

# Dualidad onda partícula: Experimento de doble rendija

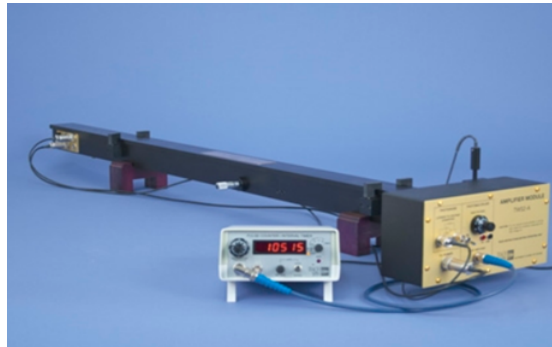
El premio Nobel en física en el año 1921 se otorgó a Albert Einstein “*por sus aportaciones a la física teórica y, especialmente, por el descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico.*”.

El premio Nobel en física en el año 1927 se otorgó a Arthur Compton “*por el descubrimiento del efecto que lleva su nombre.*”

El premio Nobel en física en el año 1965 se otorgó a Richard Phillips Feynman, Julian Schwinger y Shin'ichirō Tomonaga *por su trabajo fundamental en electrodinámica cuántica, generando consecuencias profundas para el desarrollo de la física de partículas elementales.*

## Equipo

- Interferómetro de doble rendija de *TeachSpin*
- Contador de frecuencia TTi TF830
- Multímetro
- Osciloscopio
- Cables
- Conectores BNC
- Tarjetas en forma de T



## Objetivos

- Realizar un experimento de doble rendija observando el patrón de interferencia
- Medir el patrón de interferencia de doble rendija con ayuda de un fotodiodo y tubo fotomultiplicador evidenciando la dualidad onda-partícula de la luz
- Comparar los resultados de la medición del patrón de interferencia con dos modelos teóricos: Fresnel y Fraunhofer.

## Conceptos Clave

Dualidad onda-partícula, Laser, Doble rendija/ Experimento de Young, Patrón de difracción, Teoría de difracción de Fresnel, Teoría de difracción de Fraunhofer, Fotodiodo, Fotomultiplicador.

## Bibliografía

- [1] Feynman - qed; the strange theory of light and matter, 1985.
- [2] Inc. David A. Van Baak; TeachSpin. Two-slit interference one photon at a time *The Essential Quantum Paradox*, instruction manual, tws1-a. Online, 2495 Main Street Suite 409 Buffalo NY, 2013.
- [3] Andy Neely and Robert Redwine. Study guide for physics ii. <http://web.mit.edu/8.02t/www/materials/StudyGuide/guide14.pdf>.
- [4] Florian Scheck. *Quantum physics*. Springer, 2007.

## Marco teórico

En la mecánica cuántica existe el concepto de dualidad onda-partícula, en el cual fotones y demás partículas elementales exhiben un comportamiento de onda o partícula según el tipo de experimento que se realice sobre ellas. En este experimento nos concentraremos en el caso de los fotones. Históricamente fue Thomas Young quien realizó el primer experimento de doble rendija en donde observó el fenómeno de interferencia en el año 1803. De los experimentos de Young se puede inferir que la luz tiene comportamiento de onda, lo cual, con las teorías de Huygens, Fresnel y Maxwell se ratificaba a finales del siglo XIX. Sin embargo, con el descubrimiento del efecto fotoeléctrico y el efecto Compton, la descripción de luz en términos de cuantos de luz, conocidos como fotones, dio lugar a discusiones acerca de la naturaleza corpuscular de la luz, como lo sugería Sir Isaac Newton. Tras el desarrollo de la teoría cuántica por parte de Dirac, Heisenberg y Pauli y experimentos con difracción de electrones como los de Davison y Thomson, la idea de que las partículas elementales e incluso átomos y moléculas exhiben un comportamiento de onda y partícula fue ampliamente acogida por la comunidad científica. En la actualidad, la Electrodinámica cuántica unifica esta dualidad ya que describe la luz por medio de campos cuánticos con propiedades de onda y de partícula. Las contribuciones de Feynman, Schwinger y Tomonaga fueron galardonadas con un premio Nobel en 1965 [4]. En este experimento veremos las propiedades de onda y partícula de la luz al hacerla pasar por una doble rendija y observando el patrón de difracción que esta produce. Para observar el comportamiento ondulatorio se hará incidir una luz de un láser; para observar el comportamiento de partícula, se enviará un número pequeño de fotones a la doble rendija tal que solo un fotón pase por una de las rendijas en un momento dado.

## Ejercicio 1

1. Considere el siguiente arreglo de doble rendija con separación entre rendijas  $d$ , distancia entre rendija y pantalla  $L \gg d$  y concentrándonos a una distancia  $y$  (sobre la pantalla) del eje de simetría la cual se relaciona con el ángulo  $\theta$  de acuerdo a la formula  $\tan \theta = y/L$ .

