

## Reporte no 2: Prueba de la existencia del fotón

Lucero Cárdenas Razo,<sup>\*</sup> Diana Laura Monroy Mérida,<sup>\*\*</sup> Michel Martínez Mendoza,<sup>\*\*\*</sup>  
 Abraham Nava Mireles,<sup>\*\*\*\*</sup> Profesor Víctor Velázquez, and Ayudante Diego Lara Bustillos  
*Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, México*  
 (Dated: 22 de octubre de 2018)

En esta práctica se presenta una prueba sobre la existencia del fotón mediante el conteo de coincidencias entre dos y tres detectores. Se hizo incidir un láser azul violeta sobre un cristal BBO que funcionaba como fuente de pares de fotones individuales. Posteriormente, uno de estos haces, el testigo, incidió en un fotodetector mientras que el otro haz incidió en un divisor de haz, siendo separado en haz reflejado y transmitido. Se midió la función de correlación en dos y tres detectores del haz reflejado, transmitido y testigo, obteniendo los valores de  $\langle g \rangle_{2D}^{(2)} = 1.015430 \pm 0.199578$  y  $\langle g \rangle_{3D}^{(2)} = 0.051057 \pm 0.041824$  respectivamente. En el caso de dos detectores, se obtiene el resultado esperado de luz agrupada que corresponde a luz caótica clásica. Para tres detectores, que  $\langle g \rangle_{3D}^{(2)} < 1$  nos habla sobre el comportamiento cuántico de la luz, descrito por el fotón.

### I. INTRODUCCIÓN

La interpretación como onda del campo electromagnético fue dominante hasta que Planck en 1900, con su teoría de radiación de cuerpo negro propone la existencia de paquetes de energía, los fotones. Así surgiría la interpretación de la luz como onda clásica y como partícula cuántica con los fotones. A pesar de que fueron introducidos de manera teórica, algunas pruebas de la existencia de estas partículas pueden ser halladas canónicamente en el efecto fotoeléctrico y en el efecto Compton. A pesar de esto, algunos aspectos de estos fenómenos pueden ser descritos sin introducir el concepto de fotón e incluso sin campos cuantizados [1].

De la teoría de fotodetección de la luz, sabemos que los detectores producen pequeños voltajes en respuesta al haz de luz y que los contadores de fotones registran el número de pulsos en cierto intervalo de tiempo. Sin embargo, ha sido un tema de debate si los eventos que son registrados por los contadores de luz están relacionados a la estadística de los fotones o si solamente son una "treta" del proceso de detección. Así pues, se debe hacer una distinción entre la naturaleza estadística del proceso de detección y las propiedades estadísticas del fotón. De estas forma, se pueden encontrar dos tipos de experimentos, los que pueden ser explicados por modelos semiclásicos (luz clásica, donde se cuantiza el átomo) y los que nos arrojan resultados que solo pueden ser descritos por la estadística de fotones.

Dentro de estos últimos, se encuentra un experimento realizado por Grangier, Roger y Aspect en 1986, cuyo objetivo era investigar sobre las violaciones a las desigualdades de Bell, una de las pruebas fundamentales de la mecánica cuántica [2]. Ellos diseñaron una fuente de un solo fotón, llamada *cascada atómica* en el que se emitían dos fotones con diferente frecuencia y en direcciones opuestas. El primer fotón era

detectado y servía como señal para activar otro par de detectores colocados en la salida de un divisor de haz 50:50. Así, el segundo fotón debería ser reflejado o transmitido, por lo que no debería haber coincidencias entre estos dos detectores. Ellos midieron coincidencias menores que las que predice la teoría clásica, por lo que sus resultados debían corresponder a estados de un solo fotón.

