

Universidad de los Andes

FACULTAD DE CIENCIAS

CARACTERIZACIÓN DE FUENTE DE PARES DE FOTONES PRODUCIDA POR
CRISTAL BBO TIPO II COLINEAL

Proyecto experimental

Autor: Juan Sebastián Caicedo

Coautor: Jose Ricardo Mora

Directora de proyecto: Alejandra Catalina Valencia Ph.D.

Diciembre 2023

CONTENTS

I. Abstract	3
II. Introducción	3
III. Consideraciones éticas	4
IV. Marco Teórico	4
A. SPDC	4
B. Hamiltoniano de interacción en SPDC	5
C. Función de correlación temporal de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$	6
D. Correlación de fotones <i>signal</i> e <i>idler</i> según el tipo de cristal	6
V. Métodos experimentales	7
A. Mediciones preliminares: Formación de anillos colineales	7
B. Montaje final: Caracterización temporal de fuente de pares de fotones	8
VI. Resultados y análisis	9
A. Montaje preliminar: Observación de Anillos Colineales	9
B. Montaje final: Caracterización temporal de la fuente de pares de fotones	10
VII. Conclusiones	13
VIII. Agradecimientos	13
IX. Referencias	14
Referencias	14

I. ABSTRACT

La conversión paramétrica, descendente y espontánea (SPDC) es un proceso ampliamente usado para la generación de pares de fotones correlacionados en grados de libertad tales como la polarización, tiempo-energía y variables espaciales [8]. Este proceso se da a través de la interacción de un fotón *pump* con un cristal no lineal se producen dos fotones correlacionados: *signal* e *idler*, los cuales conservan, junto con el *pump*, momento y energía. En el presente proyecto se hizo una caracterización temporal de la luz emitida por un cristal BBO-II colineal. Esta caracterización se hizo mediante su función de correlación temporal de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$. El uso de esta fuente de pares de fotones servirá para futuros estudios relacionados a la generación de qubits fotónicos para aplicaciones en información y computación cuántica [12].

II. INTRODUCCIÓN

Los avances en sistemas fotónicos que integran protocolos cuánticos de luz han demostrado ser fundamentales tanto en el estudio de la mecánica cuántica como en una amplia gama de aplicaciones prácticas [2, 10]. Dichos sistemas han impulsado avances significativos en áreas como la criptografía cuántica, especialmente en la distribución de claves cuánticas [5], el procesamiento de información cuántica [3, 11], y la computación cuántica [13]. Estos desarrollos también se han extendido al campo de las telecomunicaciones, incluyendo las comunicaciones cuánticas basadas en fibras [6] y los sistemas de estado sólido para la computación y comunicación cuántica [9].

En estos sistemas fotónicos, los fotones funcionan como qubits para la transmisión de información. Los fotones individuales son preferidos en la implementación de qubits debido a su resistencia a la degradación y su habilidad para ser transmitidos a grandes distancias. Adicionalmente, las correlaciones entre pares de fotones proporcionan una fuente rica de información cuántica [10]. Estos fotones se generan por demanda a través de emisores cuánticos, como puntos cuánticos y átomos individuales en cavidades, esenciales para aplicaciones avanzadas como la computación cuántica [1, 7].

Un método efectivo para la generación de pares de fotones utiliza el proceso de Conversión Paramétrica Descendente Espontánea (SPDC). Este fenómeno ocurre cuando un láser (*pump*) con características específicas de polarización y longitud de onda atraviesa un cristal no lineal. Como resultado, se generan pares de fotones conocidos como *signal* e *idler*, conservando el momento y la energía en conjunto con el *pump* [10]. Estos pares de fotones son notables por su versatilidad en correlación en diversos grados de libertad, incluyendo la polarización, tiempo-energía y dimensiones espaciales [8]. Para un cristal BBO-II colineal, el fenómeno de SPDC produce dos anillos colineales, representando la llegada de fotones *signal* e *idler*, como se ilustra en la figura 1.

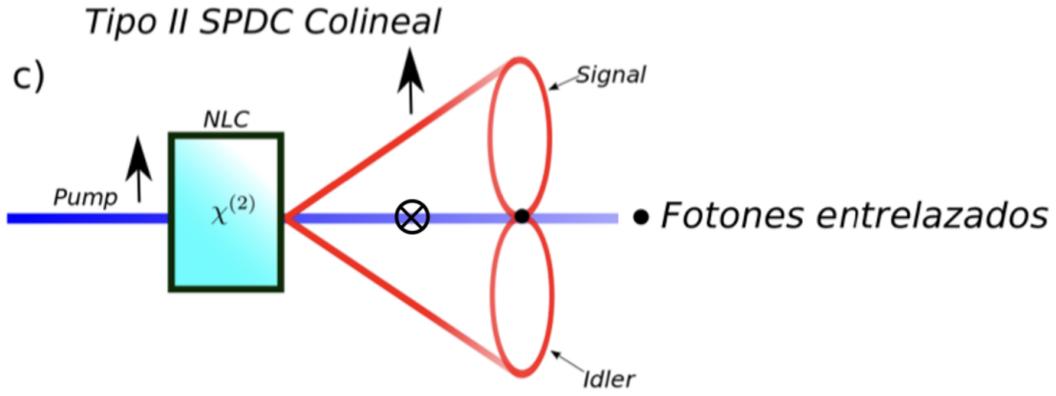


Figura 1: Producción de anillos entrelazados en un proceso SPDC con un cristal BBO-II colineal [2]

