Supervisora: Mayerlin Núñez Portela

Construcción y caracterización de una fuente de fotones enredados.

Sergio Gutiérrez and Diego Silvera
(Dated: Febrero 2017)

Se construyó una fuente de fotones enredados producidos a través de conversión paramétrica espontánea o SPDC, a partir de un láser de diodo y un cristal BBO tipo I. Se efectuó una caracterización de la distribución espacial de los fotones, y posteriormente se acopló la luz a un divisor de haz en fibra óptica para medir el número de pares producidos en una configuración colineal. Se midió la correlación temporal de los pares producidos, y el espectro conjunto de la luz para entender las correlaciones en frecuencia de dichos pares. Por último, se estudió las condiciones de phase matching colineal y no colineal.

Palabras clave: Delay line ,Quantum Optics, Entangled fotons, SPDC, BBO, VSS

I. INTRODUCCIÓN

Este proyecto es parte de un experimento que propone estudiar la excitación de una transición atómica mediante la absorción de dos fotones entrelazados. Esto es posible modificando la correlación temporal de los pares producidos [1][2]. Debido a esto, el propósito de este proyecto radica en el estudio de la correlación temporal, en frecuencia y espacial de un par de fotones entrelazados. En la FIG. 1 podemos ver que para realizar este experimento es necesario un fuente de fotones SPDC producidos por un cristal BBO (Barium Borate Crystal), una línea que genera un retraso temporal entre los dos fotones producidos, una muestra y un sistema de detección.

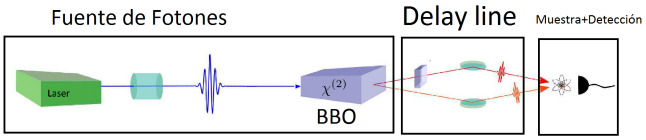


FIG. 1. Montaje Experimental

A partir de este esquema, se buscó medir la longitud de onda del láser incidente, evaluando la evolución de la misma con el paso del tiempo. Con una cámara CCD, se caracterizó el perfil y la correlación espacial de la fuente SPDC. Por último, se caracterizó la correlación en frecuencia del par de fotones que aparecen de la fuente, usando un sistema de conteo de fotones individuales o SPC(Single Photon Counter), y una targeta FPGA, con el objetivo de hacer un conteo apropiado de las coincidencias temporales encontradas.

II. MARCO TEÓRICO

Para poder desarrollar de manera adecuada el proyecto en curso, es necesario tener en cuenta algunos conceptos teóricos relevantes para el desarrollo del experimento.

A. Conversión paramétrica espontánea (SPDC)

Un Cristal no lineal es usado para generar un par fotones signal e idler que están correlacionados en espacio, tiempo y frecuencia. El mecanismo a partir del cuál esto ocurre se denomina SPDC(Conversión paramétrica espontánea) y tiene que ver con la producción de un par de fotones como resultado de hacer incidir un haz inicial en el cristal. Las correlaciones de estos fotones provienen de la conservación del momento y la energía entre el haz incidente y los fotones producidos. Esto se puede escribir como [**?**],

$$w_p = w_s + w_i \ , \ \vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$$

donde el $w_p, \vec{k}_p$ es la frecuencia y vector de onda del la luz de bombeo, y $w_{s,i}, \vec{k}_{s,i}$ corresponden a la frecuencia y vector de onda de los fotones producidos. Las anteriores son conocidas como condiciones de "phase matching". Los cristales no lineales tiene diferentes índices de refracción para cada polarización. Existen cristales no lineales tipo 1 y tipo 2. Un cristal tipo 2 produce un perfil espacial como el que se ve en la FIG. 2 (SPDC tipo 2). Este perfil corresponde a pares producidos con polarizaciones ortogonales, en cambio un cristal tipo 1 genera pares de fotones con polarizaciones paralelas mostrando un perfil espacial que corresponde a un solo anillo, como se logra apreciar en la FIG. 3. El perfil espacial depende de la orientación del cristal con respecto a la polarización de la luz incidente.