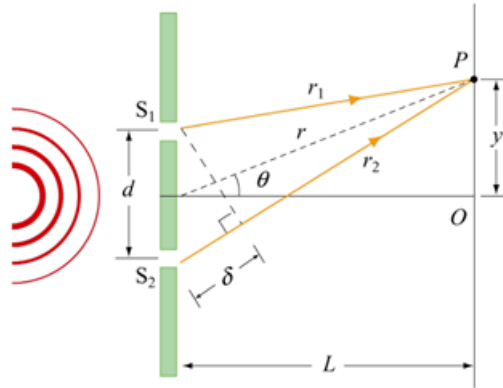


Figura 1: Arreglo de doble rendija. Tomado de [3]

Con ayuda de la Fig.1 y usando la ley de cosenos calcule las distancias  $r_1, r_2$  en términos de  $d, \theta, r$ . Realice la resta  $r_2^2 - r_1^2 = (r_2 - r_1)(r_2 + r_1)$  y aproxime  $r_1 \approx r_2 \approx r$ . Adicionalmente, la diferencia de caminos  $\delta$  se puede escribir aproximadamente como  $\delta \approx r_2 - r_1$ . Llegue a la relación  $\delta \approx dy/L$ .

2. Para calcular la intensidad en el punto P, tenga en cuenta que esta será proporcional a la norma del campo eléctrico que llegue desde la rendija 1 y la rendija 2

$$I \propto (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2. \quad (1)$$

El término  $\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2$  es el que origina el patrón de interferencia. Para luz no coherente este término se anula, sin embargo, ya que trabajaremos con un láser debemos tenerlo en cuenta. ¿Qué condición se requiere para tener interferencia constructiva/destructiva? Compare la intensidad en la que se tiene interferencia constructiva con aquella que se tendría por una sola rendija.

3. Ahora suponga que las ondas que salen de la doble rendija, son ondas planas las cuales podemos escribir como

$$E_1 = E_0 \sin(\omega t), \quad (2)$$

$$E_2 = E_0 \sin(\omega t + \phi), \quad (3)$$

Donde  $\phi$  es el desfase entre las dos ondas. Para tener interferencia constructiva, la diferencia de camino  $\delta$  del punto 1) debe ser un múltiplo entero de la longitud de onda. ¿Qué condición debe cumplir  $\phi$  para que se tenga interferencia constructiva? Basado en este resultado llegue a la expresión

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta. \quad (4)$$

- Suponiendo que el campo eléctrico asociado a las rejillas va en la misma dirección, el campo total será  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$  y la intensidad será proporcional al promedio temporal del cuadrado del campo eléctrico  $I \propto \langle E^2 \rangle_t$ . Obtenga la expresión

$$I = I_0 \cos^2 \left( \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \right), \quad (5)$$

donde  $I_0$  es la intensidad en el máximo (un valor que usted debe ajustar de acuerdo a los datos que va a tomar).

- En este procedimiento no se tuvo en cuenta que las rendijas tienen un ancho que llamaremos  $a$ . Para tener en cuenta este efecto, realice un procedimiento similar teniendo en cuenta el principio de Huygens. Muestre que la intensidad para la difracción para una sola rendija es

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \left( \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta} \right)^2. \quad (6)$$

El resultado teórico para el experimento de doble rendija será la multiplicación de las ecuaciones (5) y (6) [3].

## Ejercicio 2

- La teoría de difracción de Fraunhofer hace suposiciones de la fuente de luz: que llega a la doble rendija como una onda plana, lo cual implicaría una fuente en el infinito. Un modelo más general es aquel propuesto por Richard Feynman en su libro *QED: the strange theory of light and matter* [1]. En este modelo se describe la luz en términos de su cambio fase (que como se vio previamente es un factor relevante) escrita como función del desplazamiento  $\Delta s$  de acuerdo a la ecuación [1, 2]

$$e^{\Delta\varphi} = e^{\frac{2\pi i \Delta s}{\lambda}}, \quad (7)$$

en donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz (por lo tanto, estamos hablando de un haz monocromático). La amplitud de transición de un punto a otro se calcula con la famosa suma sobre todos los caminos de la cantidad en la ecuación (7), la cual en este caso se puede aplicar para estimar el patrón de difracción [1]. Considere el esquema mostrado en la Fig.2 en donde **P** es la fuente de la luz, **Q** indica la doble rendija y **R** la pantalla donde se observa el patrón de difracción. Las variables  $x, y, z$  indican la posición sobre la fuente, doble rendija y pantalla (respectivamente) del haz de luz.

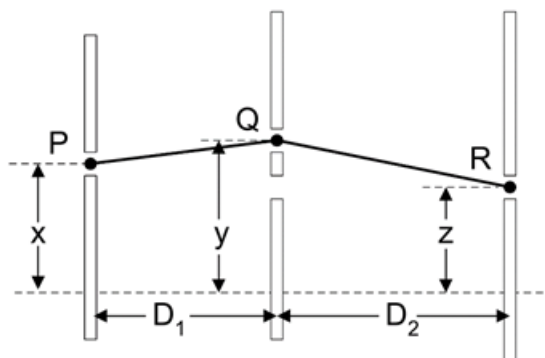


Figura 2: Esquema para el modelo de Feynman

En términos de las distancias dadas en la figura calcule  $\Delta s_1$  entre **P** y **Q** y  $\Delta s_2$  entre **Q** y **R**. Haga una aproximación a primer orden en  $((x - y)/D_1)^2$  y  $((y - z)/D_2)^2$  y de acuerdo a la ecuación (7) calcule cuánto sería el cambio total en la fase de la onda. Investigue sobre la aproximación de Fresnel y compare su resultado con lo que se obtiene con esta aproximación.

