



GRADO EN FÍSICA

LABORATORIO DE FÍSICA III

CURSO 2015-2016

1^{er} CUATRIMESTRE

LABORATORIO DE ÓPTICA

PRÁCTICA: Interferencia de Young en régimen cuántico

1. Objetivos:

- Registro de patrones de interferencia a alta intensidad. Determinación de la longitud de onda de una fuente de luz.
- Interpretación cuántica de la interferencia de fotones.
- Borrado cuántico.

2. Fundamentos físicos:

2.1 Interferómetro de Young

Cuando dos ondas de la misma frecuencia y una diferencia de fase entre ellas constante en el tiempo se superponen en la misma región del espacio, el campo resultante tiene una distribución de intensidad que es estable en el tiempo y puede ser observada.

Para producir ese par de ondas podemos, por ejemplo, partir de una onda original y seleccionar dos partes de su frente de onda con dos rendijas, que se convertirán en fuentes secundarias de radiación (Fig. 1).

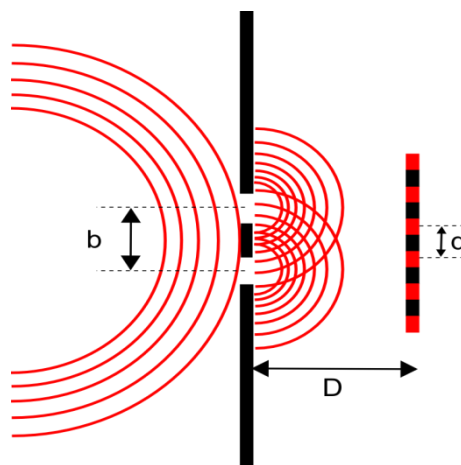


Figura 1. Esquema de interferencias por partición del frente de onda

Si observamos en un plano que se encuentra a distancia D del plano donde se encuentran ambas rendijas veremos una figura de interferencia con máximos de intensidad consecutivos separados por una distancia d ,

$$d = \frac{D\lambda}{b}, \quad (1)$$

donde b es la separación entre rendijas y λ la longitud de onda de la fuente utilizada. De manera que midiendo la separación entre máximos podemos deducir la longitud de onda de la fuente. Mediremos en el plano de Fraunhofer (plano del infinito) colocando una lente convergente de focal f' después de las rendijas, que traerá el plano del infinito a su plano focal. En este caso la distancia entre máximos es

$$d = \frac{f'\lambda}{b} \quad (2)$$

Por tanto, podemos medir la longitud de onda de la fuente a partir de la distancia d entre máximos consecutivos.

Las fuentes secundarias de radiación producirán la interferencia arriba descrita siempre que la fuente original sea coherente espacialmente, es decir que conocido el campo en un punto de la fuente, se conozca el campo en cualquier otro. Muchas fuentes extensas no son coherentes espacialmente, de modo que para realizar adecuadamente este experimento se debe seleccionar una primera porción de la fuente primaria con una rendija para que actúe como fuente puntual y ganar coherencia espacial. Los láseres son fuentes coherentes espacialmente, pero las lámparas de descarga, los LED y las bombillas de filamento no.