B. Retraso temporal entre pares de fotones

Para cada tipo de cristal BBO se tiene que implementar una forma diferente de generar un retraso temporal entre un par de fotones. Para un cristal tipo 1 tenemos que los pares salen con la misma polarización, así que generaremos un retraso temporal separando los fotones usando un beam splitter y haciendo que un fotón recorra un camino mas largo que el otro. Implementar esto experimentalmente no tiene mayor complicación pero al

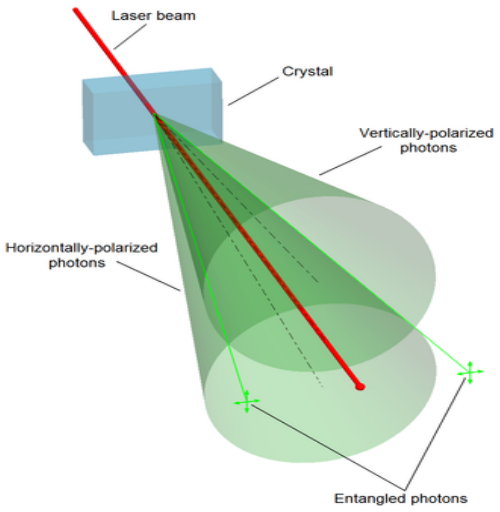


FIG. 2. Ilustración del perfil espacial generado en un proceso SPDC tipo II. Se producen dos conos de luz, espacialmente distribuidos como se observa arriba.

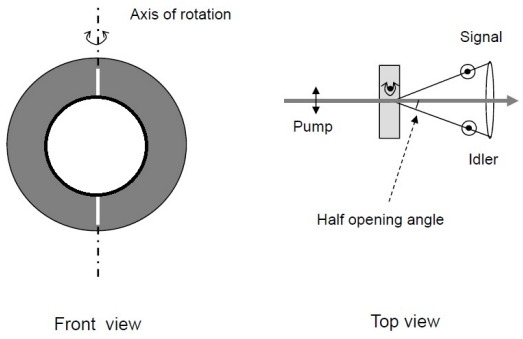


FIG. 3. Ilustración de un proceso SPDC tipo I llevado a cabo a través de un cristal BBO I. El perfil espacial de los fotones signal y idler corresponden a un único cono. Dos fotones correlacionados en frecuencia y posición se señalan en la figura. Se puede demostrar que un par de fotones correlacionados siempre están ubicados a lo largo de una línea que pasa por el centro del cono.

momento de re-alinear los pares de fotones se usa otro beam splitter generando un ruido probabilístico muy alto en el que se pierde mayor parte de la señal querida. En el caso de un cristal tipo 2, el retraso puede ser generado utilizando un cuarzo el cual tiene un índice de refracción que depende de la polarización de la luz. Para este caso, idler y signal son perpendiculares, y la polarización del bombeo es igual a la polarización del signal.

Por otro lado, es importante anotar que el retraso que se espera generar para la luz transmitida es de 29.73 fs por cada milímetro de cuarzo recorrido.

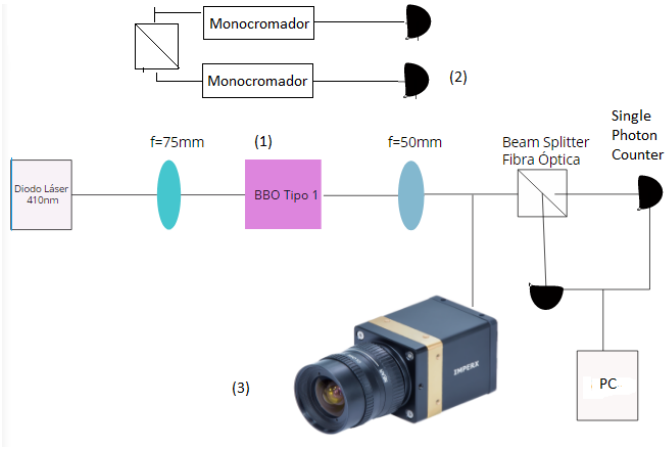


FIG. 4. Ilustración del montaje a usar para generar fotones correlacionados a través de SPDC. Se hace pasar un láser de 410nm a través de una lente con una distancia focal de 75mm. Luego, el haz pasa por el BBO y posteriormente alcanza una lente con distancia focal 50mm. Posteriormente, se puede observar su distribución espacial através de una cámara CCD(2). Por último, signal e idler se acoplan a dos fibras ópticas, para medir el número de coincidencias temporales entre dos pares de fotones, a través de un sistema de single photon counter o SPC. Por otro lado, se tiene una configuración similar a esta, aunque agregando un monocromador previo al SPC, lo cual separa distintas longitudes de onda de la luz. Utilizando el monocromador se hallan las correlaciones de frecuencia de los pares de fotones, a través dle joint spectrum.

