

**Formato de Presentación de Informes para emisión de paz y salvos de Asistencias
Intersemestrales (junio-julio 2022)
Fecha de entrega: 22 de agosto 2022**

1. Nombre del estudiante y código

Jeimmy Alejandra Alarcón Carvajal - 202027993

2. Programa de posgrado al que pertenece

Maestría en Ciencias - Física

3. Nombre del profesor asesor

Alejandra Catalina Valencia González

4. Título de la propuesta

Interferómetro en variables espaciales usando una fuente de pares de fotones no correlacionados y su interpretación desde teoría de la información.

La interferencia es la base de tecnologías cuánticas como la teleportación cuántica, protocolos de comunicación cuánticos y computación cuántica [1,2]. Estas tecnologías pueden ser vistas desde la óptica cuántica como teoría de la información.

El fenómeno de interferencia en óptica cuántica puede ser estudiado en los diferentes grados de libertad de la luz, como tiempo, polarización, variables espaciales tal como el momento angular orbital y momento transversal. Específicamente, la interferencia usando los grados de libertad de polarización de la luz han sido empleados en el desarrollo de tareas de información cuántica [3]. Para incrementar los grados de libertad de los sistemas fotónicos las variables temporales y espaciales han surgido como alternativa. La interferencia en variables temporales es relevante para redes interferométricas y es un elemento fundamental para el procesamiento de información cuántica [4]. Por otra parte, las variables espaciales de la luz, el momento angular orbital y transversal han surgido como una alternativa para incrementar los grados de libertad de los sistemas fotónicos, lo cual puede ser usado como un recurso para aplicaciones basadas en efectos cuánticos [5,6].

La interferencia depende de la indistinguibilidad de los fotones que están interfiriendo. Debido a que las fuentes de fotones no son completamente indistinguibles, la indistinguibilidad representa un desafío a la hora de desarrollar aplicaciones basadas en interferencia cuántica. Una forma de lidiar con la indistinguibilidad es considerando que aún cuando los fotones son distinguibles en una variable, la interferencia puede observarse en su variable conjugada [7,8,9].

Por ejemplo, si los fotones son distinguibles en tiempo, la interferencia puede ser observada en el dominio de las frecuencias; análogamente, para fotones distinguible en

posición, la interferencia se observa en las variables de momento transversal. Este fenómeno ha sido observado experimentalmente en el grupo de Óptica Cuántica en la universidad de los Andes para el caso de luz clásica en el dominio temporal [10] y espacial [11].

Por otra parte, se ha estudiado la interferencia cuántica en función de la distinguibilidad de los fotones. Sin embargo, surge otra variable importante a considerar: la resolución de los detectores. En el caso de múltiples fotones, el desarrollo de técnicas de resolución temporal ha permitido la observación de interferencia en experimentos de correlaciones de óptica lineal, revelando nuevas características de la interferencia [12,13,14]

Estudios posteriores demostraron que la descripción de las mediciones con resolución temporal en interferómetros de múltiples fotones en términos de teoría de la información representa una ventaja a nivel computacional en comparación con la computación clásica [15,16].

Actualmente, en el grupo de óptica cuántica de la universidad de los Andes se han realizado propuestas teóricas [17] y experimentales [18] para estudiar la interferencia espacial entre dos fotones distinguibles en variables espaciales. La propuesta experimental [18], se divide en tres componentes principalmente. 1) Una fuente de pares de fotones no correlacionados espacialmente que puedan ser distinguibles espacialmente y en momento transversal. 2) Un interferómetro con dos entradas y dos salidas que de manera experimental se obtiene a partir de un divisor de haz (BS). 3) El sistema de detección consiste en detectores de fotones individuales ensamblados en motores que permiten hacer un rasterizado para estudiar la forma espacial en las salidas del BS.

5. **Objetivos propuestos:** Vuelva a enumerar los objetivos que incluyó en la propuesta, seguido de una explicación breve de lo que logró realizar para cada objetivo.

Objetivo general

Avanzar en resultados experimentales y teóricos de la propuesta de maestría [18].

Objetivos específicos

1. Generar pares de fotones no correlacionados espacialmente.
2. Caracterizar la polarización del par de fotones y alineación de estos en todas las etapas del montaje experimental.
3. Alinear el interferómetro.
4. Calcular la probabilidad conjunta a la salida del interferómetro en términos de permanentes de unas matrices en aras de interpretarlo desde la perspectiva de la información.