2. Para tomar la suma sobre todos los caminos, se debe tomar la integral sobre la variable  $y$  en el rango adecuado  $S$  de la expresión calculada en el punto anterior, debería obtener

$$I(x, z) = \exp\left(\frac{2\pi i(D_1 + D_2)}{\lambda}\right) \int_{y \in S} dy e^{\frac{\pi i(x-y)^2}{D_1 \lambda}} e^{\frac{\pi i(z-y)^2}{D_2 \lambda}}. \quad (8)$$

Las integrales sobre  $x$  y  $z$  tendrán en cuenta que la fuente y el aparato de medición no son puntuales como se verá más adelante [2]. BONO: Realice la integral numéricamente sobre  $y$  en los siguientes casos:

- La rendija inferior se encuentra sellada.
- La rendija superior se encuentra sellada.
- La luz pasa por ambas rendijas.

Puede tomar  $x = 0$  y escoger valores de  $D_1, D_2, d, a$  que usted considere adecuados para simplificar sus resultados. Para aumentar la precisión puede integrar  $x$  entre  $-a/2$  y  $a/2$ . Grafique el resultado de la norma al cuadrado de la integral como función de  $z$  y comente lo que observa. Recomendación: Use el software Mathematica, encontrará adjunto un cuaderno que podrá usar como base.

3. Comparar sus resultados con los que obtuvo en el Ejercicio 1. Colocar ambas gráficas superpuestas. ¿Dónde se observan las mayores discrepancias?
4. Investigue cómo funciona un fotodiodo y un fotomultiplicador.

## Montaje y Experimento

El interferómetro que se usará en este experimento tiene incluido la fuente de luz, el canal donde ocurre la dispersión y difracción y los detectores (ver Fig. 3). Este aparato, junto con un multímetro y un contador de frecuencias serán suficientes para medir el patrón de interferencia en dos configuraciones diferentes. En la primera configuración se usará el láser como fuente de luz y el fotodiodo como detector, observando así la naturaleza ondulatoria de la luz. En la segunda configuración se usará un bombillo con un filtro verde como fuente de luz y el tubo fotomultiplicador como detector, observando la naturaleza corpuscular de la luz.

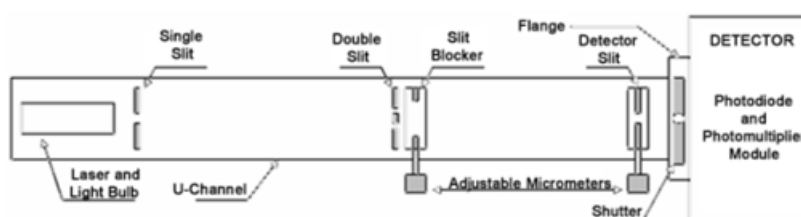


Figura 3: Esquema del interferómetro. Tomada de [2].

**Precaución:** Asegúrese, antes de remover la tapa superior que el obturador que se encuentra en la parte superior del módulo de detección se encuentre completamente cerrado (empújelo hacia abajo). Esto con el fin de proteger el tubo fotomultiplicador ya que es un elemento muy sensible; incluso la luz de una habitación con poca iluminación es suficiente para dañarlo. El obturador lo puede halar hacia arriba solo cuando se asegure que la tapa se encuentre cubriendo la caja y no haya filtraciones de luz al interior del montaje.

Antes de hacer cualquier conexión familiarícese con los elementos que componen el interferómetro. Con el interferómetro orientado tal que el módulo de detección quede en el extremo derecho usted encontrará los siguientes elementos de izquierda a derecha (después de remover la tapa superior): un bombillo con un filtro verde removible, un láser de 670nm y 1mW, un soporte para la rendija colimadora, un soporte para la doble rendija, un soporte para la rendija bloqueadora acoplado a un micrómetro, un soporte para la rendija detectora acoplado a un micrómetro y el módulo de detección.

Este módulo de detección (ver Fig.4) cuenta con dos detectores y un obturador para escoger con cuál se medirá. Cuando el obturador se encuentre cerrado (el cilindro completamente abajo) se medirá con el fotodiodo. Cuando el obturador esté abierto (el cilindro arriba) el tubo fotomultiplicador registrará los fotones que lleguen a él. Cuando el pulso de electrones generado por el fotón es detectado, un circuito electrónico emite un pulso TTL (*Transistor-Transistor-Logic*) el cual podemos recolectar en la salida del módulo etiquetado como *Discriminator* y acoplarlo a un contador de frecuencia TTi como el que se muestra en la Fig. 5 para así contar el número de fotones incidentes en el detector <sup>1</sup>. La perilla junto a la salida del pulso TTL sirve para ajustar el umbral de detección del pulso de electrones.

<sup>1</sup>El detector tiene una eficiencia del 4% al convertir fotones verdes en pulsos.



Figura 4: Módulo de detección.



Figura 5: Contador de frecuencia TTI.

Adicionalmente, note que el módulo de detección cuenta con una salida directa del fotomultiplicador y un módulo de alto voltaje que solo se usará en el modo un fotón a la vez. Este alto voltaje es necesario para operar el tubo fotomultiplicador y puede ser monitoreado con un multímetro <sup>2</sup>.