III. MARCO EXPERIMENTAL

A. Metodología

Para lograr lo propuesto en la sección de objetivos, se requerirá el uso preferencial de cristales BBO tipo I(disponible en el laboratorio de la Universidad), dado a que los cristales tipo II generan un espectro de longitudes de onda muy estrecho, lo que no permite alcanzar las frecuencias de excitación que se requieren para el experimento de espectroscopia virtual posterior al proyecto. El cristal tipo I es bombeado con un láser de diodo a 411 nm, para producir pares de fotones a 822nm. Estos pares son acoplados en un beam splitter de fibra óptica. Los fotones son detectados después de filtrar el bombeo usando espejos dicroicos y filtros pasa altas en longitud de onda. Una cámara CCD se usa para observar la distribución espacial y posteriormente se usará detectores de fotones individuales o FPGA. El esquema del montaje experimental para el proceso SPDC se muestra en la Fig. 4. La figura 5 muestra una foto del montaje efectuado en el laboratorio para realizar las mediciones requeridas:

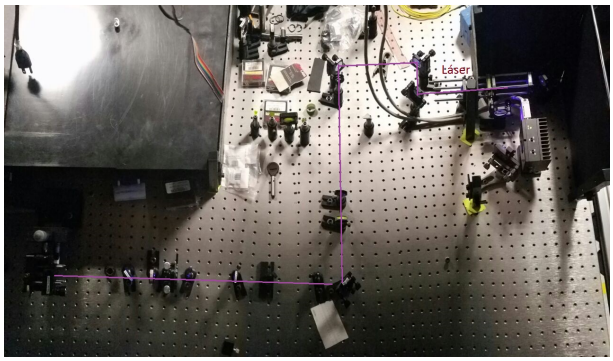


FIG. 5. Montaje experimental efectuado, visto desde arriba. A la derecha se observa el láser, con longitud de onda de 410nm. Desplazándose hacia la izquierda, se observa el camino óptico que lleva el láser, pasando por varias lentes y espejos, hasta llegar al cristal BBO. Al final de dicho recorrido, ocurre el proceso SPDC, en la esquina izquierda inferior de la imagen.

IV. RESULTADOS OBTENIDOS

A. Longitud de onda del láser

Para caracterizar el láser de bombeo usado para desarrollar la fuente SPDC, se hizo mediciones a dos horas distintas el día 25 de Abril de su longitud de onda. Con los datos encontrados a partir del espectrómetro de Ocean Optics, se hizo un fit en a una distribución gaussiana y se encontró que en promedio su longitud de onda fue de 411.77 nm hacia las 3:12 pm. Casi una hora después, hacia las 4:07, se vio que la longitud de onda permanecía constante, como se esperaba, dado que la gaussiana estaba centrada en 411.76nm. A continuación, las figuras que demuestran la la invariabilidad de la energía del láser con el tiempo:

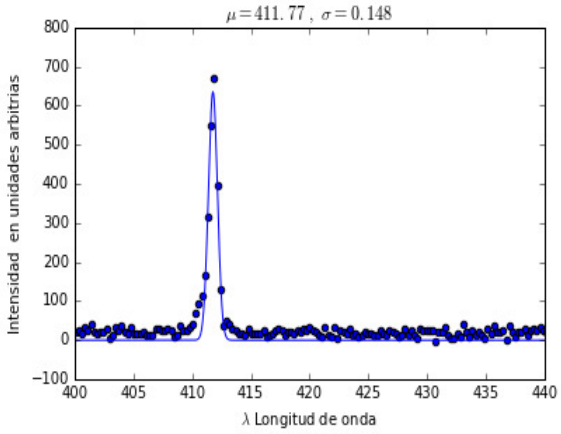


FIG. 6. Primera toma de datos para la longitud de onda del láser. Se muestra una distribución gaussiana cuya intensidad está centrada en $\lambda = 411.77nm, \sigma = 0.148nm$