5. **Resultados encontrados:**

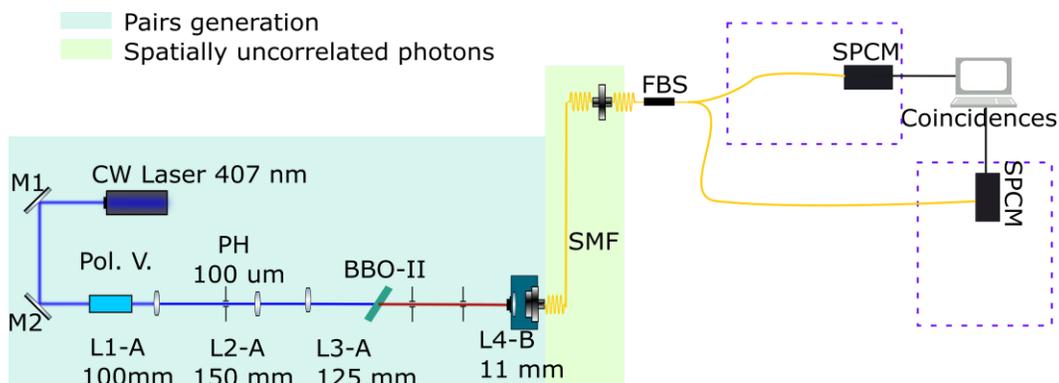


Figura 1: Montaje experimental implementado para obtener pares de fotones generados por SPDC usando un BBO-II.

Primero, se midió la longitud de onda usando el equipo OceanView dando un resultado de 407nm. Luego, se midió la propagación Gaussiana del láser usando el equipo BeamMaster en 17 puntos de la mesa óptica cada 5cm. graficó en la figura 2 la propagación Gaussiana del láser. Los datos que detallan la propagación se observan en la tabla 1 y son evidencia de que el haz no es simétrico en las dos direcciones.

Dirección (mesa)	Waist (μm)	Z_Rayleigh (cm)	Posición (cm)
Perpendicular (x)	610,7	289,1	48
Paralela (y)	528,3	216,5	124

Tabla 1: Datos de la propagación gaussiana en dirección X y Y, es decir perpendicular a la mesa óptica y paralela a la pesa óptica - perpendicular al eje óptico, respectivamente. La posición hace referencia a la posición del Z_Rayleigh medido desde la posición del láser.

Figura 2: Montaje experimental en la mesa óptica para medir la propagación Gussiana del Láser.

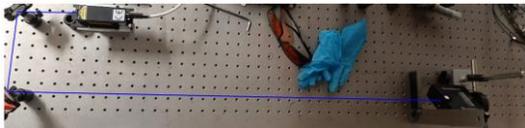
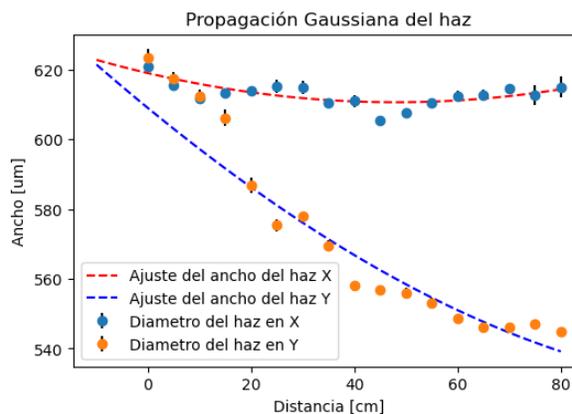


Figura 3: Datos experimentales (puntos) y ajuste (línea punteada) de la propagación Gaussiana en el eje X y Y, perpendicular y paralelo a la mesa óptica, respectivamente.



Para generar los pares de fotones experimentalmente se utilizó un láser CW. Se calculó que el waist del haz de bombeo que debe incidir sobre el cristal BBO TII debe ser de 50 μ m para tener una distancia de colección de aprox. 30cm.