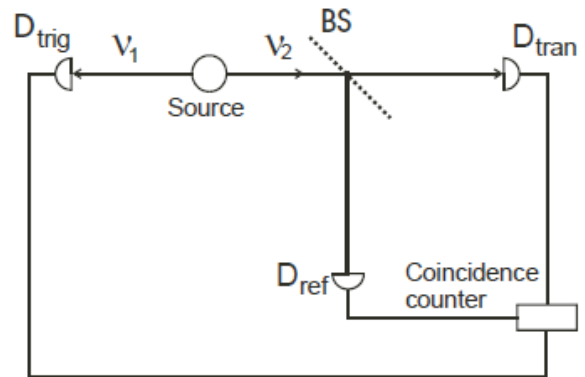


Figura 1: Experimento de Grangier y otros. La detección del fotón trigger coloca una alerta para que los detectores esperen la llegada de un segundo fotón en cualquiera de los detectores. Ellos midieron que las coincidencias entre estos dos detectores eran menores a lo esperado clásicamente. Figura tomada de [2]

El experimento presentado también consiste medir las coincidencias entre detectores, aunque a diferencia del experimento de Aspect y colaboradores, en esta práctica se presentará como fuente de fotones individuales un cristal BBO tipo I excitado por un haz láser. También se distinguirá entre el proceso de detección de dos y tres detectores, haciendo énfasis en las diferencias de la medición de la función de correlación en cada caso.

<sup>\*</sup>Electronic address: lucero@ciencias.unam.mx

<sup>\*\*</sup>Electronic address: dial'mm@ciencias.unam.mx

<sup>\*\*\*</sup>Electronic address: miichmtz@ciencias.unam.mx

<sup>\*\*\*\*</sup>Electronic address: abraham'nava96@hotmail.com

## II. MARCO TEÓRICO

### A. Mediciones pioneras de correlación

El experimento pionero en el área de medición de correlaciones fue el realizado por Hanbury, Brown y Twiss, considerado el experimento precursor de la Óptica Cuántica [3]. Su experimento consistía en una modificación al interferómetro estelar de Michaelson, en el que por medio de dos espejos colectaban la luz y la enfocaban a fotomultiplicadores separados, que generan fotocorrientes  $i_1$  e  $i_2$ . Con un circuito electrónico multiplicador, medían el promedio temporal de  $i_1 i_2$ , correspondiente a la correlación entre las fotocorrientes. Lo que ellos midieron en sus experimentos fue que había correlación entre la luz detectada por los dos detectores separados y aunque sus experimentos no revelaban efectos cuánticos debido a que no detectaban fotones individuales, en su tiempo dio lugar a diferentes discusiones sobre como podían estar relacionados dos eventos estadísticos separados.

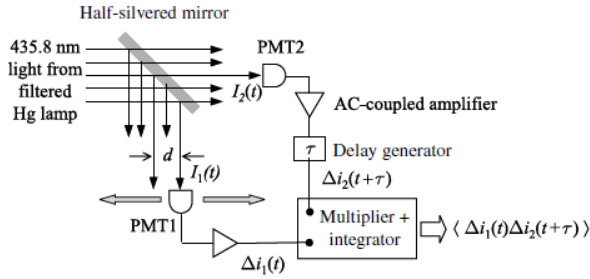


Figura 2: Experimento de Hanbury, Brown y Twiss. Figura tomada de [3]

Posterior a este se realizaron diversos experimentos similares, que llevaron a una interpretación física de la función de correlación en términos del comportamiento de los fotones.

### B. Función de correlación

Las funciones de correlación son herramientas estadísticas que nos permiten calificar si dos variables aleatorias tienen alguna relación proporcional. En Óptica Cuántica, la función de correlación de segundo orden de la luz ayuda a cuantificar las fluctuaciones en la intensidad de la luz en un tiempo  $\tau$ . Esta función está definida de la siguiente forma [3]:

