



Borrador Cuántico

Sergio Castrillon y Samuel Quitian

Instituto de Física. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad de Antioquia UdeA, Calle 70 No. 52-21, Medellín,
Colombia.

Diciembre 2020

Resumen

En este trabajo se recrea el experimento de la doble rendija usando un alambre como objeto difractante de doble camino¹ y un par de polarizadores lineales para obtener la información sobre el camino que elige un grupo de fotones, los cuales pasarían a portarse como partícula, perdiéndose así el patrón de difracción. Posteriormente se busca eliminar la información obtenida al polarizar nuevamente los grupos de fotones de cierta manera; recuperando de nuevo el patrón. Según lo esperado, se obtuvieron los resultados predichos, además, se hizo una simulación computacional del experimento obteniendo resultados semejantes a los obtenidos experimentalmente.

Palabras clave: Difracción, onda, partícula, polarización.

1. Introducción

El experimento de la doble rendija fue realizado por primera vez en 1801, usando luz, por Thomas Young buscando probar si la luz tenía naturaleza de onda o partícula. El montaje de este consiste en un haz de luz que impacta contra dos rendijas que lo dividen en dos, cada uno pasando por una rendija. El resultado de esto se ve al proyectar en una pared o pantalla, de lo que se obtuvo un patrón de difracción, lo cual infiere que la luz se comporta de manera ondulatoria.

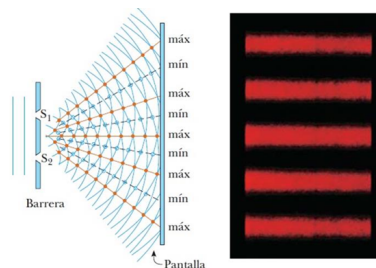


Figura 1: Comportamiento ondulatorio en el experimento de la doble rendija [1]

¹La onda incidente se divide en dos ondas que siguen dos caminos diferentes

Difracción

La difracción es un fenómeno que se presenta cuando una onda choca con un obstáculo o pasa por una abertura, los efectos que esto genera son perceptibles cuando la longitud de onda de la onda no es mucho menor que el tamaño de los objetos.

Para explicar este fenómeno se utiliza el principio de Huygens² y el principio de superposición³. En el caso de la doble rendija o un obstáculo vertical largo como un alambre se producen un número infinito de ondas que se pueden aproximar a dos nuevas ondas que siguen dos caminos diferentes y posteriormente interfieren.

Complementariedad

El principio de complementariedad postulado por Niels Bohr dice que los objetos tienen ciertas propiedades complementarias que no pueden ser medidas u observadas simultáneamente. La dualidad onda-partícula es una de estas propiedades, en donde al observar un objeto físico, este no puede presentar un comportamiento preciso de onda y de partícula al mismo tiempo, en otras palabras, si se mide con precisión una de estas propiedades; la otra no se puede observar. Para medir si la luz se comporta como partícula en el experimento de la doble rendija, se mide por qué camino pasa esta, a diferencia de una onda que pasa por ambos lados; debido a esto el patrón de difracción desaparece.

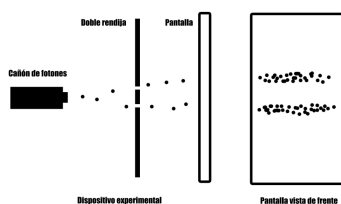


Figura 2: Comportamiento corpuscular en el experimento de la doble rendija[4]

Polarización

Las ondas transversales como la luz oscilan en un plano perpendicular a la dirección de propagación, la polarización de esta dice en qué sentido oscila en el plano. En el caso de una partícula, los fotones tienen también estados de polarización. Un polarizador lineal es un filtro que cambia la intensidad y la polarización de la luz, este tiene un eje de transmisión que al pasar la luz a través del polarizador cambia su estado de polarización a una proyección sobre este eje, si la luz tiene una polarización lineal perpendicular al eje de transmisión; no habrá componente sobre este y no pasa luz como lo dicta la ley de Malus⁴.