**Precaución:** Antes de conectar cualquier cable, asegúrese de que el módulo de alto voltaje se encuentre apagado y la perilla marque cero.

Por último, note que el módulo de detección se encuentra conectado al módulo fuente para la alimentación de poder y la alarma, la cual se activará si el tubo fotomultiplicador está en riesgo de dañarse. El modulo fuente es aquel que se muestra en la Fig.6.

<sup>2</sup>Con un factor de conversión de 1/1000 para poder medirlo con el multímetro. 100V en el tubo fotomultiplicador se traducen a 0.1V en el multímetro que monitorea.





Figura 6: Módulo fuente.

En el módulo fuente se encuentra un interruptor para cambiar la fuente lumínica a láser, bombillo o ninguna. Además, cuenta con una perilla la cual controla la intensidad del bombillo y la entrada DC del interferómetro.

## Alineación

Antes de realizar cualquier medición es necesario alinear el sistema. Para hacerlo primero identifique las diferentes rendijas que vienen con el sistema: debería tener tres rendijas dobles marcadas con los números 14,16, y 18, las cuales corresponden a separación entre centro de las rendijas de 0.356mm, 0.406mm y 0.457mm. Adicionalmente debería tener rendijas sencillas y una rendija sencilla más ancha; las rendijas sencillas se usarán en la fuente y detección mientras que la rendija ancha la usará para el bloqueo de luz.

Después de asegurarse que el alto voltaje esté apagado y el obturador del detector está cerrado, conecte el equipo a la fuente de poder y retire la cobertura de aluminio del interferómetro. Realice la alineación del láser manualmente y si es necesario use el tornillo justo debajo del láser para cambiar la dirección de propagación de este. La alineación debe ser tal que la luz del láser llegue con mayor intensidad a donde se encuentra el detector.

**Precaución:** No deje que la luz del láser sea reflejada en algún objeto y llegue a sus ojos. Para seguir la luz del láser puede usar las tarjetas blancas en forma de T incluidas con el montaje. Para una mejor alineación, reduzca la intensidad de la luz de la habitación donde se encuentre trabajando.

Ahora agregue las rendijas en el siguiente orden:

- Coloque la rendija simple en el espacio para la rendija detectora tal que quede orientada de forma vertical.
- Ubique la rendija bloqueadora (la rendija ancha) y ajuste el micrómetro acoplado a esta en la mitad de su rango (aproximadamente 5mm). Verifique que se obtiene una banda rectangular de luz que llega al detector. Asegúrese que la rendija quede vertical.

- Coloque la doble rendija de forma vertical. Usando una tarjeta T justo después de la rendija bloqueadora, asegúrese de que ve la luz que pasa por las dos rendijas de forma individual (dos líneas verticales). Si no observa esto, mueva el micrómetro de la rendija bloqueadora.
- Sitúe la rendija sencilla en el lugar para la rendija colimadora de forma vertical. Puede moverla de forma horizontal para asegurarse que la luz del láser pase por esta y que además llega con mayor intensidad a la doble rendija. Use las tarjetas T para verificar esto.
- Finalmente, mueva la rendija bloqueadora con el micrómetro y observe (con ayuda de una tarjeta T justo después de la rendija bloqueadora) la transición entre doble rendija y una sola rendija. Esta transición debe ocurrir lo más rápido posible (mientras se gira el micrómetro), indicando que la doble rendija y la rendija bloqueadora están alineadas. Si este no es el caso, rote ligeramente la rendija bloqueadora y llegue a una alineación óptima.
- Verifique que usando la rendija bloqueadora puede hacer que la luz pase por alguna de las dos rendijas, las dos rendijas o que no pase luz en absoluto.

### Actividad 1

1. Describa el patrón que observa usando una tarjeta T cerca de la rendija detectora en los siguientes casos:
  - La luz pasa por las dos rendijas.
  - La luz pasa por una sola rendija.
  - La luz no pasa por ninguna rendija.

Describa la transición entre una y dos rendijas. ¿Qué sucede con los máximos y mínimos de intensidad? Explique con argumentos físicos lo que sucede. Compare el patrón de interferencia que usted ve con los que se predice teóricamente en los ejercicios 1 y 2.

2. Para realizar mediciones con los micrómetros tenga en cuenta que una vuelta completa de estos corresponde a 0.5mm. Las líneas en el tubo fijo del micrómetro indicando 0mm, 5mm y 10mm le ayudarán a llevar la cuenta del desplazamiento total de este.

Registre los rangos de valores en el micrómetro donde se tiene luz por las dos rendijas, luz por la rendija derecha, luz por la rendija izquierda y la rendija bloqueadora obstruyendo totalmente el haz del láser. Esto le será útil cuando cuando esté operando el interferómetro con la cubierta.

### Medición del patrón de interferencia con el láser

En esta configuración la luz que llegará al detector será solo aquella que pase por la rendija detectora. Por lo tanto se podrá analizar una sección particular del patrón de

difracción. Moviendo la rendija detectora con ayuda del micrómetro acoplado a esta se podrá medir cuantitativamente el patrón de difracción que usted observó durante la alineación del interferómetro.