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I(t+\tau)I(t) \rangle}{\langle I(t+\tau) \rangle \langle I(t) \rangle} \quad (1)$$

donde  $I(t)$  representa la intensidad del haz de luz al tiempo  $t$  y los símbolos  $\langle \dots \rangle$  representan el promedio temporal calculado al integrar sobre un periodo muy largo. Notemos que si  $\tau = 0$ , esto es, si se observa la correlación entre las variables cuando el tiempo de separación entre ellas es muy pequeño, la función de correlación se reduce a:

$$g^{(2)}(0) = \frac{\langle I(t)^2 \rangle}{\langle I(t) \rangle^2} \quad (2)$$

Además, si se considera la luz como ondas electromagnéticas, se puede mostrar que siempre se cumple que:

$$g^{(2)}(0) \geq 1$$

Una explicación simple para este hecho es que  $\langle I(t)^2 \rangle \geq \langle I(t) \rangle^2$  debido a que las fluctuaciones por encima y por debajo del promedio son iguales y que al elevarlas al cuadrado, estas se vuelven positivas. Notemos de igual forma que si  $I(t)$  es constante, se obtiene que  $g^{(2)}(0) = 1$ . Así pues, podemos concluir que para toda la luz clásica se cumple que  $g^{(2)}(0) \geq 1$ . Examinando la función de correlación desde la representación cuántica, ya no tiene sentido hablar de intensidad en términos de las ondas electromagnéticas, sino en términos de conteo. Como el número de cuentas registrado en un detector es proporcional a la intensidad, la función de correlación puede reescribirse, en el caso de dos detectores como:

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle N_1(t)N_2(t+\tau) \rangle}{\langle N_1(t) \rangle \langle N_2(t+\tau) \rangle} \quad (3)$$

donde  $N_i$  representa el número de cuentas al tiempo  $t$  en el detector  $i$ . Esto muestra que  $g^{(2)}(\tau)$  es dependiente en la probabilidad de contar fotones al tiempo  $t$  en el detector 1 y al tiempo  $t + \tau$  en el detector 2. En otras palabras, es proporcional a la probabilidad condicional de detectar un segundo fotón al tiempo  $t = \tau$  dado que ya se detectó un fotón al tiempo  $t = 0$ .

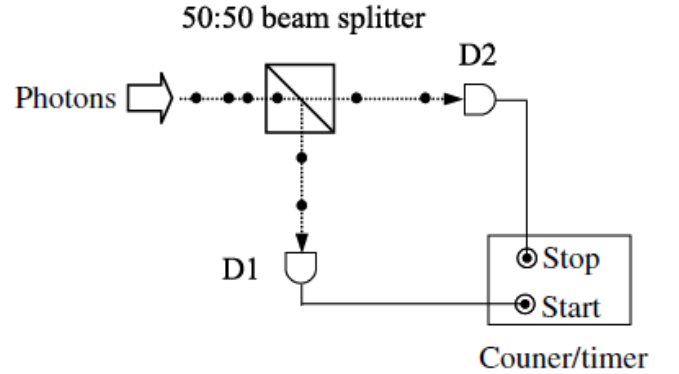


Figura 3: Experimento de Hanbury, Brown y Twiss con fotones. Un haz de fotones incide en un divisor de haz. Los pulsos son detectados en D1 y D2 y sirven como "semilla" para un contador, que cuenta el número de pulsos de cada detector y el tiempo entre ellos. Figura tomada de [3]

La importancia de la función de correlación es que establece un criterio para clasificar la luz. Para un  $\tau$ , se tiene que  $g^{(2)}(\tau) \geq 1$  para la teoría clásica, mientras que la mecánica

cuántica permite  $g^{(2)}(\tau) < 1$ , distinguiendo de esta manera a la luz como onda o partícula. Sin embargo, esta clasificación puede ser explicada desde el punto de vista del agrupamiento de los fotones en el haz de luz. Así pues, la clasificación es:

1. Luz agrupada (bunched):  $g^{(2)}(0) > 1$
2. Luz coherente:  $g^{(2)}(0) = 1$
3. Luz antiagrupada (antibunched):  $g^{(2)}(0) < 1$