El objetivo de este proyecto es obtener una fuente de pares de fotones en estado entredado y realizar su caracterización temporal usando la función de correlación de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$. Iniciaremos con una revisión de consideraciones éticas y un marco teórico para definir conceptos clave. Seguidamente, describiremos los métodos experimentales empleados, incluyendo la configuración preliminar para obtener los anillos colineales (Figura 1) y la configuración final para la medición de $g^{(2)}(\tau)$ (Figura 13), culminando con las conclusiones del proyecto y perspectivas para futuros trabajos.

III. CONSIDERACIONES ÉTICAS

Para la elaboración de este proyecto, los datos obtenidos no se verán alterados bajo ninguna circunstancia. Asimismo, los resultados serán debidamente reportados y citados para su análisis respectivo en este documento. Dado que se utilizará software de código abierto, todo el código relacionado con procesado y filtrado de imágenes se almacenará en un repositorio público de GitHub ¹ para la comunidad de la Universidad de los Andes. Esto garantizará su reproducibilidad y permitirá que otros investigadores en el campo puedan acceder a él.

IV. MARCO TEÓRICO

A. SPDC

En SPDC un fotón de entrada con una frecuencia mayor, denominado fotón *pump*, interactúa con un cristal del tipo no lineal y se divide en dos fotones de frecuencia más baja: *sigal* y *idler*. El SPDC es un tipo de proceso de generación de frecuencia diferencial, como se presenta en la figura 2(a) [8]. En ese caso el campo de frecuencia ω_2 está en el campo de entrada, lo que estimula la generación de la frecuencia diferencial ω_3 . Sin embargo, también es posible la

¹ <https://github.com/CR0NX73/pares-de-fotones.git>

generación de las dos frecuencias ω_3 y ω_2 a partir de ω_1 , lo que se denomina como Conversión Paramétrica, Descendente y Espontánea. Se denomina espontánea ya que el proceso es estimulado por el modo de vacío a la frecuencia ω_2 en el campo de entrada, y el término 'paramétrico' indica que la energía total se conserva durante el proceso [8]. En la figura 2(c) se representa el diagrama de niveles de energía del proceso SPDC, donde el fotón a la frecuencia ω_1 es absorbido y el absorbedor pasa a un estado virtual. Desde allí, decae al estado fundamental emitiendo fotones a las frecuencias ω_2 y $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$. Las restricciones debidas a la conservación de la energía y el momento hacen que los dos fotones convertidos estén entrelazados en varios grados de libertad, incluyendo energía-tiempo, posición-momento, polarización y posición angular-momento angular orbital [8].

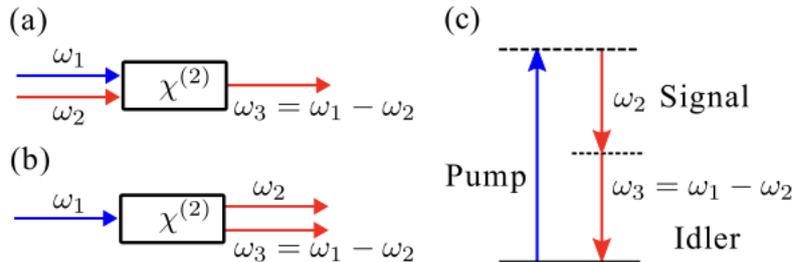


Figura 2: (a) Proceso de generación de frecuencia diferencial. (b) Proceso de SPDC. (c) Diagrama de niveles de energía de SPDC. [8]