Primero coloque la cubierta (opcional para la parte con láser, puede hacerlo sin la cubierta y con poca luz ambiental) y ajuste la rendija bloqueadora tal que la luz cruce por las dos rendijas. Active la luz del láser. Alimente el módulo de detección y conecte la alarma desde el módulo fuente. En esta parte del experimento se utilizará un fotodiodo como detector; la señal del fotodiodo se transmitirá por el cable que está conectado al obturador. Conecte este cable a la entrada del módulo etiquetado como *Photodiode* y en la salida conecte un multímetro. El voltaje que registra el multímetro es lineal con respecto a la intensidad de luz, por lo tanto midiendo variaciones en este voltaje se podrá medir el patrón de difracción.

El multímetro debería registrar un voltaje del orden de 1V. Si el voltaje que registra es mucho menor, mueva la rendija detectora y encuentre un máximo de voltaje. Para verificar que sí esté midiendo la luz del láser, puede apagarlo y ver si el voltaje cae a cero. Aproveche este momento para anotar el *offset* el cual debería estar en el orden de 10mV. Si registra un valor mayor, es posible que haya una filtración de luz en el aparato.

**Sugerencia:** Si el voltaje en el máximo que usted registra es inferior a 1V, debería revisar y mejorar su alineación o verificar la posición de su rendija bloqueadora.

## Actividad 2

1. Con la rendija bloqueadora ubicada tal que la luz pase por las dos rendijas encuentre el máximo con la rendija detectora. Registre el voltaje y ahora cambie la rendija bloqueadora para permitir que solo pase luz por una de las rendijas. Observará que la intensidad disminuye. ¿En qué factor disminuye? Justifique su respuesta físicamente. (Ver Ejercicio 1.2 ) Realice el mismo análisis para un mínimo de intensidad.
2. Registre el patrón de difracción para la doble rendija, la rendija derecha y la rendija izquierda. Grafique y discuta sus resultados. (No olvide corregir sus datos por los valores de *offset* registrados). Compárelos con los esperados usando la teoría de los ejercicios 1 y 2. Use  $a=0.1\text{mm}$ .

**Recomendación:** Los micrómetros tienen una curva de histéresis asociada que es significativa. Procure siempre hacer las mediciones en la misma dirección de giro. Los mejores resultados se obtienen cuando se va de 10mm a 0mm y se recomienda un barrido con intervalos de 0.1mm-0.2mm.

3. ¿Cómo podría calcular la longitud de onda del láser a partir de los resultados de doble rendija? Calcúlela y compárela con el valor reportado por el fabricante de  $670 \pm 5\text{nm}$ .
4. Argumente cómo esta parte del experimento lo lleva a evidenciar la naturaleza ondulatoria de la luz.

Un ejemplo de las gráficas que puede obtener durante esta sección se puede ver en las Fig. 7 y 8

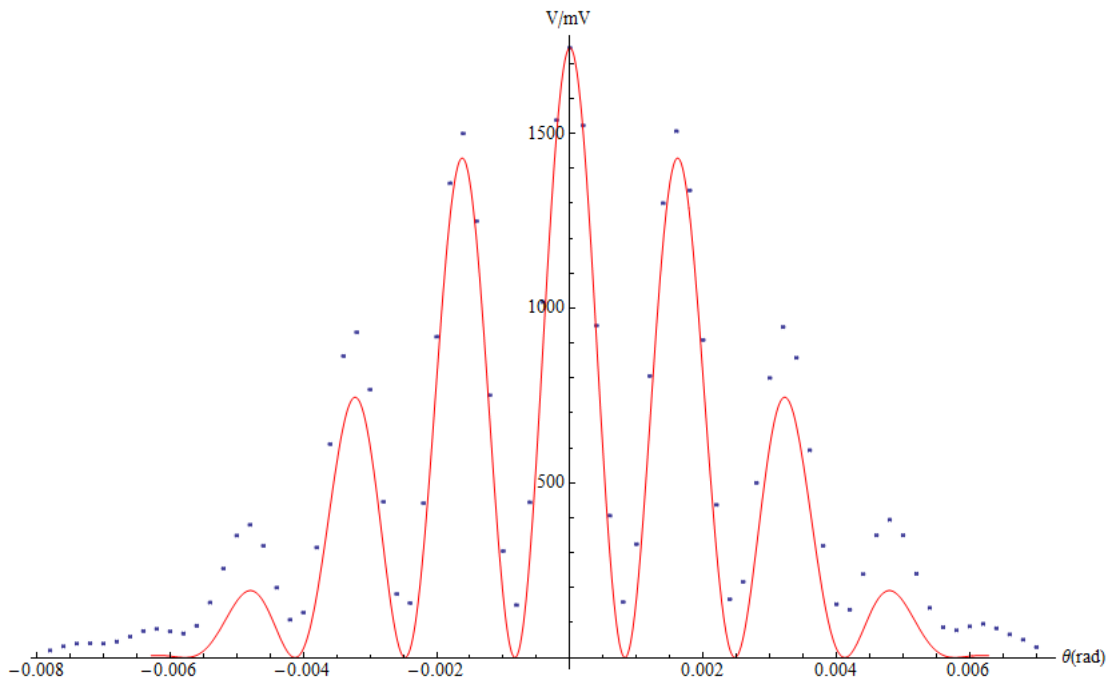


Figura 7: Intensidad de voltaje vs ángulo  $\theta$  en doble rendija. Los puntos corresponden a las mediciones y la línea roja es el ajuste usando la teoría de Fraunhofer.