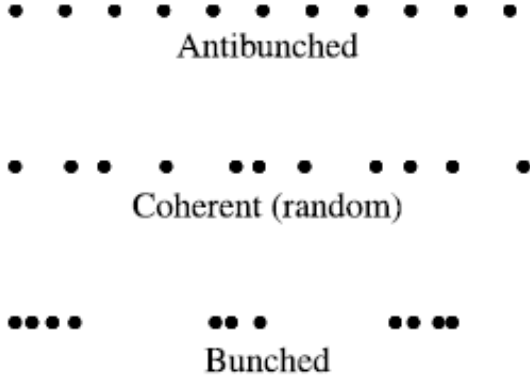


Figura 4: Comparación del haz de fotones para luz agrupada (bunched), coherente y antiagrupada (antibunched). Figura tomada de [3]

Comparando con la función de correlación clásica, podemos notar que la luz agrupada y la coherente tienen contraparte clásica, sin embargo, la luz antiagrupada no, por lo que corresponde a un efecto puramente cuántico. La luz coherente sigue una distribución poissoniana. La luz agrupada es luz clásica, como la que se obtiene de las lámparas de arco. Como su nombre sugiere, consiste de un haz de fotones en los que estos se agrupan por montones. Esto significa que si un fotón es detectado, la probabilidad de detectar otro fotón a tiempos cortos será mayor que a tiempos largos. A comparación, la luz antiagrupada está agrupada por fotones con espaciamiento regular entre ellos, por lo que habrán largos tiempos en los que no se detectará un fotón. Así pues, la obtención de un valor negativo para la función de correlación es una muestra clara de la naturaleza cuántica de la luz.

### C. Probabilidades estadísticas

En el experimento se distinguirá las detecciones con 2 y 3 detectores, correspondientes a  $g_{2D}^{(2)}(\tau)$  y  $g_{3D}^{(2)}(\tau)$  respectivamente. En las mediciones de dos detectores, el campo a medir incide en un divisor de haz, y los dos puertos de salida se monitorean con detectores de recuento de fotones. Las mediciones de tres detectores son condicionales, porque los dos detectores que monitorean las salidas del divisor de haz están condicionadas por las detecciones del tercero, es decir,  $g_{3D}^{(2)}(\tau)$  depende del campo que incide en el divisor y de las correlaciones entre este campo y al que incide en el tercer detector [4].

La  $g_{2D}^{(2)}$  está dada por:

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle \hat{I}_T(t+\tau) \hat{I}_R(t) \rangle}{\langle \hat{I}_T(t+\tau) \rangle \langle \hat{I}_R(t) \rangle} \quad (4)$$

En los experimentos no se mide directamente las intensidades, sino la detección fotoeléctrica.  $g^{(2)}(\tau)$  se puede escribir a partir de la probabilidad de detecciones individuales como:

$$g_{2D}^{(2)}(\tau) = \frac{P_{TR}}{P_T P_R} \quad (5)$$

$P_T$  es la probabilidad de una detección en el detector T en un intervalo  $\Delta t$  (lo mismo para  $P_R$ , y  $P_{TR}$  es la probabilidad conjunta que se tenga detección tanto en T como en R en el mismo intervalo.

En el experimento lo que se mide son el número de fotones en un intervalo de tiempo dado. Por ejemplo: la probabilidad  $P_T$  dentro de un intervalo  $\Delta t$ , es el promedio de detecciones,  $\frac{N_T}{\Delta t}$ , en T multiplicado por  $\Delta t$ . Lo mismo ocurre con  $P_R$  y  $P_{TR}$ . Por lo tanto:

$$g_{2D}^{(2)}(\tau) = \frac{N_{TR}}{N_T N_R} \left( \frac{\Delta t}{\Delta t} \right) \quad (6)$$