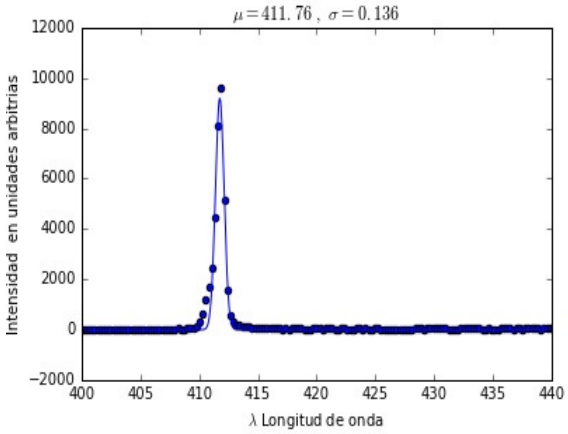


FIG. 7. Segunda toma de datos para la longitud de onda del láser, efectuada una hora más tarde. Se muestra una distribución gaussiana cuya intensidad está centrada en $\lambda = 411.76nm, \sigma = 0.136nm$. Es evidente que la longitud de onda permanece constante con un pequeño margen de error al pasar el tiempo.

B. Caracterización de la fuente SPDC

Posteriormente, se caracterizó la fuente SPDC haciendo rotaciones en dos planos distintos para el cristal BBO, usando dos perillas que permitían efectuar dicho procedimiento. Rotando una de las perillas, el anillo de fotones entrelazados divergía respecto al centro, evidenciando la conversión paramétrica espontánea del láser. Esto sucedía porque inicialmente todos los fotones iban en la misma dirección, pero al rotar en un plano paralelo al láser, la distribución espacial de los fotones cambiaba, evidenciándose un anillo y en su centro un punto luminoso que es el residuo del láser de bombeo. Estas medidas se muestran en la Fig. 8, donde la cámara se ubicó a una distancia de 176mm del cristal.

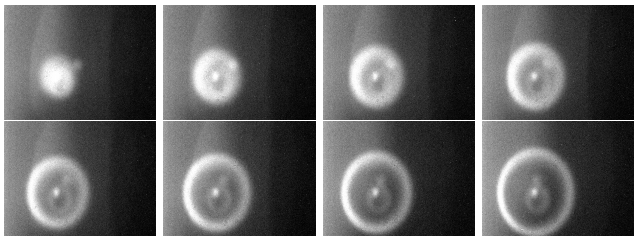


FIG. 8. Caracterización de la fuente SPDC con la cámara CCD a 176mm del cristal. Se puede observar cómo la luz diverge respecto al centro a medida que se efectúa la rotación de un plano del cristal. La luz que se ve hacia el centro del anillo corresponde al residuo del láser de bombeo y el anillo a los fotones SPDC. La primera imagen corresponde un espectro espacial colineal, y la última es no colineal.

Luego de esto, dejamos la configuración como estaba en la última imagen de la figura anterior, y se cambió la

distancia entre la cámara CCD y el cristal, obteniendo las siguientes en la Fig. 9.

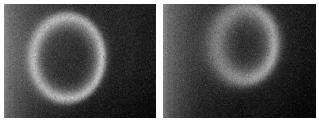


FIG. 9. Caracterización de la fuente SPDC con la cámara CCD a distancias de 387 mm(Izquierda) y 612 mm (Derecha) respecto al cristal. Se puede observar que el punto luminoso en el centro del anillo desaparece para estos dos casos (no se observa el pump del láser)

Por último, se hizo una rotación del cristal en un plano perpendicular a la dirección del láser, haciendo uso de otra perilla. Los resultados se ilustran en las imágenes de la Fig. 10.

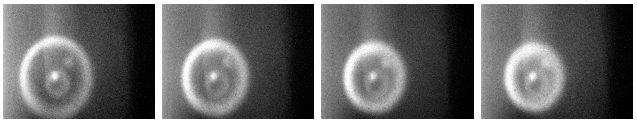


FIG. 10. Rotación en un plano distinto del cristal BBO. Se puede observar que para este grado de libertad, no solo varía el radio del anillo, sino que además el espesor del mismo cambia con la rotación de la perilla. Dicha rotación se efectúo de la siguiente manera: La primera imagen corresponde a 90^0 respecto a la posición de referencia, la siguiente a 60 grados, luego 30 y el último corresponde a la posición original de la perilla. Observe que el tamaño del radio no cambia, pero sí varía la distribución de fotones, dado que el anillo cambia de grosor.

Para hacer uso de la fuente SPDC en mediciones posteriores, se utilizó el perfil en el cual se observa un único punto con un grosor considerable, el cual corresponde a la primera imagen en la FIG. 8, es decir, la configuración colineal.