Borrado cuántico

Al poner un polarizador horizontal y uno vertical en cada lado del alambre se "marcan" los fotones con un estado de polarización asociado al camino que tomo el fotón, debido a esto el patrón de difracción debe desaparecer. Posterior a esto con un tercer polarizador lineal se puede escoger uno de estos caminos marcados o que ambos puedan pasar con un mismo estado de polarización posterior, lo que sería

²Ver pág. 104 de [2]

³ver pág. 156 de [3]

⁴Ver pág. 332 de [2]

borrar la información acerca de por cual camino pasaron los fotones; de esta forma ya no se mide la propiedad corpuscular de luz y nuevamente debe aparecer un patrón de difracción. Lo descrito anteriormente viene siendo el Borrador Cuántico, cuya función es borrar la información asociada al comportamiento corpuscular del objeto.

Teniendo en mente todo esto, el objetivo principal del trabajo es mostrar estos fenómenos con un haz de luz láser que consiste en un grupo de fotones, demostrando que estos se comportan como partícula al tener conocimiento sobre cual camino toman, lo cual esta ligado a un comportamiento corpuscular, y que si posteriormente se borra esta información; se recupera el comportamiento ondulatorio.

2. Materiales y métodos

Para lograr los objetivos planteados se dispuso de los siguientes materiales:

- Láser
- Alambre delgado
- Polarizadores (lentes de gafas 3d)
- Soporte
- Pantalla o pared
- Cámara: para tomar datos

Primero se hace pasar un haz de luz láser rojo, a través de un alambre delgado y debido a esto se genera un patrón de difracción. Luego, de manera perpendicular al eje de propagación del haz, se ubica cerca al alambre un juego de 2 polarizadores lineales puestos de manera horizontal y vertical respectivamente, uno a cada lado del alambre, de tal modo que la unión de ambos quede justo atrás del alambre. En la Fig.3, se muestra un esquema de esto.

Puesto que los polarizadores son de gafas 3d, estos no son polarizadores lineales puros si no que están compuestos por un polarizador lineal y una lamina de cuarto de onda, debido a esto hay que fijarse al momento de poner los polarizadores que estén orientados de tal manera que la luz salga polarizada linealmente ya sea de manera horizontal o vertical.

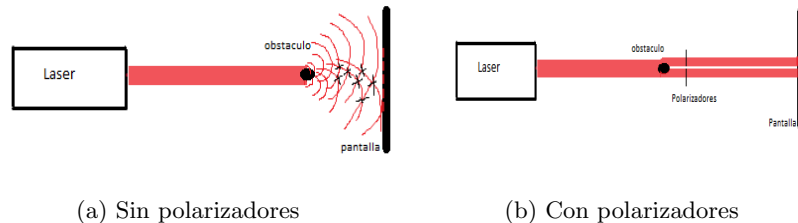
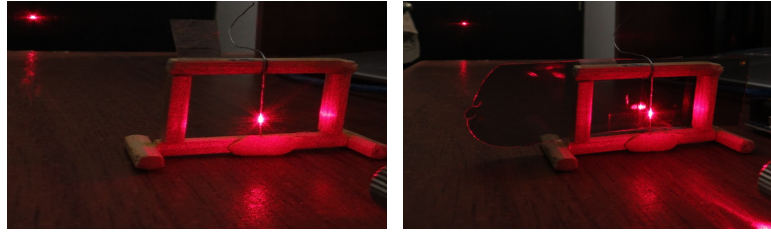


Figura 3: Esquema Experimental

Hay que tener cuidado al momento de juntar los polarizadores, entre ellos no puede quedar ningún espacio y al ponerlos detrás del alambre, este debe quedar sobre la unión de ellos para evitar efectos no deseados. Debido a esto es que se realiza el experimento con un alambre y no con un objeto de menor tamaño como

un pelo. Otro aspecto a tener en cuenta es que el alambre debe estar en una posición fija y recta, para lograr esto se construye un soporte donde se coloca el alambre y del otro lado se colocan los polarizadores como se muestra finalmente en Fig. 4.