Si se lleva a cabo el experimento mediante 3 detectores, en el cual un segunda fuente de luz es la que incide en el tercer detector (nombrado gate o testigo, y denotado por G). Esta fuente es generada mediante conversión paramétrica descendente (PDC). Entonces un haz es detectado en G, mientras el otro pasó por el divisor de haz del primer camino óptico, la función correspondiente  $g_{3D}^{(2)}$  es:

$$g_{3D}^{(2)}(\tau) = \frac{P_{GTR}}{P_{GT} P_{GR}} \quad (7)$$

$P_{GTR}$  es la probabilidad de obtener una coincidencia en los tres detectores en un intervalo  $\Delta t$ . Utilizando que  $P_{GTR} = \frac{N_{GTR}}{N_G}$  obtenemos la  $g_{3D}^{(2)}$  en términos de los conteos.

$$g_{3D}^{(2)}(\tau) = \frac{N_{GTR} N_G}{N_{GT} N_{GR}} \quad (8)$$

El experimento se reduce a medir las coincidencias señaladas en cada caso para obtener directamente  $g^{(2)}(0)$  y así observar el comportamiento de la luz, si este comportamiento varía si se utilizan dos o tres detectores y, a partir de esto, concluir si el fotón en realidad existe.

## III. OBJETIVO EXPERIMENTAL

Medir la función de correlación de segundo orden de los fotones detectados en dos y tres detectores y determinar si el comportamiento corresponde a una descripción clásica o cuántica de la luz, concluyendo sobre la existencia del fotón.

## IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### A. Material y equipo utilizado

- Láser azul-violeta (810 nm)
- Dos polarizadores de media longitud de onda
- Cable de fibra óptica
- 3 fotodiodos de avalancha (APD)
- Cristal BBO Tipo-I
- Divisor de haz polarizado (PBS)
- Módulo de conteo de un solo fotón (SPCM)
- Computadora

### B. Montaje y calibración

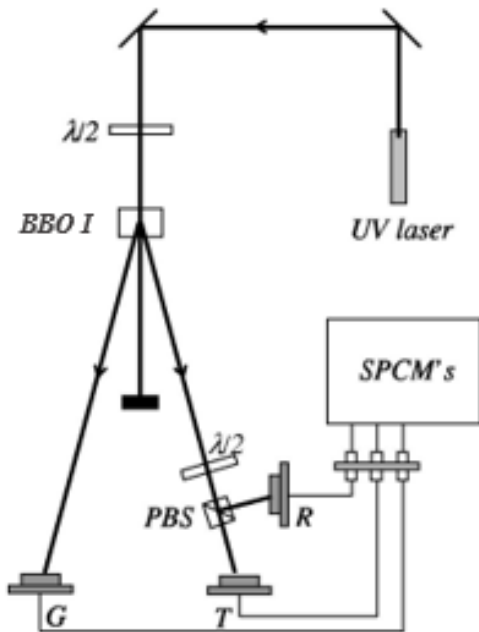


Figura 5: Montaje experimental. Los componentes principales incluyen un láser UV, cristal BBO Tipo-I, divisor de haz polarizado PBS, módulo de conteo de un solo fotón SPCM, detectores del haz testigo, transmitido y reflejado (G, T, R). Fibras ópticas dirigen la luz desde los detectores al SPCM.

El diseño y los componentes del montaje experimental se presentan en la Fig. 5. Un haz de láser ultravioleta entra en un cristal no lineal donde, a través de conversión descendente paramétrica espontánea SPDC, una parte de la luz es convertida en luz infrarroja (IR) y dividida en dos haces. Uno de los haces IR (llamado testigo) se utiliza como haz de bloqueo y pasa directamente del cristal a un fotodetector.

El otro haz (denominado señal), se dirige a un divisor de luz (BS) 50/50 y es posteriormente detectado por fotodetectores colocados tanto a la salida del haz de transmisión como de reflexión. Una fotodetección del haz testigo se utiliza para indicar que la señal está en el estado de un único fotón, y es la luz de este haz cuya coherencia de segundo orden es medida.

