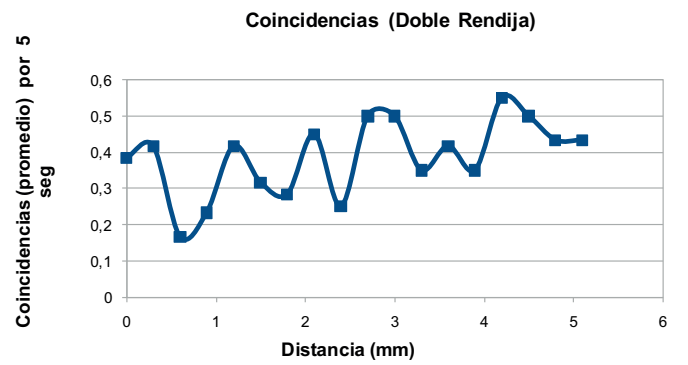


Figura 5: Gráfica de coincidencias. Datos tomados el 19 de Septiembre.

Se tomaron datos del número de coincidencias en 5 segundos durante 5 minutos para varias posiciones del detector. Las posiciones del detector estuvieron dentro de un barrido horizontal de 5 mm dando pasos de 0,3 mm. Para cada duración de 5 min se promedió el número de coincidencias cada 5 segundos. En este montaje la rendija sencilla es independiente del detector.

Posteriormente se dejó el detector fijo y se realizó el barrido únicamente con la rendija sencilla. Además de esto, previo a la medición, se ubicó la doble rendija de tal forma que se optimizara el número de coincidencias. La medida se realizó igual que en la segunda semana, pero en este caso las coincidencias en 5 segundos se tomaron para una duración de 4 minutos.

Con base en los resultados obtenidos se procedió a hacer un barrido con la doble rendija dando pasos de 0,05 mm recorriendo una distancia total de aproximadamente 4 mm. Se tomaron los datos de coincidencias en 5 segundos durante 1 minuto para los puntos del barrido.

Dado el pico que se presenta cerca a los 12 mm. Se propuso realizar una medición para valores de posición en este rango dando pasos un poco más gruesos, pues

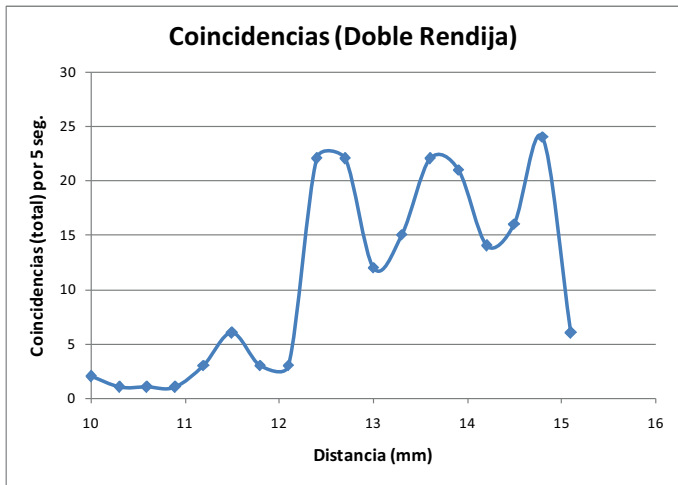


Figura 6: Grafica de coincidencias. Datos tomados el 19 de Septiembre.

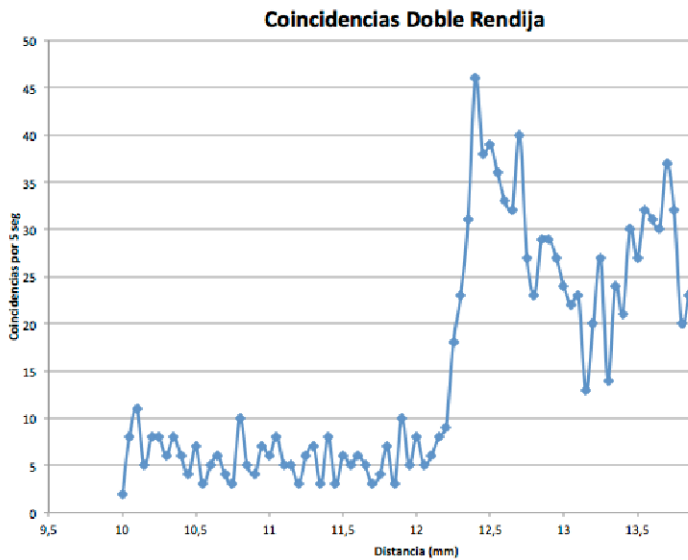


Figura 7: Grafica de coincidencias. Datos tomados el 03 de Octubre

no hubo mayor ganancia al disminuir tanto el ancho del paso. El 10 de Octubre se tomaron datos de coincidencias en 5 segundos durante 2 minutos para pasos de 0,1 mm.

Es claro que la grafica no muestra el patrón de interferencia esperado y que además no debería de estar restringido a posiciones entre 12 y 15 mm. Dados que el patrón muere al inicio y al final de la gráfica se concluyo que se había cometido un error al hacer la rendija sencilla independiente del detector (recordar que el barrido se realizó con la rendija sencilla dejando el detector quieto).