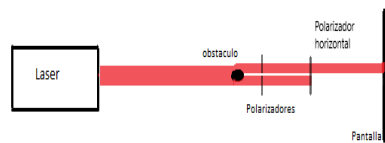
(a) Sin polarizadores

(b) Con polarizadores

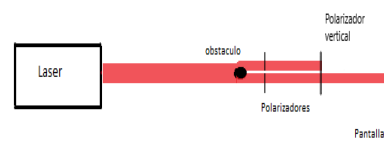
Figura 4: Montaje Experimental

Elección de caminos y borrado de información

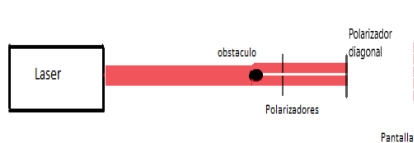
Con esta configuración el patrón de difracción se debe perder, para poder recuperar el patrón de difracción o elegir el camino deseado se introduce un nuevo polarizador lineal que se coloca de tres distintas maneras: Primero se pone de manera que su eje de transmisión quede horizontal de tal modo que la luz que esta polarizada verticalmente no pase, en este caso solo pasando la polarizada horizontalmente. Después se coloca verticalmente y pasa el efecto de manera inversa pasando solo la componente vertical. Por ultimo, se coloca el polarizador de manera diagonal a 45° o -45° de esta forma la luz de ambos caminos cruza de la misma manera, quedando polarizada linealmente de manera diagonal y perdiendo así la información sobre por cual camino pasaron los fotones. El esquema de esta configuración y su implementación se muestran en la Fig. 5.



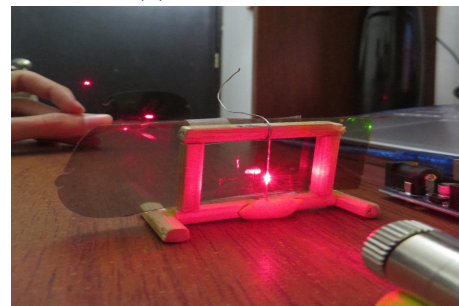
(a) Horizontalmente



(b) Verticalmente



(c) Diagonalmente



(d) Montaje

Figura 5: Esquema y Montaje Experimental

Simulación

La luz al chocar con un obstáculo genera un patrón de difracción que según el principio de Babinet[7] es equivalente a tener una rendija de la misma medida y forma. Para la parte computacional se usa la librería LigthPipes, que es una librería con clases y métodos predefinidos de óptica. En Fig. 6. se muestra una parte de este documentado, pero se deja un anexo al final del artículo para visualizar el código y poder estudiarlo más a profundidad.

```
7 wave=1000 #Ancho del haz gaussiano del obstaculo
8 wide2=10*mm #Ancho del area polarizada
9 height=100*mm # Altura del cabello
10 lambda_ = 650*nm #Longitud de onda
11 size = 50*mm #Tamaño del campo
12 N = 1000 #Dimensión del campo
13 r=6*mm #Radio del haz gaussiano
14 Theta=[]
15 #Creamos un arreglo del angulo
16 for i in range(N):
17     Theta.append((-size/N+i*size/N)/mm)
18
19 #Definimos el campo electrico y la forma del haz
20 F = Begin(size, lambda_, N)
21 F=GaussBeam(F,r)
22
23 #Definimos un obstaculo en elcentro y propagamos una distancia pequeña. Esto simula el espacio entre el pelo y los polariz
24 F=RectAperture(wide,height,0*mm,F)
25 F=Forvard(0.02*m,F)
26 #I=Intensity(0,F);
27
28 # Se simula un obstaculo que bloquea la mitad del campo. La luz que se deja pasar se considera que pasa por el polarizador 1
29 F1=RectScreen(wide2,height,-4.9*mm,F)
30 #Propagamos hasta la pantalla de observacion.
31 F1=Forvard(.5*m,F1)
32
33 # Se simula un obstaculo que bloquea la mitad del campo. La luz que se deja pasar se considera que pasa por el polarizador 2
34 F2=RectScreen(wide2,height,4.9*mm,F)
35 #Propagamos hasta la pantalla de observacion.
36 F2=Forvard(.5*m,F2)
37
38
39
40 #Defnimos entonces una nueva intensidad donde asumamos la contribución de los haces que pasaron por los polarizadores
41 def I(F1,F2,gamma):
42     E1=F1.field
43     E2=F2.field
44     I1=Intensity(0,F1)
45     I2=Intensity(0,F2)
46     Intensidad_Resul=I1+I2+(E1*np.conj(E2)*np.cos(gamma)+np.conj(E1)*(E2)*np.cos(gamma))
```