B. Hamiltoniano de interacción en SPDC

En el contexto de un formalismo semiclásico, se aborda la interacción entre luz y materia a través de una descripción mixta que combina elementos clásicos y cuánticos. Dentro de este marco, la contribución del Hamiltoniano de interacción, denotado como $H_I(t)$, a la energía total del sistema se representa mediante un operador. Este operador de interacción toma la forma:

$$\hat{H}_I(t) = \epsilon_0 \int_{\nu} \chi^{(2)} \vec{E}_p(r, t) \hat{E}_s(r, t) \hat{E}_i(r, t) d^3r, \quad (1)$$

donde ϵ_0 es la permitividad del vacío, ν es el volumen de medio no lineal, y $\chi^{(2)}$ representa la linealidad de segundo orden [8]. El término $\vec{E}_p(r, t)$ se refiere al campo eléctrico del láser (pump), el cual se trata como un campo clásico debido a la alta intensidad y coherencia del láser, lo que apacigua los efectos cuánticos. En contraste, los términos $\hat{E}_s(r, t)$ y $\hat{E}_i(r, t)$ corresponden a los operadores de campo eléctrico cuántico para los fotones de salida denominados *signal* e *idler*, respectivamente. Estos últimos se consideran desde una perspectiva cuántica, reflejando la naturaleza cuantizada de estos fotones. Es a partir de estos operadores que se puede hacer una caracterización temporal de la fuente de pares de fotones mediante la función de correlación temporal $g^{(2)}(\tau)$

C. Función de correlación temporal de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$

La función de correlación temporal de segundo orden, denotada como $g^{(2)}(\tau)$, se define mediante la siguiente expresión [14]:

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle \hat{E}^-(t)\hat{E}^-(t+\tau) | \hat{E}^+(t)\hat{E}^+(t+\tau) \rangle}{\langle \hat{E}^-(t) | \hat{E}^+(t) \rangle \langle \hat{E}^-(t+\tau) | \hat{E}^+(t+\tau) \rangle} \quad (2)$$

Aquí, $\hat{E}^+(t)$ y $\hat{E}^-(t)$ son operadores de campo eléctrico que representan las componentes en frecuencia positiva y negativa de un fotón, respectivamente. Se define también la relación entre los operadores de campo eléctrico para los fotones *signal* e *idler* en los tiempos t y $t + \tau$ respectivamente:

$$\hat{E}_s(r, t) = \hat{E}(t) = \hat{E}^+(t) + \hat{E}^-(t), \quad y \quad \hat{E}_i(r, t) = \hat{E}(t + \tau) = \hat{E}^+(t + \tau) + \hat{E}^-(t + \tau) \quad (3)$$

La diferencia temporal τ entre la detección de los fotones *signal* e *idler* es causada por desviaciones en sus trayectorias, lo que resulta en una diferencia en los tiempos de llegada.

D. Correlación de fotones *signal* e *idler* según el tipo de cristal

Las correlaciones en polarización, tiempo y espacio entre los fotones *signal* e *idler* dependen del cristal usado, para la realización de este proyecto se utilizó un cristal Beta Barium Borato [2]. En el caso de un cristal Tipo I, los fotones de salida tienen polarizaciones paralelas entre sí y ortogonales al *pump*. Para el caso del cristal tipo II, el fotón *signal* tiene la misma polarización que el *pump* pero ortogonal a la del fotón *idler*. En cuanto a su dirección, los anillos formados por los fotones son colineales cuando las direcciones de ambos son paralelas y es no colineal cuando sus direcciones son diferentes [4]. Los casos de producción en los dos tipos de cristales en un proceso SPDC se presentan en la figura 3:

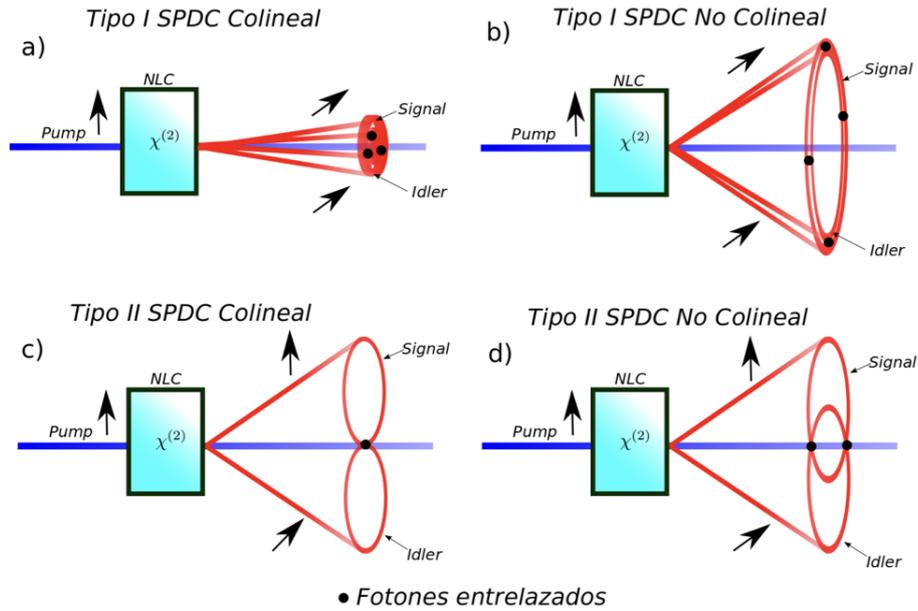


Figura 3: Ilustración para los diferentes tipos del proceso de SPDC. a) Tipo I colineal. b) Tipo I no colineal. c) Tipo II colineal. d) Tipo II no colineal. Imágen obtenida de [2].