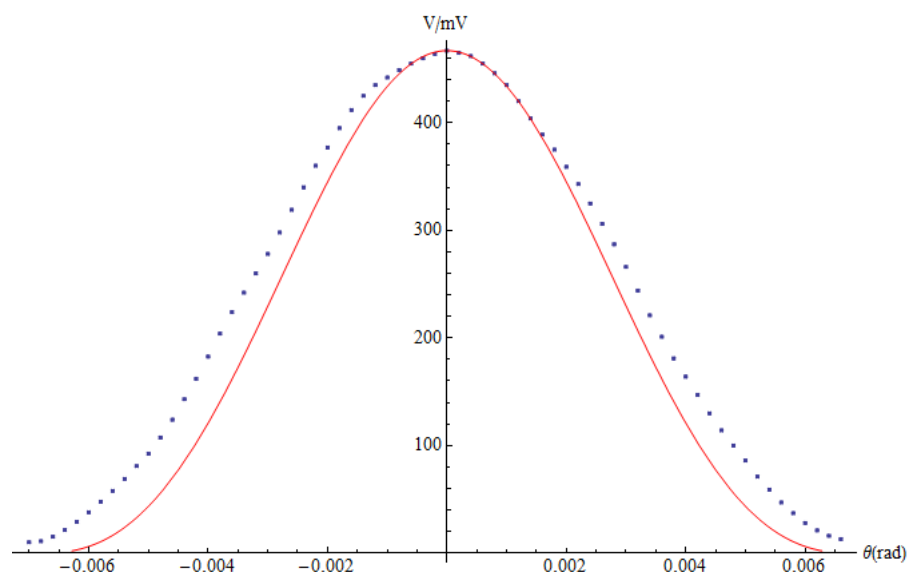


Figura 8: Intensidad de voltaje vs ángulo  $\theta$  para una rendija. Los puntos corresponden a las mediciones y la línea roja es el ajuste usando la teoría de Fraunhofer.

## Medición con un fotón a la vez

Para esta sección debemos usar como fuente de luz el bombillo y como detector el tubo fotomultiplicador. Remueva el cobertor de aluminio y mueva el láser para dejar que la luz del bombillo pueda pasar por la rendija colimadora. Remueva el filtro verde <sup>3</sup> del bombillo y enciéndalo ajustando su intensidad con la perilla designada para este fin. Para esta parte del experimento se recomienda aminorar todas las fuentes de luz: lámpara, ambiente, dispositivos electrónicos (aunque no es absolutamente necesario para su funcionamiento). Realice la alineación de forma análoga a como la hizo con el láser. Es suficiente con que se asegure que la luz del bombillo pasa por la doble rendija y que la rendija bloqueadora cumple su función (debería revisar los nuevos rangos de rendija sencilla y doble rendija). Una vez realizada la alineación, vuelva a colocar el filtro verde al bombillo y reduzca su intensidad. Coloque de nuevo el cobertor de aluminio verificando que las filtraciones de luz sean mínimas.

Los pulsos de corriente que envía el fotomultiplicador pueden ser revisados con ayuda de un osciloscopio. Acople una sonda del osciloscopio a la salida del módulo *Photomultiplier*. Para poder ver los pulsos ajuste la escala vertical de su osciloscopio (en el canal al que conecto) a 50mv/div y la temporal a unos 250ns-500ns. Adicionalmente, conecte a otro canal una sonda a la salida del módulo *Discriminator*, la escala vertical para este canal ajústela a unos 2V/div. Este procedimiento se hace con el fin de examinar que los pulsos análogos que emite el fotomultiplicador se vean reflejados en pulsos TTL. Para ver los pulsos abra el obturador (asegurándose que la cubierta quedó bien puesta y no hay filtraciones de luz, es recomendado disminuir la intensidad de luz en el entorno) y encienda el bombillo. Adicionalmente encienda el alto voltaje y gire la perilla hasta llegar a unos 550V. El voltaje lo puede monitorear con el multímetro conectándolo a las entradas que puede encontrar en el módulo de alto voltaje con un factor de conversión de 1/1000.

**Advertencia:** Si al ir incrementando el voltaje observa pulsos a una tasa mayor a 10 kHz cierre inmediatamente el obturador. Posiblemente tenga una filtración de luz y el fotomultiplicador podría dañarse.

Cuando llegue a un voltaje de 550V aproximadamente, debería observar pulsos análogos y su correspondiente TTL en el osciloscopio como se muestra en la Fig. 9. Si los pulsos análogos que detecta son menores a 50mV aumente el voltaje (no sobrepase los 650V) hasta conseguir pulsos apreciables. Con la perilla del discriminador en cero vaya aumentando su valor hasta que vea que por cada pulso análogo de produce solo un pulso TTL.