Figura 6: Código

Definimos la función de intensidad(1) resultante para dos ondas polarizadas linealmente con un ángulo θ entre sus estados de polarización.

$$I(x, y, z, t) = I_1 + I_2 + E_1 e^{i\phi_1} E_2 e^{-i\phi_2} \cos(\theta) - E_1 e^{-i\phi_1} E_2 e^{i\phi_2} \cos(\theta) \quad (1)$$

Donde I_1 y I_2 es la intensidad inicial de la onda 1 y 2 respectivamente.

3. Resultados y discusión

Los resultados experimentales obtenidos se basan en una serie de imágenes tomadas de cada uno de los casos mencionados anteriormente, con estas imágenes se obtiene también datos de intensidad de los patrones obtenidos, esta intensidad es normalizada y se presentan gráficas de como varia esta respecto a la distancia en píxeles del centro del patrón donde debe estar el máximo global. Se obtuvo inicialmente al difractar la luz en el alambre el patrón de difracción mostrado en Fig. 7.

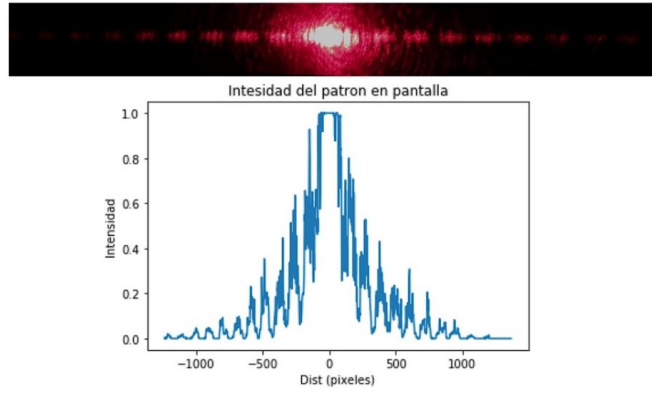


Figura 7: Patrón de difracción generado por un alambre

Se observa claramente la periodicidad de los máximos y mínimos, lo cual corresponde a un patrón de difracción debido a una abertura y por tanto a un obstáculo.

Luego se colocan los polarizadores Fig. 4.b, y se obtiene que el patrón se pierde tal como predice la ecuación (1) ya que tenemos dos ondas polarizadas linealmente con un ángulo de polarización entre ellas de 90 grados, y desde la perspectiva cuántica, se tienen marcados los fotones dependiendo del camino que siguen con una respectiva polarización; de esta forma comportándose como partículas.

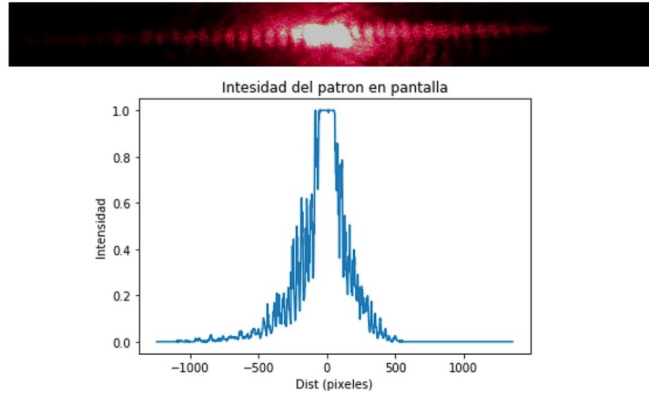


Figura 8: Perdida del patrón al poner el arreglo de polarizadores

En Fig.8, se observa lo dicho en el párrafo anterior, como la luz se concentra solo en el centro y decae casi de manera gaussiana con la distancia al centro. El Patrón de difracción residual que se alcanza a observar puede ser generado por la unión entre los polarizadores ya que no están perfectamente unidos y puede haber algún espacio entre ellos, como también haber sido que cambian su comportamiento en esa región al haber sido cortados.