V. MÉTODOS EXPERIMENTALES

A. Mediciones preliminares: Formación de anillos colineales

El montaje experimental diseñado para la formación de anillos colineales se ilustra en la Figura 5. Este montaje se concibió específicamente para la generación de fotones entrelazados, que son el enfoque principal de este proyecto. En la configuración del montaje preliminar, se empleó una fuente láser de 12 mW con una longitud de onda de 405 nm. El haz láser, reflejado inicialmente por dos espejos, atraviesa luego un lente polarizador. Posteriormente, el haz polarizado incide en un cristal BBO-II colineal. Utilizando un lente con una distancia focal de $f = 125$ mm, se colima la salida del cristal y se filtra mediante tres filtros espectrales consecutivos: un filtro pasas altas de 450 nm, otro pasa altas de 750 nm y un filtro pasa bandas de 810 nm. Dado que el láser de 405 nm produce dos fotones de alrededor de 810 nm, estos filtros son cruciales para eliminar el ruido y resaltar los anillos generados por los fotones, detectados mediante una cámara CCD Santa Bárbara conectada a un PC y procesados mediante el software para análisis astronómico *Iris*.

Para lograr una producción colineal eficiente de los fotones entrelazados, fue necesario ajustar la inclinación del cristal BBO-II a 16° con respecto al eje vertical, asegurando así que las direcciones de los fotones *signal* e *idler* fueran paralelas. Además, se buscó una coincidencia de fase donde:

$$\Delta k_z = k_{pz} - k_{sz} - k_{iz}, \quad (4)$$

representa la diferencia entre los vectores de onda del láser *pump* y los fotones emitidos [8]. Una menor diferencia en esta ecuación se traduce en una mayor correlación entre los fotones producidos, como se presenta en la figura 4.

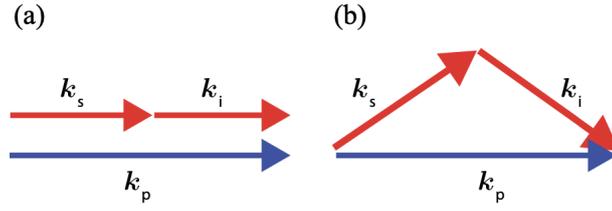


Figura 4: Diagramas de coincidencia de fase para producción de fotones (a) colineal y (b) no colineal. La condición para una coincidencia de fase perfecta es $k_{pz} = k_{sz} + k_{iz}$ [8]. Imagen obtenida de [8]

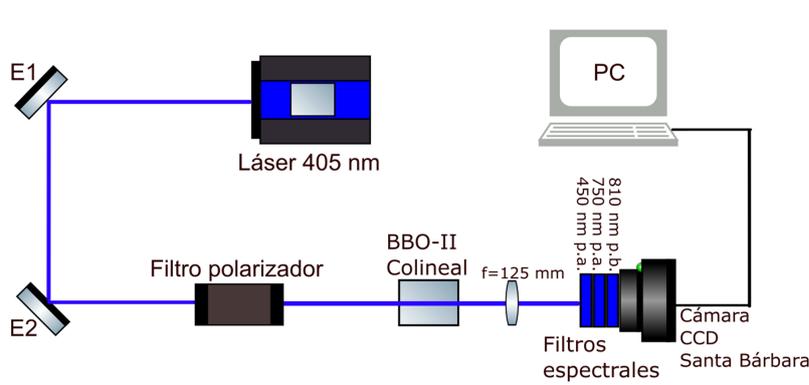


Figura 5: Montaje preliminar para la observación de anillos colineales mediante una cámara CCD con filtros espectrales de 450 nm p. a., 750 nm p. a. y 810 nm p. b..

B. Montaje final: Caracterización temporal de fuente de pares de fotones

El montaje final, diseñado para calcular la función de correlación de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$, se muestra en la Figura 6. En esta configuración, se continuó utilizando la fuente láser de 12 mW, junto con los dos espejos E1 y E2 y el filtro polarizador. Para la colimación del haz, se empleó un lente lb1183b. Después, el haz fue redirigido por un tercer espejo E3 y atravesó una serie de filtros espectrales antes de llegar a un acoplador de fibra. Los filtros aplicados incluyeron tres FELH750, uno FELH450 y uno FELH700.