---

<sup>3</sup> El filtro deja pasar luz en el rango 541 a 551nm aproximadamente

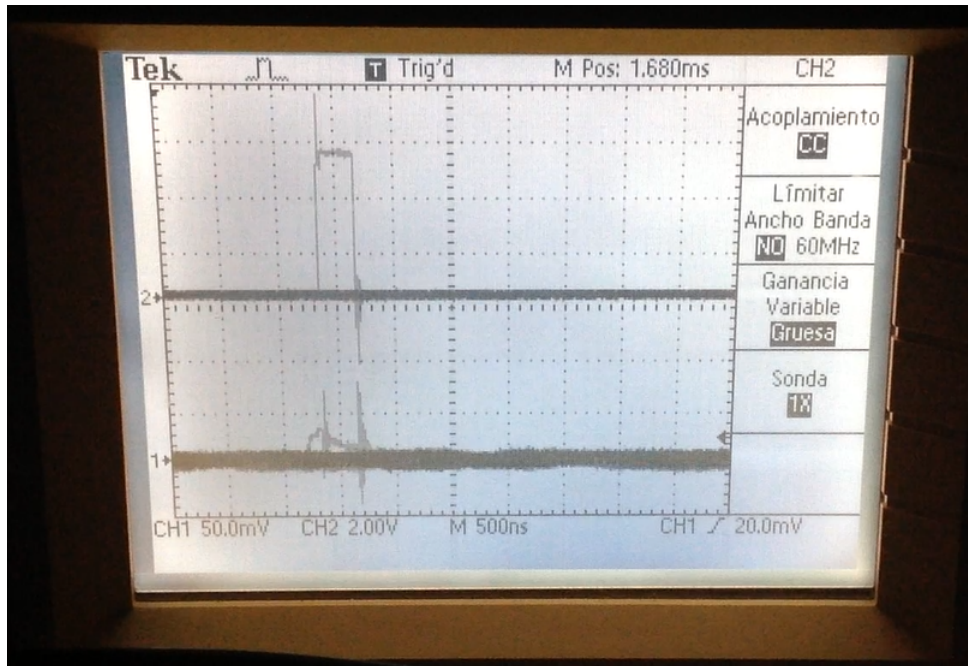


Figura 9: Pulso análogo (canal 1:abajo) y TTL correspondiente(canal 2: arriba) en el osciloscopio.

Una vez hecha esta calibración, puede conectar la salida del módulo TTL al contador de frecuencias (HF). Ajuste su contador para que le indique el número de eventos cada 1s. El conteo debería estar aproximadamente en el orden de 1000eventos/s. Mueva la perilla de intensidad del bombillo y verifique que el número de conteos cambia acorde a esta intensidad.

**Sugerencia:** Verifique cómo afecta la luz de la habitación (o de fuentes externas) a la lectura del contador. Si observa un cambio significativo, es recomendado que la habitación permanezca con el mismo nivel de luz durante todo el experimento. Además para alargar la vida del bombillo, procure que la perilla de intensidad quede en valores menores a 7.

### Actividad 3

1. Con un voltaje e intensidad del bombillo fijas y asegurándose que la rendija bloqueadora deja pasar los fotones por las dos rendijas tome medidas de conteos en función de la posición de la rendija detectora. Note que los conteos son variables, por lo que por cada posición tome 5 conteos diferentes. Calcule su promedio y desviación por cada posición de la rendija detectora. Grafique sus resultados y mida la longitud de onda de la luz. Tenga en cuenta que debe corregir sus datos por mediciones con el bombillo apagado (offset) y que la incertidumbre en cada dato es su desviación estándar. Realice el ajuste de acuerdo a la teoría de Fraunhofer y Fresnel. Compare las longitudes de onda obtenidas por cada método.
2. Repita el procedimiento anterior solo dejando pasar fotones por una rendija.
3. Ubíquese en el máximo de conteo de fotones y vaya cambiando el alto voltaje en-



tre 350V y 650V registrando los conteos con el obturador abierto y cerrado. ¿Qué tendencia observa?

4. Para el máximo de conteo de fotones, registre más de 10 series y cambie la intensidad del bombillo con la perilla. Repita este procedimiento al menos 10 veces. Grafique la raíz del promedio en función de la desviación estándar. ¿Qué tendencia tiene la gráfica? ¿Qué tipo de distribución sigue el conteo de fotones? <sup>4</sup>
5. ¿Por qué es posible asegurar que esta parte del experimento se hace con un fotón a la vez? Ayuda: El tubo fotomultiplicador tiene una eficiencia del 4 % al convertir fotones verdes en pulsos. Puede calcular en promedio cada cuánto llega un fotón al detector y compararlo con el tiempo de vuelo desde la fuente hasta el detector.
6. ¿Qué evidencia obtuvo del experimento acerca de la característica corpuscular de la luz?

Resultados que se pueden obtener en conteo de un solo fotón se muestran en la Fig.10 y 11 junto con su ajuste usando la teoría de Fraunhofer y Feynman respectivamente.