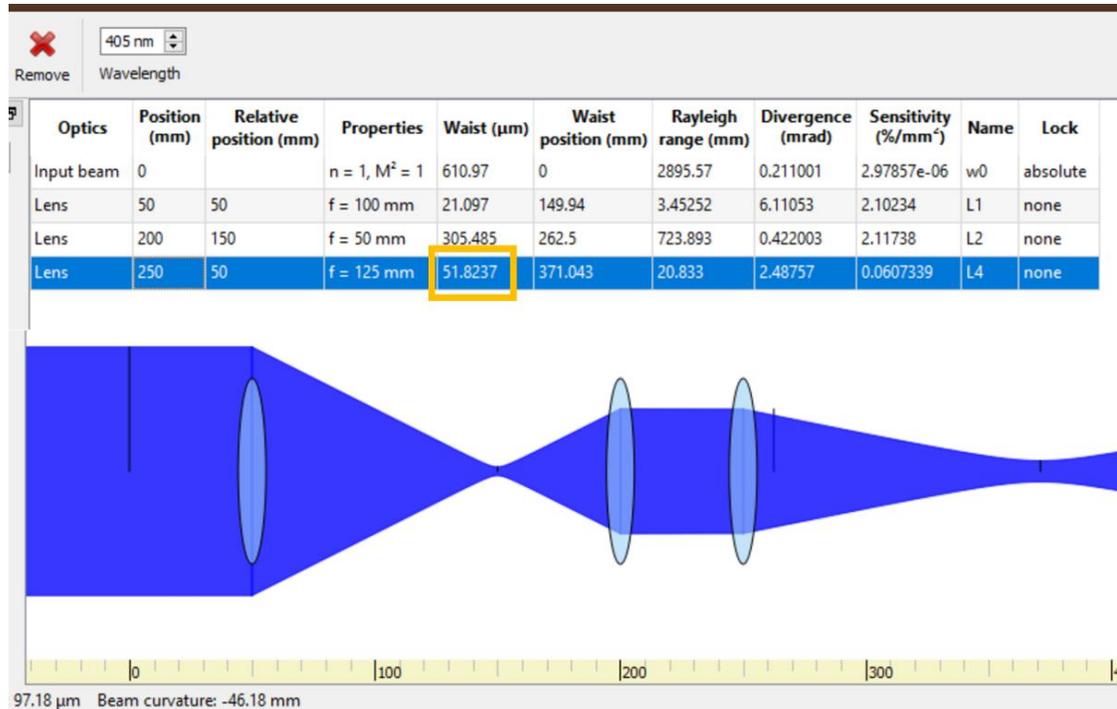


Figura 4: Simulación de la propagación del láser en el programa GaussianBeam a través de lentes para obtener un waist de aproximadamente 50 μ m.

Como la polarización del haz de bombeo determina la polarización de los fotones generados por SPDC TII antes del filtro espacial se ubicó un polarizador que fijara el estado de polarización de la luz vertical. Luego, se diseñó el filtro espacial con el fin de obtener un waist de aproximadamente 300 μ m. El tamaño del pinhole se calculó en 85 μ m siguiendo *Spatial Filter Tutorial Tholabs*, sin embargo se usó un pinhole de 100 μ m por razones de recursos. Se tomaron datos del diámetro de la propagación para diferentes posiciones de la plataforma micrométrica de la segunda lente y se fijó finalmente en la posición que generaba una longitud de Rayleigh mayor, es decir, la posición para la cual el haz estaba colimado. Los datos obtenidos se observan en la figura 6.

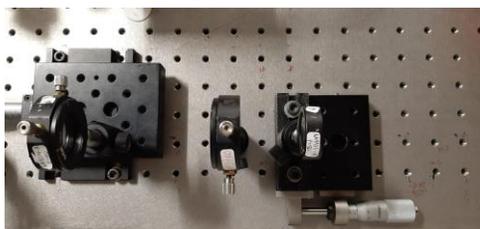
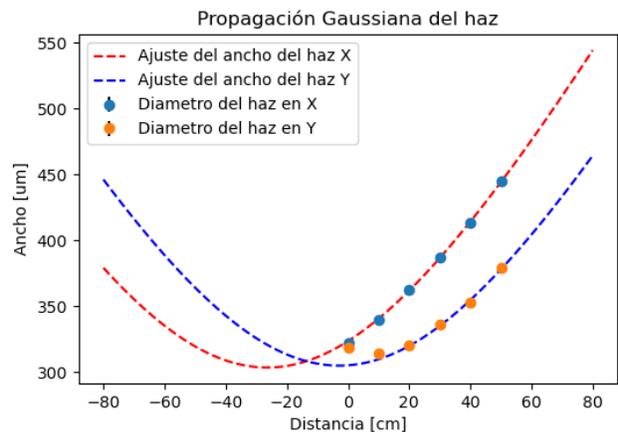


Figura 5: Filtro espacial. Lente $f_1=100$ mm,



Pinhole 100um, Lente $f_2=50\text{mm}$.