Una vez que los pares de fotones incidieron en el acoplador de fibra, fueron transmitidos a través de una fibra óptica hacia un divisor de haz polarizador (PBS), que se encargó de separar los fotones según su polarización. Posteriormente, los fotones llegaron a dos módulos contadores de fotones individuales (SPCM), cada uno de ellos responsable de detectar los fotones *signal* e *idler*. Estos módulos enviaron señales de detección a un dispositivo *qu tau* de la empresa qu tools, para su visualización y análisis en un PC.

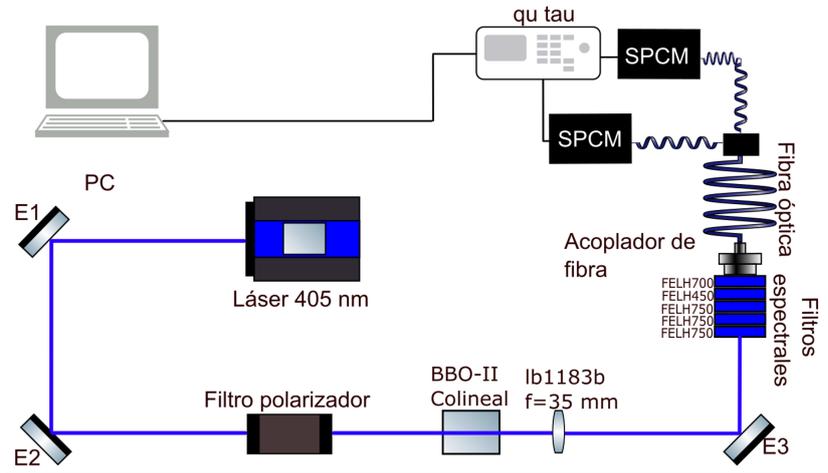


Figura 6: Montaje final para el cálculo de la función de correlación de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$.

VI. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Montaje preliminar: Observación de Anillos Colineales

Utilizando el montaje ilustrado en la Figura 5, se capturaron imágenes de los anillos colineales a través del software *Iris*. Para facilitar el análisis futuro, se desarrolló un código en Python dedicado a la visualización y filtrado de las imágenes, que estará disponible en un repositorio en línea para su uso en investigaciones posteriores. En un principio, el montaje se realizó sin el lente lb1183b para la colimación del haz, permitiendo observar principalmente la parte central de los anillos, como se muestra en la Figura 7.

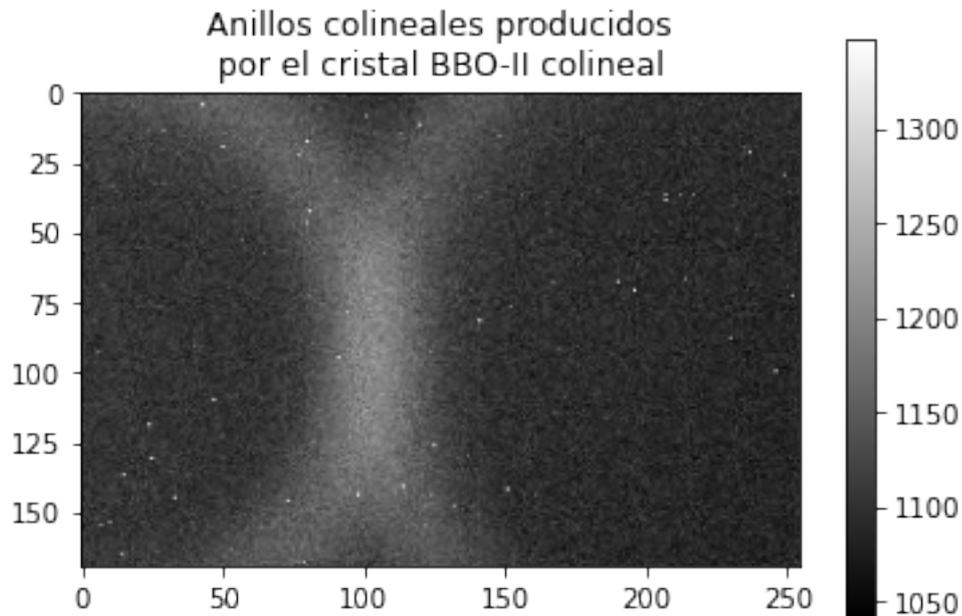


Figura 7: Vista detallada de la parte central de los anillos colineales.

Tras varios ajustes de la posición de la cámara, se incorporó el lente lb1183b para colimar el haz y mejorar la visualización de los pares de fotones. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8. Como se aprecia en la imagen, uno de los anillos presenta un diámetro mayor que el otro, lo que se atribuye a una menor incidencia de fotones con una de las polarizaciones. Además, se detectó un punto de alta intensidad cerca del diámetro de los anillos colineales, probablemente causado por reflexiones internas en la cámara CCD. No obstante, el centro de los anillos, donde se localizan los pares de fotones entrelazados, quedó claramente definido, facilitando así la posterior caracterización temporal.