Se tiene que al posicionar el tercer polarizador de manera perpendicular a uno de los dos ubicados inicialmente se pierde la información de la derecha Fig. 9.a, o de la izquierda Fig 9.b según como se ubique este, sabiendo así cuales fueron los fotones que pasaron por cada camino.

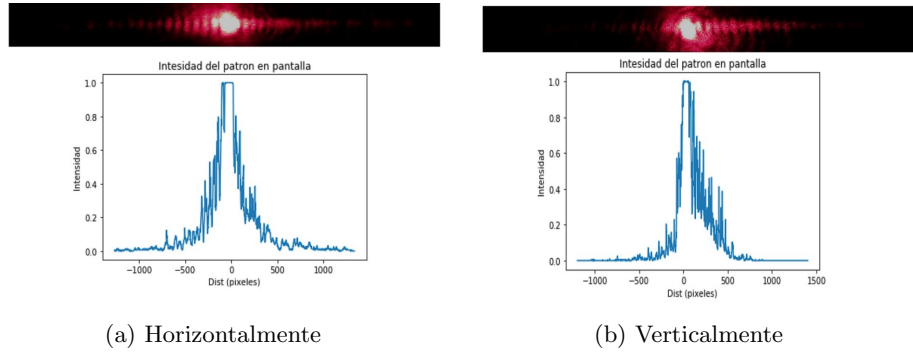


Figura 9: Intensidad obtenida en la pantalla al poner el tercer polarizador

Por ultimo se tiene el patrón recuperado en la Fig. 10, que se obtiene al poner el polarizador de manera diagonal ya sea a 45° o -45° respecto de la horizontal, de esta forma se recupera el patrón de difracción al borrar la información acerca de cual camino cogen los fotones y la diferencia entre los patrones recuperados a diferente ángulo es que se intercambia la posición de los máximos y mínimos.

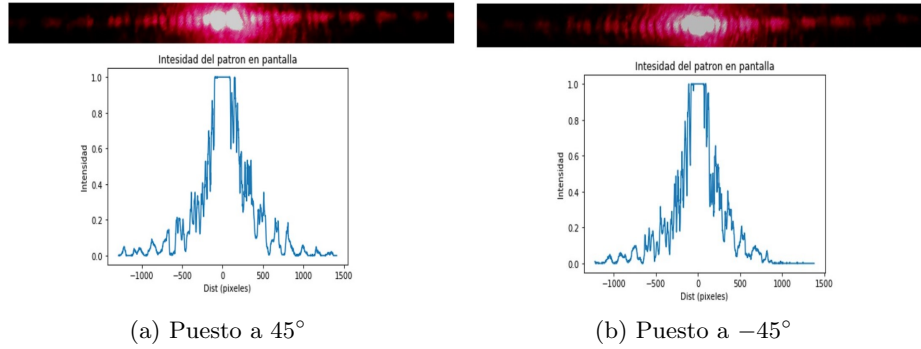


Figura 10: Patrón de difracción recuperado

Como resultado adicional se vario lentamente el ángulo del tercer polarizador, esto mostró que el patrón de difracción se recuperaba y perdía de a poco y no era un efecto inmediato, esto se puede asociar con el principio de complementariedad al ir adquiriendo más precisión en la medida de una propiedad pero en la otra va creciendo la incertidumbre. Esto se observo en un vídeo hecho del que se muestra unos fotogramas en la Fig. 11.