C. $G^2(\tau)$ y Coincidencias de fotones

Luego, acoplamos los fotones a una fibra, con un divisor de haz en fibra y detectamos el número de fotones por cada una de las dos fibras a través de un sistema de single photon detection, que se puede entender como la presencia de un detector asociado a cada una de las fibras. Una tarjeta FPGA permitió contar el número de fotones por fibra y el número de coincidencias. La Fig. 11 muestra resultados de la correlación temporal de los fotones. Se grafica el número de coincidencias en función de un delay electrónico de uno de los detectores. El otro detector se mantiene en un delay de $10 \times 1,8ns$ Se puede observar que dichas coincidencias eran máximas a un tiempo de retraso relativo entre ambos detectores iguales, como se espera al tratarse de fotones correlacionados espacial y temporalmente. Adicionalmente, se muestra el panel del programa de conteo, con el número de coincidencias entre pares de fotones y el conteo de fotones por cada una de las fibras:

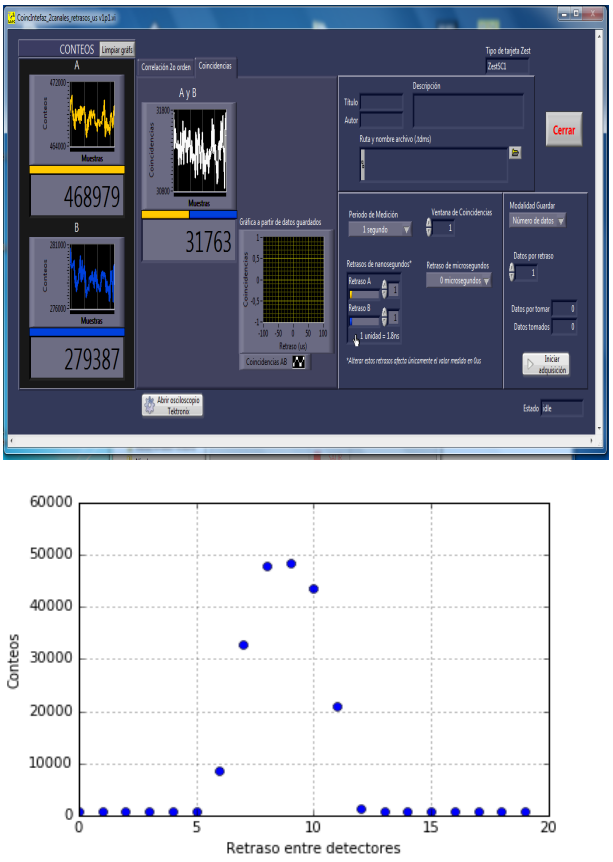


FIG. 11. Arriba: Número de coincidencias entre pares de fotones y el número total de fotones contados por fibra, es lo que se observe en el panel del programa de conteo. Abajo: G2, o función de correlación temporal para los datos obtenidos, por 1.8ns(1 una unidad de retraso equivale a 1.8ns), donde también se observa el error estadístico pero cae dentro del punto

D. Joint Spectrum

De manera similar a la G2, el joint spectrum muesta la correlación entre el par de fotones producidos luego del proceso SPDC. Sin embargo, a diferencia del primero, dicha gráfica muestra cómo se relacionan las longitudes de onda λ_s y λ_i de un par de fotones con la cantidad de coincidencias temporales, dependiendo del valor de cada una de estas frecuencias. En la Fig. 13, se muestra el joint spectrum para la fuente construida. La intensidad de los colores en la gráfica es mayor en puntos donde la cantidad de coincidencias temporales es elevada, y los colores se desvanecen si el conteo es bajo:

A continuación, se evidencia también la intensidad de conteos para distintas longitudes de onda de λ_s y λ_i. El pico de intensidad para cada una de las gráficas co-