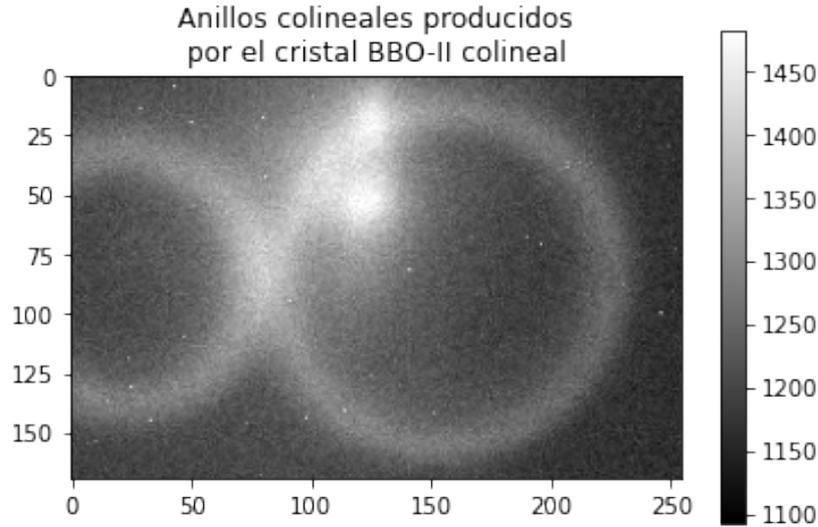


Figura 8: Imagen completa de los anillos colineales obtenida con el montaje preliminar.

B. Montaje final: Caracterización temporal de la fuente de pares de fotones

Tras establecer el montaje final como se ilustra en la Figura 6, procedimos a configurar el software del dispositivo *qu tau* para medir la función de correlación temporal de segundo orden. Inicialmente, se ajustaron varios parámetros para optimizar el número de coincidencias detectadas por segundo. Se realizaron ensayos para comparar el número de eventos detectados tanto con la presencia como con la ausencia del láser *pump*, resultados que se visualizan en la Figura 9. Estos mostraron los conteos de dos canales correspondientes a las detecciones de los fotones *signal* e *idler*. Sin el láser *pump*, los conteos preliminares eran aproximadamente de 200 por segundo, atribuibles al ruido de fondo del laboratorio. En presencia del láser *pump*, el canal 1 registró 790 conteos por segundo y el canal 2, 1050 conteos por segundo, reflejando la discrepancia en los diámetros de los anillos colineales observados en 8. Durante esta fase inicial, se obtuvo un promedio de 2 coincidencias por segundo.

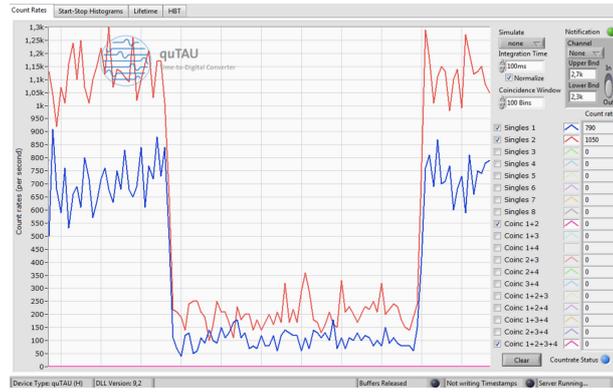


Figura 9: Conteos por segundo iniciales con y sin el láser *pump* utilizando el software *quTAU Time-to-Digital converter*.

Además, se logró una primera aproximación de la función de correlación de segundo orden con un tiempo de integración de 150.9 segundos, como se muestra en la Figura 10.

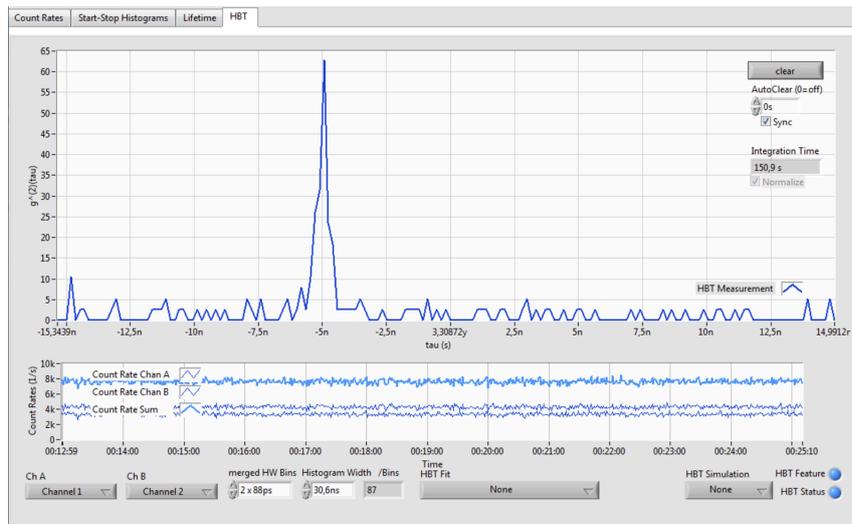


Figura 10: Función $g^{(2)}(\tau)$ preliminar obtenida con el software *quTAU Time-to-Digital converter*.