Las detecciones de los tres detectores G, T y R (ver Fig. 1) están registrados por una serie de convertidores de tiempo a amplitud y analizadores de un solo canal; luego se compilan las estadísticas de coincidencias para poder ser examinadas. Para comprender el montaje con detalle, es conveniente agrupar los componentes usados en tres categorías: fuente de luz, detección de luz, y conteo de coincidencias.

#### 1. Fuente láser

La fuente láser utilizada en el experimento es azul-violeta, tiene una longitud de onda de  $405\text{nm}$ , frecuencia doble y está polarizada linealmente. Antes de pasar por el cristal de conversión descendente, la luz pasa por un polarizador de media longitud de onda de  $400\text{nm}$ , que permite ajustar el ángulo de polarización para maximizar la tasa de conversión descendente de modo que girando la placa, la dirección de polarización también gira. Se realiza la SPDC usando un cristal de borato de beta-bario (BBO) con una conversión de Tipo I (ver Fig. 6) de modo que la luz de  $405\text{ nm}$  pase a ser una señal de  $810\text{ nm}$  y a su vez, sea dividida en un cono de luz.

Una vez hecho esto, la luz está polarizada verticalmente. En lugar de usar un BS normal de 50/50, se puede usar una combinación de un polarizador de media onda y un divisor de haz polarizado (PBS). El polarizador se ajusta de modo que la luz que entra en el PBS este polarizada a  $45^\circ$  con respecto a su eje de polarización; de este modo, la luz se divide igualmente entre las dos salidas. Nótese que al rotar la placa de media onda, se puede ajustar la polarización de entrada y de ahí la razón de división, permitiendo ajustar la división para que esté lo más cerca posible de 50/50.

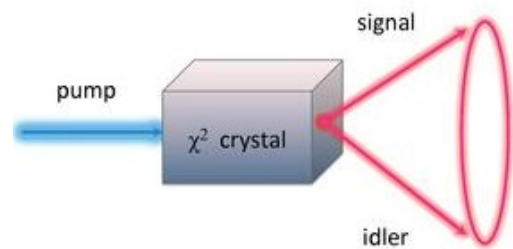


Figura 6: Esquema del cristal BBO I. El cono de luz genera un par de electrones llamados testigo y señal.

#### 2. Detección de luz

La óptica de recolección y sistemas de detección para los tres detectores (G, T y R) es idéntico. La luz de los haces, tan-

to del testigo como del transmitido y el reflejado, es recolectada por cables de fibra óptica conectados a módulos de conteo de fotones individuales (*SPCM*); los cables permiten que el sistema sea muy flexible y aseguran que la única luz detectada sea la que ingrese por las fibras, reduciendo la posibilidad de recoger luz ambiental. Los *SPCM* utilizan un fotodiodo de avalancha que produce un pulso de 30ns cuando detectan un fotón, con un tiempo muerto entre pulsos de 1s.

### 3. Conteo de coincidencias

Como se busca realizar un conteo de las coincidencias entre las salidas de diferentes detectores, se utilizó una ventana de coincidencia de 5.37ns, y las coincidencias se determinaron utilizando la combinación de un convertidor de tiempo a amplitud (*TAC*) y un analizador de un solo canal (*SCA*). Tres conteos de coincidencia fueron hechos, dos para coincidencias dobles (GT, GR) y uno más para coincidencias triples (GTR); sus salidas fueron grabadas por un tablero de conteo en la computadora. Se describirá como se usó el *TAC/SCA* para determinar las coincidencia doble de GT y GR.

Un *TAC* opera al recibir dos entradas, llamadas START y STOP, y luego emitiendo un pulso, cuya amplitud es proporcional al intervalo de tiempo entre las señales START y STOP. La proporcionalidad entre la amplitud y el intervalo de tiempo es controlado por la ganancia del *TAC* (V/ns). Para medir las coincidencias de GT, la entrada START comienza desde el detector G y la entrada STOP inicia desde el detector T.