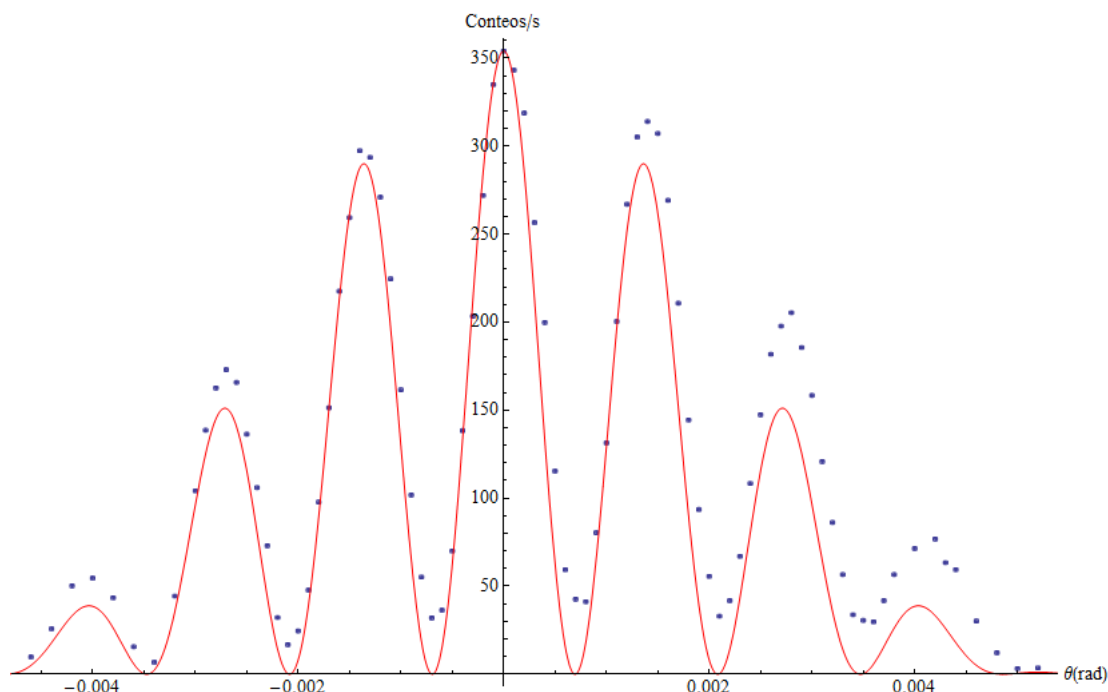


Figura 10: Conteos por segundo vs ángulo  $\theta$  en doble rendija. Los puntos corresponden a las mediciones y la línea roja es el ajuste usando la teoría de Fraunhofer. Se omiten las barras de error verticales, que se estiman como  $\sqrt{N}$ , donde  $N$  es el número de conteos.

<sup>4</sup>Ver *Photon Statistics*

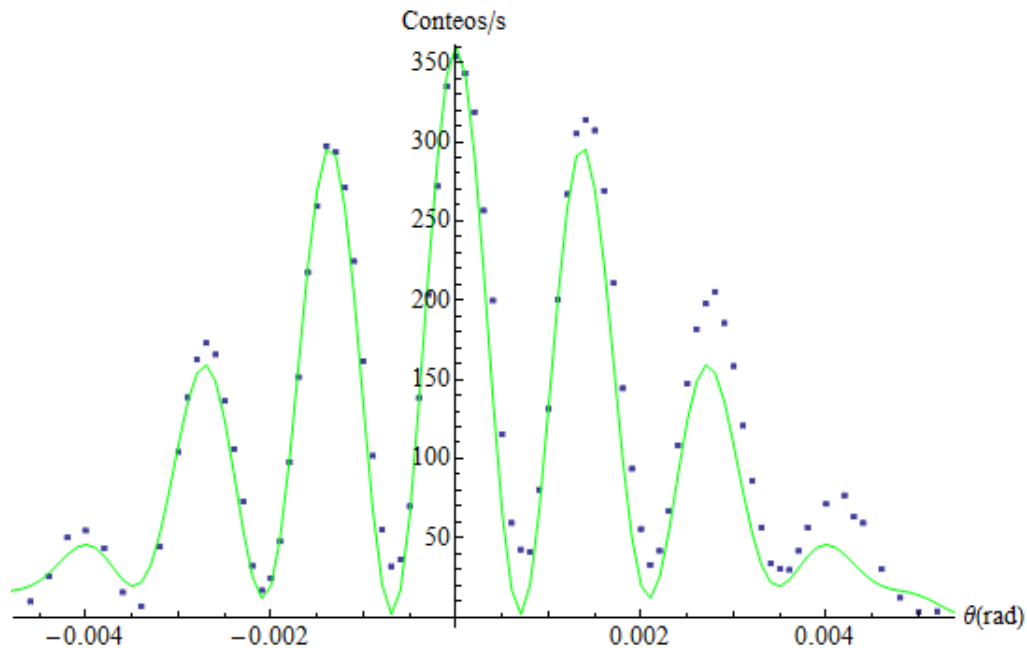


Figura 11: Conteos por segundo vs ángulo  $\theta$  en doble rendija. Los puntos corresponden a las mediciones y la línea roja es el ajuste usando la teoría de Feynman/Fresnel. Se omiten las barras de error verticales, que se estiman como  $\sqrt{N}$ , donde  $N$  es el número de conteos.

### Para considerar

1. ¿En qué magnitud cree que afectan las siguientes variables en el experimento?
  - Eficiencia de los detectores
  - La condición de vacío en el interferómetro
  - No tener una perfecta alineación del interferómetro.
  - Luz proveniente del ambiente.
  - Usar luz no coherente como fuente.
  - No puntualidad de la rejilla detectora
2. ¿Cómo podría (si es posible) minimizar los efectos de las variables mencionadas en el punto anterior?