Figura 6: Datos experimentales (puntos) y línea punteada ajuste.

Dirección (mesa)	Waist (μm)	Z_Rayleigh (cm)	Posición (cm)
Perpendicular (x)	303,7	71,5	-26
Paralela (y)	305,1	72,2	2

Tabla 2: Datos de la propagación gaussiana en dirección X y Y, es decir perpendicular a la mesa óptica y paralela a la pesa óptica - perpendicular al eje óptico, respectivamente. La posición hace referencia a la posición del Z_Rayleigh medido desde la posición de la segunda lente del filtro espacial.

Posteriormente, en el intervalo dado por la longitud de Rayleigh se ubicó una lente de $f_3=125\text{ mm}$ de distancia focal con el fin de obtener un waist de $51\mu\text{m}$ y longitud de Rayleigh $z_{\text{Rayleigh}}=2\text{cm}$.

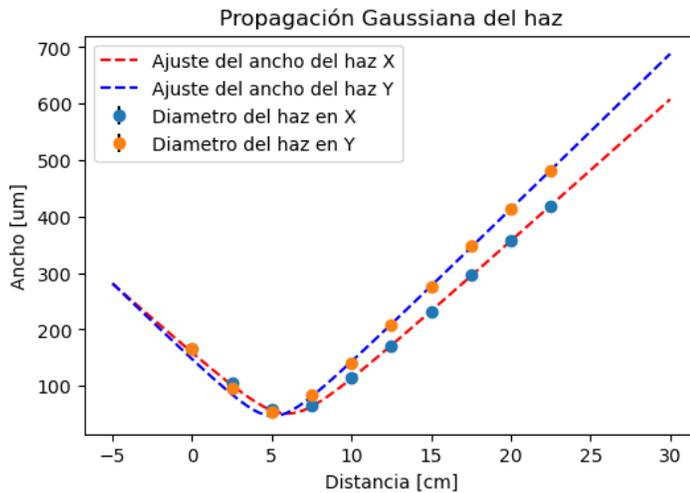


Figura 7: Datos de la propagación Gaussiana después del filtro espacial y lente de 125mm de distancia focal. Los datos experimentales están representados con puntos, mientras el ajuste de se muestra con líneas punteadas.

Los pares de fotones son generados usando un cristal no lineal BBO de $5 \times 5 \times 4.0\text{mm}$ Tipo II diseñado para generar pares de fotones por SPDC a un ángulo de 5° del eje óptico (HO5) cuando es bombeado con radiación a 405nm . Debido a que el cristal no está cortado para generar los pares de fotones de manera colineal, fue necesario ubicarlo con un ángulo dado respecto al eje óptico. Usando la cámara Santa Barbara Instruments Group (SBIG) modelo 1603ME se ubicó la posición del NLC BBO para el cual se observan los anillos en configuración colineal, como se observa en la figura 8.



Figura 8: Montaje experimental en la mesa óptica: polarizador, filtro espacial $L_1=100\text{mm}$ $\text{PH}=100\mu\text{m}$ y $f_2=50\text{mm}$, lente $f_3=125\text{mm}$, BBO TII, polarizador y CCD.

Luego, usando un polarizador entre la cámara y el BBO se confirmó que la polarización de los anillos es horizontal y vertical, como se muestra en la figura 9.