Para aumentar el número de coincidencias, se maximizó la cantidad de eventos individuales por canal dentro de una ventana de 100 Bins, como se detalla en la Figura 11. Ajustando la posición del espejo E3 y el acoplador de fibra, se incrementaron los conteos por segundo del canal 1 a aproximadamente 2940 y del canal 2 a 4400.

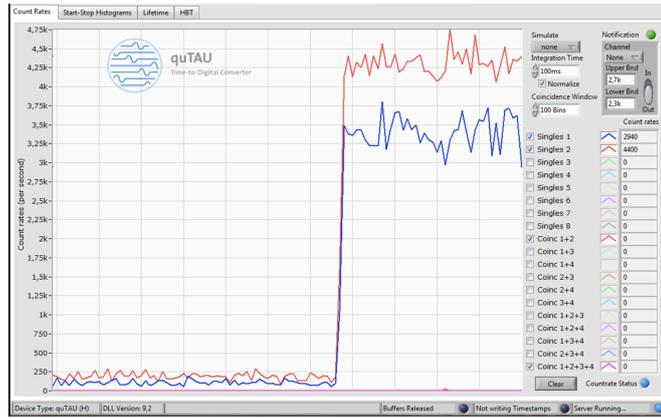


Figura 11: Ajuste de los conteos por segundo para los canales de detección de los fotones *signal* e *idler*.

Finalmente, se optimizó el número de coincidencias mediante el ajuste fino de la inclinación del cristal BBO-II. Con un tiempo de integración de un segundo y una ventana temporal de 1000 Bins, se alcanzaron aproximadamente 6200 conteos para el canal 2 y 5200 para el canal 1, con un promedio de 35 coincidencias por segundo, como se muestra en la Figura 12.



Figura 12: Número optimizado de coincidencias por segundo capturado por el software *quTAU Time-to-Digital converter*.

La función de correlación de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$ final, obtenida de la fuente de pares de fotones, se presenta en la siguiente figura:

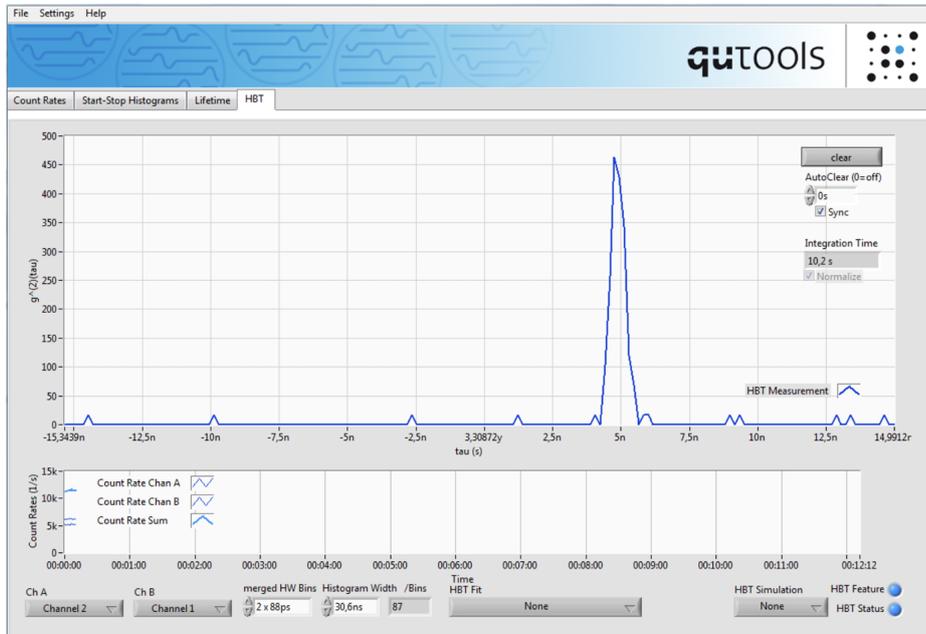


Figura 13: La función de correlación de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$ final de la fuente de pares de fotones producida por el cristal BBO-II colineal.