Por su parte, el *SCA* opera al recibir un impulso de entrada, y emitiendo un impulso de salida si la amplitud de entrada cae dentro de un cierto intervalo de voltaje. El ancho del intervalo es ajustable, como es el nivel inferior de la ventana. La entrada al *SCA* está a la salida del *TAC*. El propósito de configurar el arreglo *TAC/SCA* es calibrar adecuadamente la ventana de *SCA* para maximizar las verdaderas coincidencias y rechaza las falsas, generadas por ruido blanco y fluctuaciones espontáneas en los instrumentos.

Para medir la coincidencia triple GTR, se usa T como la entrada START y R como la entrada STOP, y se configura el *TAC/SCA* para registrar las coincidencias TR. Se configura el *TAC* de modo que la señal G alimente a la entrada START, si un impulso de salida de no se presenta cuando el pulso de T llega a START, entonces el circuito de temporización en el *TAC* es deshabilitado, y no se produce ninguna salida.

Durante la toma de datos se realizaron 100 conteos por medición y se registró en seis fotocuentas: los conteos individuales de cada uno de los tres detectores,  $N_G, N_R, y N_T$ , así como las coincidencias  $N_{GT}, N_{GR}, y N_{GTR}$ . Se utilizó un tablero de conteo que simultáneamente cuenta seis canales diferentes y un programa de LABVIEW lee los datos del tablero.

### 4. Alineación óptica y calibración

Monitoreando la tasa de conteo del detector G, se ajusta la polarización de la fuente -rotando el ángulo de la placa de polarización- y la inclinación horizontal y vertical del cristal

para maximizar la tasa de conteo  $N_G$  de los fotodetectores. Posteriormente, se alinea el detector T de modo que aunque no se presente una tasa de conteos  $N_T$  máxima, haya suficientes conteos de coincidencia entre los detectores G y T; la óptica del haz T se ajusta para maximizar la tasa de coincidencia  $N_{GT}$ .

Una vez calibrada la óptica T, se alinea el detector R siguiendo la trayectoria del haz de modo que una vez colocado el polarizador de media onda y el *PBS*, la óptica se ajusta para que el conteo de coincidencias de GR este maximizado. Por último, la detección de coincidencias de GTR se configura de modo que a cada conteo existan coincidencias de este.

Se hicieron tres pruebas, la primera con los tres detectores tapados para reconocer la presencia de fluctuaciones de ruido blanco, la segunda con la puerta G bloqueada para hacer coincidencias dobles y la tercera con los tres fotodetectores contando triples coincidencias.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el sistema con dos detectores se utilizó una ventana de  $7.390000 \pm 0.030000$  ns para la coincidencia entre los detectores T y R. En la Tabla 1 se muestran los datos obtenidos.

	$N_T$	$N_R$	$N_{TR}$
Prom	74418.63	70883.92	39.62
$\sigma$	1054.23	626.46	7.97

Tabla I: Datos del experimento con dos detectores

A partir de los datos de la tabla anterior se encontró en el sistema de 2 detectores un valor de

$$\langle g \rangle_{2D}^{(2)} = 1.015430 \quad (9)$$

con una desviación estándar de

$$\sigma_{g_{2D}}^{(2)} = 0.199578, \quad (10)$$

Por otro lado, en el montaje experimental con tres detectores se utilizó una ventana de 5.37 ns y se midieron los datos presentados en la tabla 2.

	$N_G$	$N_T$	$N_R$	$N_{GT}$	$N_{GR}$	$N_{GTR}$
Prom	158296.27	72714.09	69682.69	2156.86	2644.46	2.11
$\sigma$	570.55	709.56	529.84	49.86	47.75	1.52

Tabla II: Datos del experimento con tres detectores

De ellos se encontró que la función de correlación en este caso tenía un valor

$$\langle g \rangle_{3D}^{(2)} = 0.051057 \quad (11)$$

con una desviación estándar de

$$\sigma_{g_{3D}}^{(2)} = 0.041824, \quad (12)$$

cuyo valor promedio fue  $\bar{g}_{3D}^{(2)} = 0.058336$ .