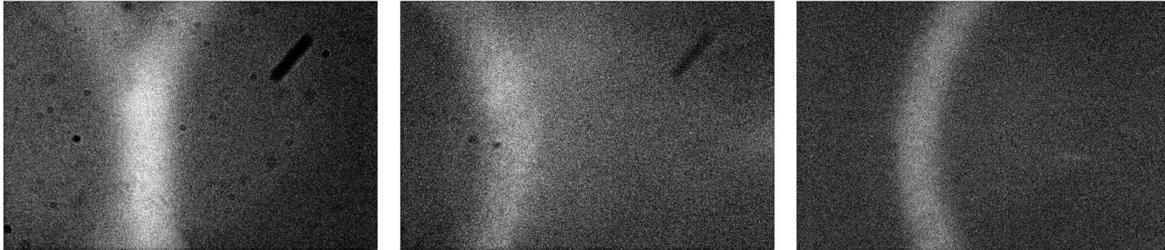


Figura 9: La figura de la izquierda muestra los anillos sin polarizador. En la figura del centro se observa el anillo cuando el polarizador se encuentra frente a la cámara y solo permite transmitir la componente vertical de la luz. En la figura de la derecha se observa el anillo cuando el polarizador se encuentra frente a la cámara y solo permite transmitir la componente horizontal de la luz.

Posteriormente, se ubicaron dos pinholes de tal forma que la intersección de los anillos pasara por ellos al cerrarlos, como se observa en la figura 10.

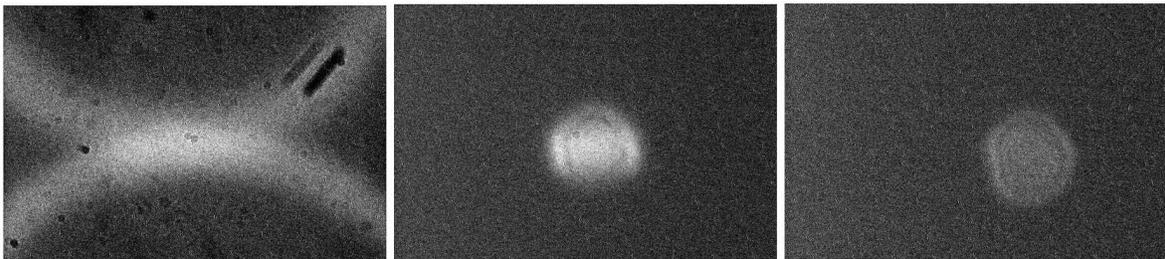


Figura 10: La figura de la izquierda muestra los anillos sin polarizador. En la figura del centro se observa el la intersección cuando el PH1 está cerrado y en la figura de la derecha se observa el PH2 cerrado.

Para lograr coleccionar la luz en la fibra óptica, usando el programa GaussianBeam se calculó la distancia a la cual debía ubicarse el sistema de colección: 32,3cm medido desde el BBO hasta la lente.