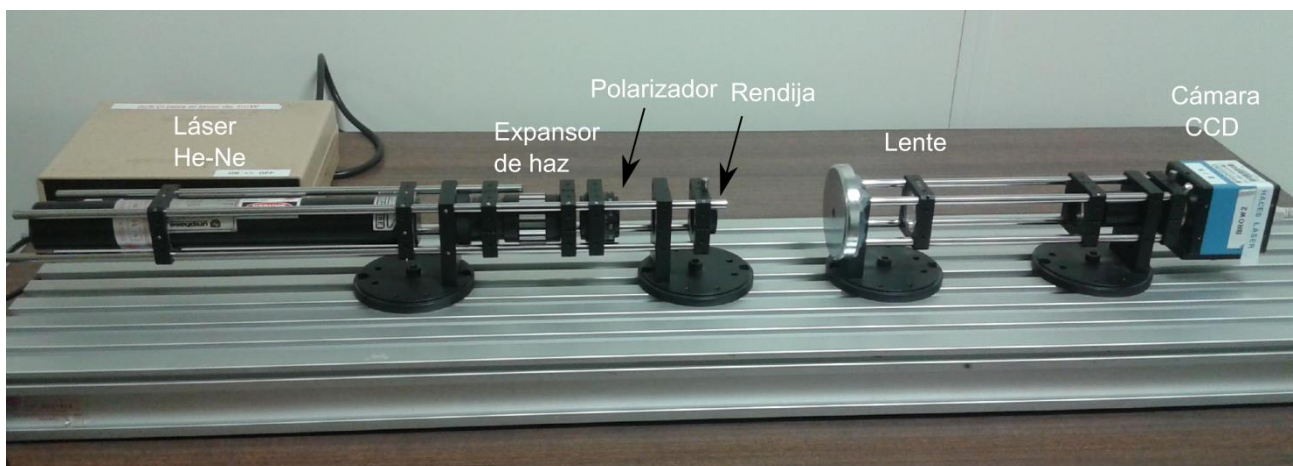


Figura 2. Montaje experimental

Para entender el fenómeno anterior hemos asumido implícitamente que los campos que salían de cada una de las rendijas tenían igual polarización, ya que provenían de la misma fuente. Si delante de cada rendija se pone un polarizador de forma que los dos polarizadores estén cruzados entre sí, los campos son ortogonales entre sí, y no se observa más que una iluminación constante.

2.2 Interpretación cuántica del interferómetro de Young

Los fenómenos físicos clásicos deben poder explicarse también con teorías cuánticas, mientras que la fenomenología cuántica es más rica que la clásica y hay fenómenos que no tiene explicación con teorías clásicas. La interferencia por división del frente de onda puede explicarse también cuánticamente, es decir, en términos de **fotones**. La interpretación es que cada fotón emitido por la fuente tiene un 50% de probabilidad de atravesar cada una de las rendijas pero no sabremos cuál es la que ha atravesado, siendo finalmente detectado por uno de los pixeles del chip de la cámara CCD. Cuando sumamos la contribución de muchos fotones emitidos por la fuente coherente y detectados en diferentes puntos del chip de la cámara, el patrón observado es el conocido patrón de interferencia. Cuando la detección de un fotón tiene lugar sin que haya otros presentes, el conjunto de detecciones reflejará estadísticamente el fenómeno que le ocurre a cada uno de los fotones y por ello podríamos decir que el proceso de interferencia tiene lugar para un solo fotón, es decir, el fotón interfiere consigo mismo.

La base del efecto interferencial radica en que las *dos alternativas* del fotón (pasar por una u otra rendija) son *indistinguibles*. Si tratamos de distinguir el paso por una u otra rendija de alguna manera la interferencia desaparece. Esto puede hacerse colocando un polarizador delante de cada rendija de forma que estén orientados perpendicularmente. Si midiéramos la polarización del fotón a la salida de las rendijas, sabríamos por cual ha pasado, es decir son *distinguibles*.

Como se explicará más adelante, podría ponerse además un polarizador a 45° respecto a la orientación de los anteriores *después* de las rendijas, de forma que al medir la polarización del fotón después de dicho polarizador (sería lineal a 45°) ya perderíamos (borraríamos) la información de por qué rendija ha pasado, y las dos alternativas se harían otra vez indistinguibles y por ello la interferencia reaparecería.

3. Método experimental:

3.1 Observación de las franjas de interferencia y medida de la longitud de onda de un láser

El montaje que se utiliza es el de la Fig. 2. Al utilizar la lente de 200 mm de distancia focal, debemos poner el chip de la cámara CCD (1024x768 pixeles) en su plano focal. El pixel es cuadrado de lado 4,64 μm .

Encienda el láser, la cámara y el programa de adquisición de datos Young_v1.m (**pida ayuda al profesor**). Dicho programa tiene fijado el tiempo de adquisición de la cámara al mínimo. La intensidad del láser puede controlarse con un polarizador situado delante de las rendijas. Gire el polarizador hasta que no se sature la cámara (esto puede reconocerse porque las manchas de intensidad tienen una graduación de color y no el mismo que en el área central).

En la parte superior izquierda de la pantalla [llamémosla (a)], el programa muestra la imagen x-y obtenida por la cámara, y a la derecha, (b), muestra la acumulación de imágenes desde que se empezó a ejecutar el programa. En la parte inferior [(c) y (d)] se muestra la intensidad recibida en un corte en el eje "y" de las imágenes superiores (a) y (b) respectivamente, donde la intensidad es mayor. El programa está fijado para acumular 300 imágenes. Si desea pararlo antes presione CTRL+C en la línea de comandos de Matlab. Si desea acumular más de 300 imágenes contacte con el profesor.

Observe cómo la cámara registra una serie de franjas con cierta distancia d entre máximos consecutivos. Mida dicha distancia y deduzca la longitud de onda de la fuente sabiendo que la separación entre rendijas es de 0.25 mm.