VII. CONCLUSIONES

En este proyecto, hemos logrado una caracterización temporal precisa de una fuente de luz basada en un cristal BBO-II colineal, utilizando la función de correlación de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$ [8]. Este logro es un paso significativo hacia el uso de fotones entrelazados en la codificación de qubits y su aplicación en información y computación cuántica, como se ha demostrado en áreas tales como la criptografía cuántica y las comunicaciones cuánticas [1, 7, 9, 10, 13]. El éxito en la generación y detección de pares de fotones abre la puerta a futuras investigaciones, donde la fuente desarrollada puede ser aplicada en sistemas de computación cuántica, potencialmente mejorando las capacidades de procesamiento y seguridad de la información. Este estudio proporciona una base sólida para la exploración futura de las propiedades cuánticas de los fotones y destaca el potencial de los sistemas fotónicos entrelazados en el avance de las tecnologías cuánticas.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi sincera gratitud a la profesora Alejandra Valencia por brindarme la oportunidad de formar parte del grupo de óptica cuántica y por su invaluable apoyo en el desarrollo de este proyecto. Un agradecimiento especial también al equipo de óptica cuántica, cuyas sugerencias y orientación han sido fundamentales en mi trabajo. Esto incluye a la profesora Alejandra, Mayerlin Nuñez, el analista de laboratorio Jose Mejía, y mis compañeros de grupo Gabriel, Michael, Miguel Angel, Sebastián Mejura y Miguel, cuya colaboración enriqueció significativamente mi experiencia de investigación.

Mi reconocimiento particular a Jose por su paciencia y dedicación inquebrantables en cada sesión experimental; su mentoría ha sido esencial no solo para el éxito de este proyecto sino también para mi aprendizaje y comprensión profunda del campo de la óptica cuántica.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia y amigos cercanos, cuyo apoyo constante ha sido el pilar de mi perseverancia y éxito a lo largo de este desafiante pero gratificante proceso.

IX. REFERENCIAS

- [1] M. Eisaman, J. Fan, A. Migdall, and S. Polyakov. Invited review article: Single-photon sources and detectors. *The Review of scientific instruments*, 82:071101, 07 2011.
- [2] S. P. J. Fredy, N. M. Portela, O. T. C. Inés, and Q. L. Puello. *Control Experimental de las correlaciones en Frecuencia de pares de fotones para una fuente de fotones Individuales Anunciados*. PhD thesis, Universidad de los Andes, 2018.
- [3] M. Förtsch, J. U. Fürst, C. Wittmann, D. Strekalov, A. Aiello, M. V. Chekhova, C. Silberhorn, G. Leuchs, and C. Marquardt. A versatile source of single photons for quantum information processing. *Nature Communications*, 4(1), May 2013.
- [4] C. Gerry and P. Knight. *Introductory Quantum Optics*. Cambridge University Press, 2004.
- [5] N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, and H. Zbinden. Quantum cryptography. *Rev. Mod. Phys.*, 74:145–195, Mar 2002.
- [6] Y.-P. Huang, J. B. Altepeter, and P. Kumar. Optimized heralding schemes for single photons. *Phys. Rev. A*, 84:033844, Sep 2011.
- [7] S. Kako, C. M. Santori, K. Hoshino, S. Götzinger, Y. Yamamoto, and Y. Arakawa. A gallium nitride single-photon source operating at 200k. *Nature Materials*, 5:887–892, 2006.
- [8] S. Karan, S. Aarav, H. Bharadhwaj, L. Taneja, A. De, G. Kulkarni, N. Meher, and A. K. Jha. Phase matching in -barium borate crystals for spontaneous parametric down-conversion. *Journal of Optics*, 22(8):083501, jun 2020.
- [9] A. Lohrmann, B. C. Johnson, J. C. McCallum, and S. Castelletto. A review on single photon sources in silicon carbide. *Reports on Progress in Physics*, 80(3):034502, jan 2017.
- [10] C. O. Losada, V. G. A. Catalina, Q. L. Puello, and S. Walborn. *Controlling correlations of paired photons for fundamental physics and applications in quantum imaging and generation of heralded single photons*. PhD thesis, Universidad de los Andes, 2019.
- [11] P. J. Mosley, J. S. Lundeen, B. J. Smith, P. Wasylczyk, A. B. U'Ren, C. Silberhorn, and I. A. Walmsley. Heralded generation of ultrafast single photons in pure quantum states. *Phys. Rev. Lett.*, 100:133601, Apr 2008.
- [12] T. Pittman, M. Donegan, M. Fitch, B. Jacobs, J. Franson, P. Kok, H. Lee, and J. Dowling. Heralded two-photon entanglement from probabilistic quantum logic operations on multiple parametric down-conversion sources. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 9(6):1478–1482, 2003.
- [13] T. B. Pittman, M. J. Fitch, B. C. Jacobs, and J. D. Franson. Experimental controlled-not logic gate for single photons in the coincidence basis. *Phys. Rev. A*, 68:032316, Sep 2003.

[14] J. D. Salamanca and A. Herrera. 2021.