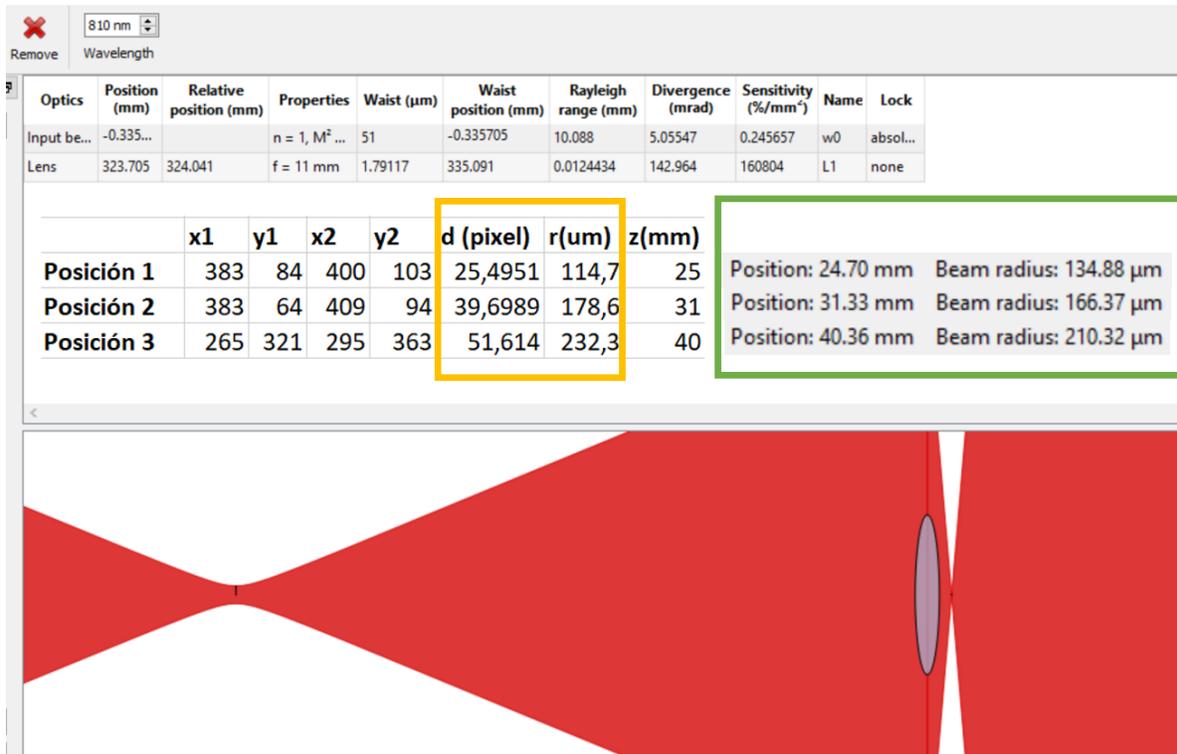


Figura 11: Propagación SPDC y datos de la propagación medidos para tres posiciones de la cámara. Los datos medidos se encuentran en el recuadro amarillo, mientras los datos esperados se visualizan en el recuadro verde.

Luego, se alinea el sistema de detección (KX6). Para esto es necesario: verificar la altura y dirección de del KX6 usando los tornillos de las plataformas micrométricas #1,2 y los tornillos de inclinación #3,4,5, respectivamente. Se modifica la posición de la lente usando los tornillos #6,7 para centrarla. Usando un retrobeam y la CCD thorlabs se tomó la imagen para la posición de la lente en la que el haz se encontraba centrado. Usando el tornillo micrometroco #8 se modificó la distancia entre la fibra y la lente para poder acoplar la luz.

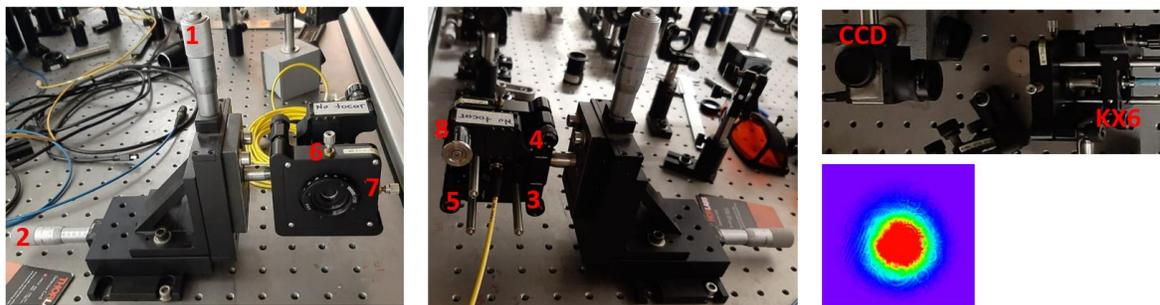


Figura 12: En la figura de la izquierda y del centro se observan los tornillos para graduar el sistema de colección. 1 y 2 modifican la posición vertical y horizontal del KX6. 4 y 5 modifican la dirección vertical y horizontal del KX6. 6 y 7 modifican la posición horizontal y vertical de la lente respecto a la fibra óptica. En la figura de la derecha se observa en la parte superior la imagen de la CCD frente al KX6 y en la figura inferior la imagen obtenida en la CCD del haz de retroceso.

Finalmente, para obtener coincidencias en los detectores, la alineación consiste en conectar la fibra a un contador y aumentar los números modificando primero la posición y la dirección del KX6, y corregir al mismo tiempo con la posición de la lente y la distancia focal. Primero, se utiliza una fibra multimodo y se alinea hasta obtener al menos 1M de singles. Luego, se conecta la fibra monomodo para una longitud de onda 820nm y de 3,6µm de diámetro y se alinea hasta obtener al menos 300.000 singles. Finalmente se conecta el Beam Splitter en fibra y se empiezan a observar las coincidencias, cuando el acopamiento es óptimo las coincidencias corresponden al 10% de los singles del brazo con menor número. Para aumentar el número de coincidencias se desacopla la luz con la posición y dirección del KX6 hasta la mitad del número y se compensa con la posición de la lente.