3.2 Observación de las franjas de interferencia a baja intensidad

En primer lugar impida que la luz llegue a la cámara CCD (por ejemplo poniendo la mano) y observe cuál es el nivel de ruido. A continuación deje pasar la luz y gire el polarizador que controla la intensidad de luz que llega a la cámara hasta que el nivel de la señal sea el del ruido. Piense que en estas condiciones cada fotón que llega al par de rendijas interfiere consigo mismo y a la salida incidirá en un pixel concreto de la cámara. Observe como al ir acumulando señal se va formando un patrón de interferencia donde se ve que hay pixeles que nunca han detectado un fotón y otros donde sí. Compruebe que con la adquisición de impactos de fotones por este método, la franja de interferencia es idéntica a la obtenida con alta intensidad (es decir, tiene igual espaciado entre franjas e igual intensidad relativa entre máximos).

Nota: en realidad no podemos estar seguros de que un solo fotón se enfrente a las dos rendijas sin la presencia de otros. Las fuentes de un único fotón son difíciles de fabricar, pero un láser atenuado nos permite obtener una densidad baja de detecciones en la pantalla y observar cómo por acumulación de dichas detecciones se van formando las franjas de interferencia. Además, la cámara CCD no es capaz de detectar fotones de uno en uno. Los detectores que pueden hacerlo son fotomultiplicadores enfriados, para minimizar el ruido electrónico. La cámara CCD registrará por encima de su umbral de ruido. Por eso al bajar la señal a este nivel de ruido, se puede percibir la acumulación de fotones en ciertos pixeles y la ausencia de los mismos en otros. De manera que es una representación razonable del experimento ideal.

3.3 Polarización

Si ahora usamos un par de rendijas separadas entre sí igual que en la experiencia anterior, pero con un polarizador delante de cada una de forma que estén cruzados entre sí, uno vertical y el otro horizontal, la interferencia de los haces salientes ya no es posible, como sabemos por óptica ondulatoria, y las franjas desaparecen tanto a alta como a baja intensidad.

La interpretación cuántica es que, para un fotón dado, las dos alternativas que supone el ir por una u otra rendija ya no son indistinguibles, pues *hemos añadido una información que las hace distinguibles*: por una rendija el fotón sale polarizado de una manera y por la otra sale polarizado de forma ortogonal a la anterior. Como la interferencia tenía lugar por ser las dos alternativas indistinguibles, ahora ya no hay interferencia. Compruebe este hecho y escriba los campos salientes de cada rendija y el campo e intensidad total en un punto genérico de la pantalla (cámara CCD).

Manteniendo la situación anterior, añada ahora un nuevo polarizador **después** de las rendijas, en el soporte metálico a la entrada de lo que llamamos brazo de observación. Este polarizador oriéntelo a 45° respecto a las rendijas y por tanto respecto a los ejes de los polarizadores cruzados. Ahora la interferencia aparecerá de nuevo, tanto a baja como a alta intensidad. Esto quiere decir que las dos alternativas que tiene cada fotón se han vuelto a hacer indistinguibles, es decir, de alguna manera *se ha borrado la información que habíamos introducido* anteriormente con los polarizadores orientados de forma diferente en cada rendija; pero lo curioso

es que ese borrado que realiza el polarizador a 45° se hace **después** de las rendijas, es decir, después de que el fotón se ha enfrentado a dos rendijas que eran distinguibles.

Para entender el fenómeno de forma ondulatoria, escriba la suma de los campos que llegan ahora a un punto genérico de la pantalla (cámara CCD) y la intensidad correspondiente.

4. Bibliografía:

[1] E. Hecht, *Optica* (Addison-Wesley, 1999).

[2] W. Rueckner y J. Peidle, *Young's double-slit experiment with single photons and quantum eraser*. Am. J. Physics **81**, 951-958, 2013.

PLANTILLA

El informe de esta práctica debe contener única y exclusivamente las respuestas solicitadas en esta plantilla. En esta plantilla debe calcular las incertidumbres de los resultados

- Medida de la longitud de onda del láser a alta intensidad
- Comparación entre los patrones de interferencia a alta y baja intensidad
- Borrado cuántico de la información y recuperación de la misma
- Debe añadir aquí algo que haya observado o ideado y que no esté incluido en lo anterior

Fenómenos interesantes para los curiosos

En este apartado no se evaluarán las preguntas solicitadas

Comenta qué cambios tendrías que hacer al tomar medidas para medir la longitud de onda a baja intensidad si en lugar de la cámara CCD proporcionada se te hubiera dado una más sensible.

5. Quiero saber más

Este mismo experimento se ha realizado con electrones. Puedes consultar una explicación detallada en: <http://l-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/didattica/Resources/PAPER%20RIAO%202013-8785CF.pdf>