Como se observa en los datos de la sección, para dos detectores la función de correlación tuvo un valor de  $g_{2D}^{(2)} \geq 1$ , que de acuerdo a lo presentado en la teoría, corresponde al caso de luz agrupada, donde los fotones tienden a agruparse y así la probabilidad de contar coincidencias entre los detectores  $T$  y  $R$ , los cuales están correlacionados. Por otro lado, como se esperaba, el número de coincidencias es mayor a la de una señal aleatoria.

Los resultados correspondientes a  $g_{3D}^{(2)}$  (usando el tercer detector  $G$  como testigo) son menores a 1, lo cuál es una clara evidencia de la naturaleza cuántica de la luz. Como ya se introdujo, dado que los fotones son objetos de la mecánica cuántica, un experimento que requiere una explicación de la mecánica cuántica implicaría que hay más en el campo que solo la onda clásica. En este caso, las teorías clásicas no pueden explicar los resultados y se entiende que existen fotones individuales.

En principio, los detectores pueden medir fotones individuales. Sin embargo, tienen limitaciones como su eficiencia y resolución que puede afectar a los resultados. Se pueden tener coincidencias accidentales, los cuales dependerían directamente de la ventana de medición (que se encuentra en el orden de 20 ns). Esto es, fotones no correlacionados entren en los detectores  $T$  y  $R$  dentro de la ventana de tiempo. En el caso de tres detectores, una posibilidad es que el pulso de tres fotones entren a los tres detectores, pero una opción aún más probable es que ocurra una coincidencia en dos detectores y un fotón aleatorio en el tercero.

Parte de las limitaciones de los detectores se muestra en los resultados obtenidos en las funciones de correlación correspondientes a el láser apagado y para los detectores tapados. En el primero se tiene parte del ruido de fotones, que son fotones que no provienen del láser pero son detectados, mientras la segunda corresponde a la ineficiencia de los detectores y a las fluctuaciones cuánticas del vacío.

Sería conveniente el estudio de estos efectos y saber como afecta a los resultados. De esta forma se mejorarían las medi-

ciones, tratando de reducir estas coincidencias accidentales.

## VI. CONCLUSIONES

El comportamiento de luz, en el caso de dos detectores, corresponde al de luz aleatoriamente separada y agrupada en montones también aleatorios (bunched), que clásicamente corresponde a la luz que proviene de una fuente caótica, como una lámpara de arco; además posee un comportamiento ondulatorio. Por otro lado, para el caso de tres detectores el comportamiento que se observa es de luz que se agrupa con un espaciamiento regular entre ellos, un efecto que clásicamente no se observa y cuyo compartamiento corresponde al caso de una partícula. Otra forma de explicar esto es por las probabilidades. Cuando se agrega el tercer detector, la probabilidad de detectar al segundo fotón, ya sea reflejado o transmitido está condicionada a la probabilidad de detectar al testigo. En este caso la función de correlación es en todo caso menor o igual a 1. Así se concluye que la luz tiene un carácter cuántico y además esta compuesta de una partícula fundamental (fotón), la cuál es indivisible.

### A. Mejoras del experimento

1. Aumentar el número de datos medidos en el tiempo. Así podemos obtener más datos y mejorar el valor de la  $\langle g \rangle$  medida.
2. Disminución del ruido (luz de fondo) del laboratorio.
3. Probar con otros tipos de cristal fotónico y comparar las eficiencias.
4. Estudiar el efecto de la eficiencia de los detectores en las mediciones.

---

[1] H. Bachor and T. Ralph, *A guide to Experiments in Quantum Optics* (Wiley VCH, 2003).  
 [2] C. Gerry and P. Knight, *Introductory Quantum Optics* (Cambridge University Press, 2004).

[3] M. Fox, *Quantum Optics: An Introduction* (Oxford University Press, 2006).  
 [4] M. Beck, J. Soc. Opt. Am. **024**, 1000 (2007).