Finalmente, se obtuvo la fuente de pares de fotones no correlacionados al medir la probabilidad conjunta de detección.

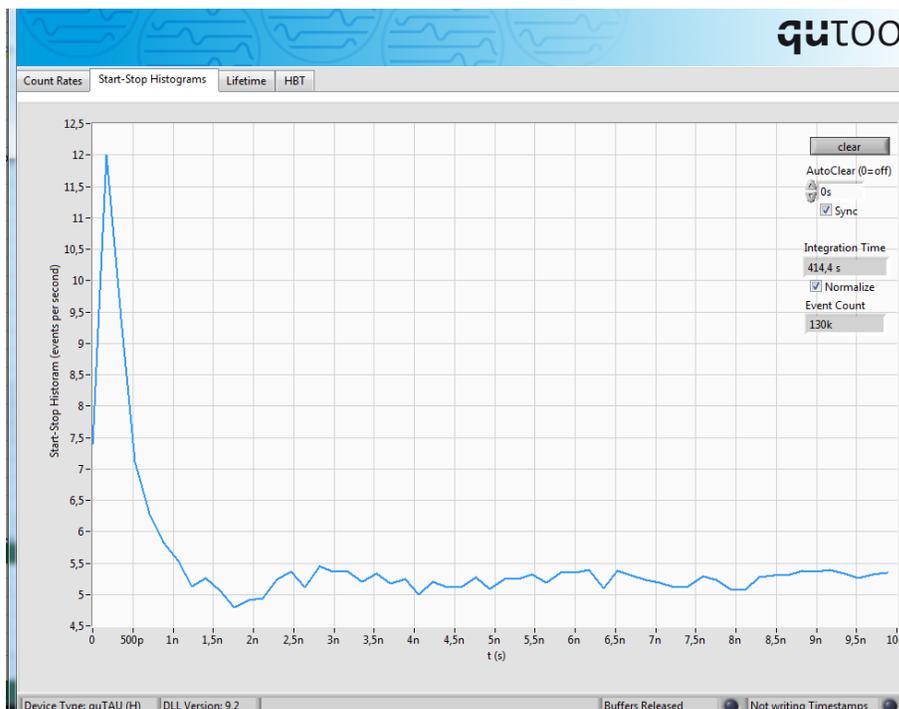


Figura 13: Histograma de las coincidencias en un rango de 0 a 10ns. El pico corresponde a un tiempo de 176ps, lo cual quiere decir que los pares de fotones llegan con una esta diferencia de tiempo a los detectores.

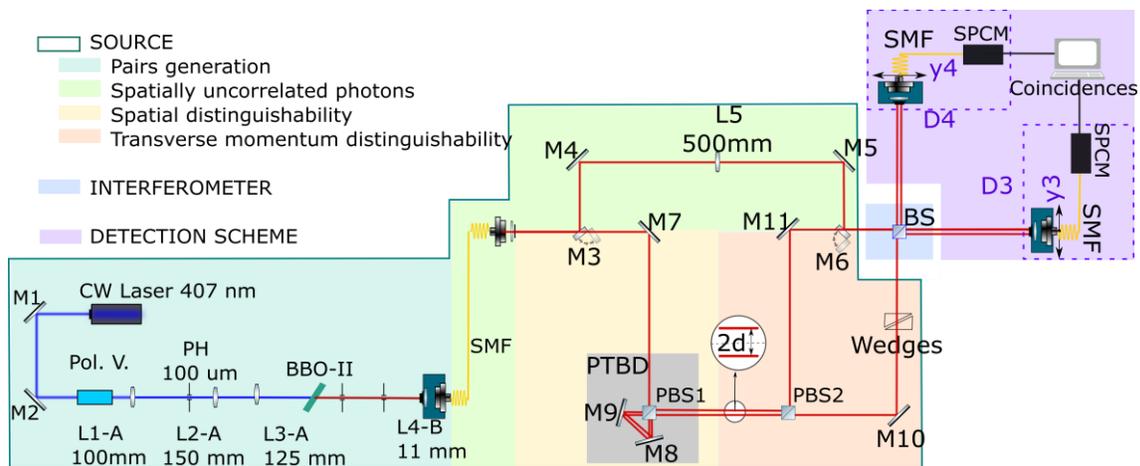


Figura 14: Montaje experimental planteado para el interferómetro.