Al realizar el barrido con el detector quieto solo se logra cubrir 4 mm, lo que debe corresponder al campo

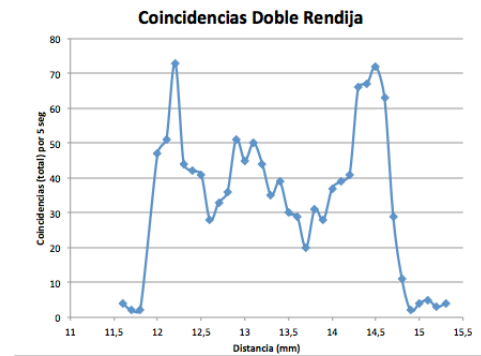


Figura 8: Grafica de coincidencias. Datos tomados el 10 de Octubre

de visión del detector. Es decir que la grafica obtenida solo muestra una parte del patrón de interferencia. El patrón abarca un rango de posición mucho mas grande a 4 mm. Con base en los resultados se toma la decisión de regresar al montaje inicial (12 de Septiembre) donde la rendija sencilla va ajustada al detector.

Se tomaron datos de coincidencias en 5 segundos durante 2 minutos para pasos de 0,1 mm, realizando un barrido total de 8 mm. Los resultados corroboraron la hipótesis del error en el bloqueo del campo de visión en el detector.

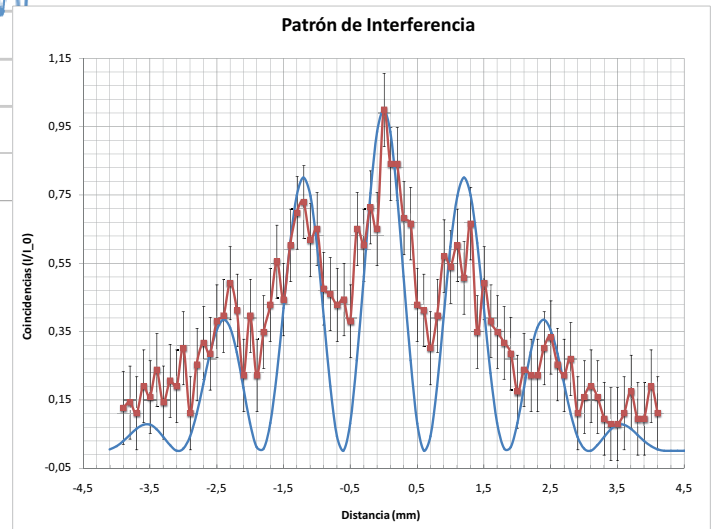


Figura 9: Grafica de coincidencias. Datos tomados el 10 de Octubre

Como se obtuvo el patrón de interferencia esperado se procedió a iniciar el montaje de Mach-Zenher. Un esquema del montaje se muestra a continuación.

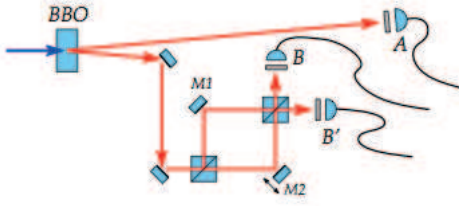


Figura 10: Interferómetro Mach-Zenher

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

El ajuste de los resultados con la grafica teorica muestra un gran ajuste. Para cuantificar el error se calcula ,a partir de la grafica, la distancia entre pico y pico. Usando el pico central y el primer pico a la izquierda se obtiene una distancia de  $1,2\text{ mm}$  que al comparar con el valor teorico de  $1,23\text{ mm}$  se obtiene un error del  $2,4\%$ . Los resultados muestran que efectivamente el foton interfiere consigo mismo constructiva y destructivamente dando como resultado el patron de interferencia mostrado en la figura anterior. Particularmente, fijando la longitud de onda del láser y la distancia entre rendijas, se predice un grosor de la rendija de  $0,091$ , mientras que la del fabricante es  $0,085$ , lo que implica un error de aproximadamente el  $8\%$ .

## CONCLUSIONES

- Se reporta un error relativo del  $2,3\%$  entre la distancia pico-pico medida ( $1.2\text{ mm}$ ) y la teórica ( $1.3$

$\text{mm}$ ). Además de esto, fijando la longitud de onda a  $810\text{ nanómetros}$ , se observa una predicción del grosor de las rendijas con un error relativo del  $8.7\%$  respecto al valor del fabricante.

- Efectivamente el foton interfiere consigo mismo, mostrando así una dualidad partícula-onda que es característica de la luz. Particularmente, los máximos corresponden a interferencia constructiva del foton consigo mismo, mientras que mínimos corresponden interferencia destructiva.
- Respecto al Interferómetro de Mach-Zender, se tiene alineado y listo para tomar mejores datos.

## REFERENCIAS

- [1] Mark Fox *Quantum Optics An introduction*. Oxford Master Series in Atomic, Optical and Laser Physics. 2006
- [2] Zeilinger A, Weihs G, Jennewein T, Aspelmeyer M. *Happy centenary, photon*. Nature 433, 230-238 (20 January 2005)
- [3] Brett J. Pearson and David P. Jackson. *A hands-on introduction to single photons and quantum mechanics for undergraduates* American Journal of Physics – May 2010 – Volume 78, Issue 5, pp. 471
- [4] George C. King *Vibrations and Waves*. Manchester Physics Series. 2009

---

\* Electronic address: af.schlieff225@uniandes.edu.co

\*\* Electronic address: s.restrepo55@uniandes.edu.co