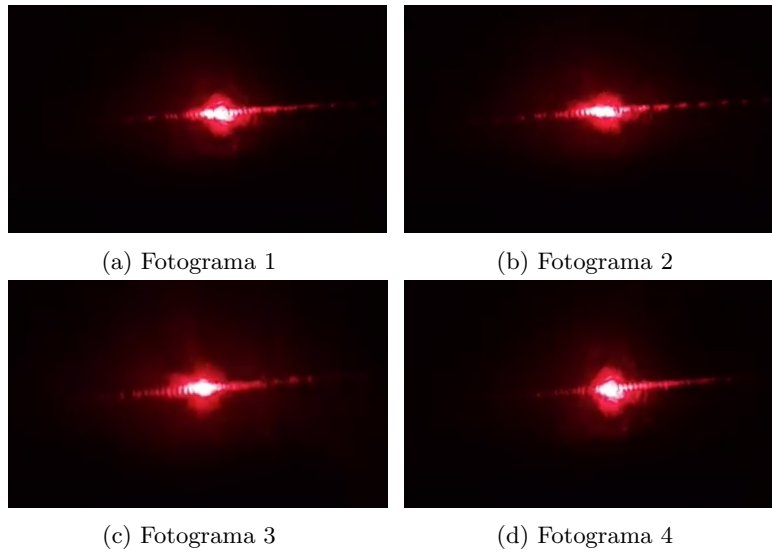


Figura 11: Evolución del patrón de difracción conforme se rota el polarizador

Comparación con la simulación computacional

Se obtuvieron las siguientes gráficas de intensidad para el patrón de difracción recuperado.

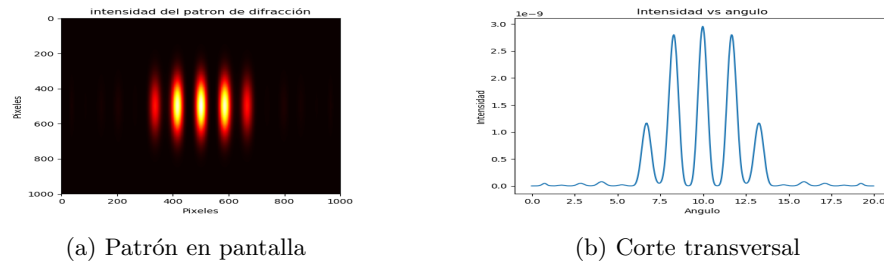


Figura 12: Patrón de difracción computacional

Se observa el patrón de difracción, la serie de franjas y los máximos principales y secundarios (Fig. 12), propios del principio de difracción a través de una abertura. Luego se ubican los polarizadores y se tiene que el patrón de difracción se pierde (Fig. 13), ya que según la ecuación (1) se obtiene que al estar las ondas con polarización perpendiculares, el patrón de difracción desaparece, obteniendo una mancha que se difumina de manera casi gaussiana como lo obtenido en Fig. 8.

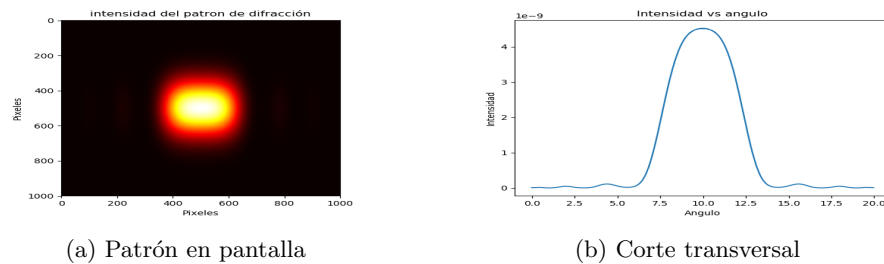


Figura 13: Mancha gaussiana de intensidad

Luego se ubica un tercer polarizador de manera perpendicular al eje de propagación y a uno de los polarizadores iniciales, por la ley de Malus sabemos que la intensidad se anula y se elimina la luz correspondiente a ese camino en la pantalla.