6. Justificación de incumplimiento:

No fue posible construir y realizar las actividades relacionadas con el interferómetro y los detectores debido a que la fuente tomó más tiempo de lo planificado. Adicionalmente, en el departamento médico de la universidad se puede verificar que hubo cuestiones de salud que me dificultaron también realizar mi trabajo adecuadamente.

8. Referencias:

[1] M. Stobińska and A. Buraczewski and M. Moore and W. R. Clements and J. J. Renema and S. W. Nam and T. Gerrits and A. Lita and W. S. Kolthammer and A. Eckstein and I. A. Walmsley *Quantum interference enables constant-time quantum information processing*. *Science Advances*, **5**, 7 eaau9674 (2019)

[2] Wang, J., Sciarrino, F., Laing, A. et al. *Integrated photonic quantum technologies.*, *Nat. Photonics* **14**, 273–284 (2020)

[3] JW. Pan, D. Bouwmeester, M. Daniell, et al. *Experimental test of quantum nonlocality in three-photon Greenberger–Horne–Zeilinger entanglement*. *Nature* **403**, 515–519, 070503 (2000).

[4] K. Makino, Y. Hashimoto, J.-I. Yoshikawa, H. Ohdan, T. Toyama, P. van Loock, and A. Furusawa, *Synchronization of optical photons for quantum information processing*. *Sci. Adv.* **2**, e1501772 (2016).

[5] Zeferino Ibarra-Borja, Carlos Sevilla-Gutiérrez, Roberto Ramírez-Alarcón, Qiwen Zhan, Hector Cruz-Ramírez, and Alfred B. U'Ren, *Direct observation of OAM correlations from spatially entangled bi-photon states*. Opt. Express **27** 25228-25240 (2019).

[6] Nicolas, A., Veissier, L., Giner, L. et al. *A quantum memory for orbital angular momentum photonic qubits*. Nature Photon **8**, 234–238, (2014).

[7] M. Parker Givens, *Photoelectric Detection of Interference between Two Light Beams Having a Large Path Difference*. J. Opt. Soc. Am. **51**, 1030-1032 (1961).

[8] X. Y. Zou, T. P. Grayson, and L. Mandel, *Observation of quantum interference effects in the frequency domain*. Phys. Rev. Lett. **69**, 3021 (1992).

[9] W. P. Alford and A. Gold, *Laboratory Measurement of the Velocity of Light*. Am. J. Phys. **26**, 481 (1958).

[10] L. J. Salazar-Serrano, A. Valencia, and J. P. Torres, *Observation of spectral interference for any path difference in an interferometer*. Opt. Lett. **39**, 4478-4481 (2014).

[11] Flórez J. et al. *Interference of two pulse-like spatial beams with arbitrary transverse separation*. J. Opt. **18**, 125201 (2016).

[12] Legero, T., Wilk, T., Kuhn, A. et al. *Time-resolved two-photon quantum interference*. Appl. Phys. B **77**, 797–802 (2003).

[13] T. Legero, W. Tadjana, M. Hennrich, G. Rempe, and AKuhn, *Quantum Beat of Two Single Photons*. Phys. Rev. Lett. **93**, 070503 (2004).

[14] T. Legero, T. Wilk, G. Rempe, *Characterization of Single Photons Using Two-Photon Interference*. Adv. At. Mol. Opt. Phys. **53**, 253-289 (2006).

[15] Vincenzo Tamma and Simon Laibacher *Multiboson Correlation Interferometry with Arbitrary Single-Photon Pure States*, Phys. Rev. Lett. **114**, 243601 (2015)

[16] Vincenzo Tamma and Simon Laibacher *Symmetries and entanglement features of inner-mode-resolved correlations of interfering nonidentical photons*, Phys. Rev. A **98**, 053829 (2018)

[17] Quintero A. C. *Interferencia Cuántica de Fotones Individuales Resuelta Espacialmente* } Monografía. Grupo de Óptica Cuántica Experimental. Universidad de los Andes. (2021).

[18] Alarcón J. A. *Multi-photon interference of distinguishable photons based on photonic inner mode structure.*, Universidad de los Andes, (2021).

Jeimmy Alejandra Alarcon Carvajal

Nombre y firma del estudiante

Alejandra Valencia

Vo.Bo. del profesor asesor