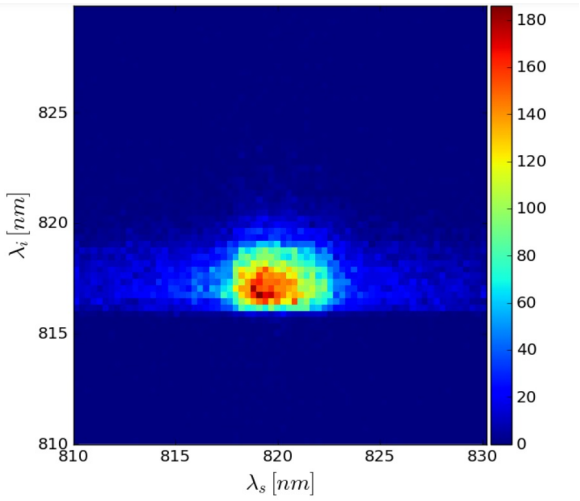


FIG. 12. Se observa que hay un máximo de conteos alrededor de de las longitudes de onda de 820 nm para un par de fotones correlacionados. Sin embargo, en regiones aledañas se esperaría un mayor conteo y esto no ocurre explícitamente.

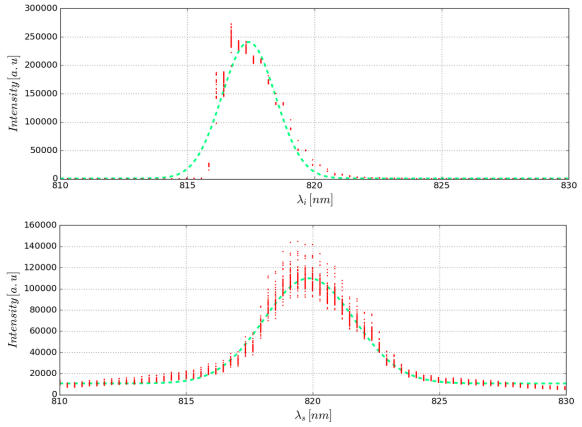


FIG. 13. Distribución de intensidades para λ_s (Abajo) y λ_i (Arriba), con sus respectivas barras de error. Loas picos de ambas gráficas son cercanos en cuanto al valor de la longitud de onda, como se observa en el joint spectrum.

incide para el mismo valor aproximado de longitud de onda, como se puede observar: Si bien el joint spectrum muestra un pico de intensidad cerca del punto $\lambda_s = 816nm, \lambda i = 820nm$, tal como se espera dadas las condiciones de phase matching ,la gráfica no es por completo la esperad, debido a que en teoría, debería haber un rango amplio de puntos cercanos a 820nm[3] para los que hay conteos de coincidencias temporales del par de fotones entrelazados, esparcidos en una región con una forma similar a una elipse con uno de sus ejes mucho mayor al otro, donde el máximo de intensidad está en ese punto, y una disminución de la intensidad amedida que se aleja de este punto central. En cambio, lo que se observa es el pico de intensidades cerca del punto descrito, pero no se observan conteos en otros puntos más alejados de la gráfica(Las intensidades se concentran en un rango de puntos que no es muy grande).Este efecto es observado puesto que el diámetro de la fibra óptica e menor al diámetro del haz de luz así que los monocromadores no pudo hacer el barrido completo, así perdiendo una gran parte del haz. Debido a esto entonces observamos el el join espectrum cortado.

V. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

A partir de la experimentación que se efectuó a lo largo de este proyecto, se llega a la siguientes conclusiones:

- La longitud de onda del láser se mantiene constante a lo largo del tiempo, en un valor de 411.77nm, si bien existen variaciones ligeras alrededor de 0.01nm. Esto algo fundamental para los objetivos de la experimentación.

- Se logró caracterizar correctamente la correlación espacial y temporal, posterior al proceso SPDC efectuado a través del cristal BBO. Se observó que el número de coincidencias era máximo alrededor de las frecuencias esperadas y cuando el retraso electrónico era igual para ambas fibras ópticas.

- Se hizo una medición del joint spectrum, que si bien no muestra el espectro completo esperado, tiene un pico de conteos alrededor de los valores de longitudes de onda λ_s y λ_i esperados.

Estos resultados buscan ser utilizados para realizar una transición de estado virtual entre dos estados de un material haciendo uso de un par de fotones correlacionados. Y como se observó en la experimentación, esto se ha logrado parcialmente, dado que el joint spectrum no muestra el resultado esperado en su totalidad.

[1] G. K., K. (2005). Introduction to Quantum Optics. *Cambridge University Press.*

[2] Hanne, G. F. (1998). Virtual State Spectroscopy. *Journal of Physics*, 8:56.

[3] Valencia, A., Ceré, A., Shi, X., G., M., and J., T. (2013). Shaping the waveform of entangled photons.