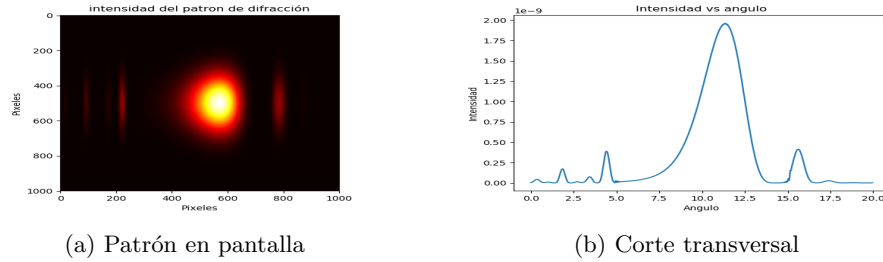


Figura 14: Intensidad debido a un tercer polarizador vertical

Se obtiene que el máximo se desplaza hacia la derecha(fig 14) debido a la presencia de un tercer polarizador puesto de manera vertical como en Fig. 9.b.

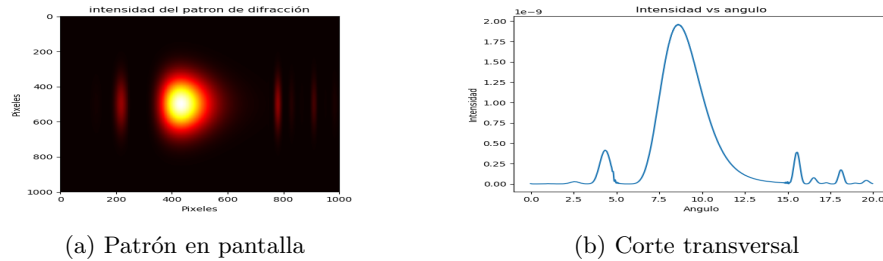


Figura 15: Intensidad debido a un tercer polarizador horizontal

Se obtiene que el máximo se desplaza hacia la izquierda(Fig 15 al igual que en el caso anterior debido a la presencia de un tercer polarizador puesto de manera horizontal como en Fig. 9.a.

4. Conclusiones

- Debido a que la unión entre los polarizadores no es perfecta y puede quedar algún espacio entre estos se generan algunos efectos no deseados, que también pueden deberse a que el cable no está justo delante de la unión, lo cual es uno de los retos experimentales del trabajo.
- Se le pudo dar una explicación semi-clásica a los fenómenos vistos a partir de la ecuación (1) y de pensar que una onda no puede interferir del todo con otra de distinta polarización, pero desde una perspectiva cuántica el haz está compuesto por muchos fotones y en este caso la polarización de estos está ligada con su camino recorrido.
- Se observó de manera experimental el fenómeno del borrado cuántico, bajo las aproximaciones semi-clásicas planteadas y estos resultados concordaron con los obtenidos en la simulación computacional.
- Como propuesta para futuras investigaciones se busca responder cuál es la naturaleza de este experimento como está planteado acá y si se puede hallar otra forma que también sea práctica para ver este fenómeno.

- De los resultados se ve que un lado de los patrones obtenidos fue de menor intensidad, esto nos lleva a pensar que el haz puede estar polarizado desde el principio o que es un efecto debido a los polarizadores que no son perfectos y al ser de gafas 3d no es un polarizador lineal puro.
- A partir de los resultados experimentales y computacionales obtenidos, se propone como una solución sencilla y de bajo costo para que estudiantes de áreas básicas de física logre entender fenómenos como el experimento de la doble rendija de Young, ley de Malus, borrado cuántico, entre otras.

Referencias

- [1] Recuperado de: <https://3.bp.blogspot.com/-xglgSSAE0bw/WAOSlnhC1kI/AAAAAAAAAGwM/5Cc-Rwh2xqok8R4y4enHiK4RbcNsogMugCLcB/s640/youn33.jpg>
- [2] Hecht, E. (1998). Optics (4th ed.). Addison Wesley.
- [3] Alzate, H. (2006). Física de las Ondas. Universidad de Antioquia.
- [4] Recuperado de: <https://mientrasenfisicas.files.wordpress.com/2016/12/psot-doble-rendija.jpg?w=1000>
- [5] Bastidas, V. Chaparro, L. Borrador Cuántico. (2007) Universidad de los Andes.
- [6] Hillmer, R. Kwiat, P. A Do it Yourself Quantum Eraser. (2007) Scientific American. pp. 90-95.
- [7] Óptica R.W. Ditchburn

Anexos

- <https://github.com/castri85/F-sica-experimental>