

Caracterización de retrasos temporales de luz en pares de fotones correlacionados

Laboratorio Intermedio-Universidad de los Andes

J.P. González-Aguilera, J.F. Cabrera-García, M. Nuñez-Portela*, M.L. Pellaton**

*Profesora Asistente-Universidad de los Andes **Investigador Postdoctoral-Universidad de los Andes

Resumen

Se ha realizado un estudio para medir, analizar y caracterizar la función de correlación temporal de fotones para distintos retrasos temporales generados por diferencias de caminos ópticos. Se montó una fuente de pares de fotones correlacionados temporalmente con un láser de diodo de 405 nm y un cristal no lineal beta-barium borate (BBO) generando Spontaneous Parametric Down Conversion (SPDC) de tipo II colineal y se midió el grado de coherencia temporal de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$ entre los pares. Se realizaron diferencias de caminos ópticos entre los dos fotones usando fibra óptica. La medición de la función $g^{(2)}(\tau)$ se realizó conectando single photon counters a dos instrumentos para detectar coincidencias: una FPGA y un time tagger de Qtools. Para los dos casos, se observa que el desplazamiento de los picos de la función $g^{(2)}(\tau)$ se relaciona linealmente a las diferencias de camino implementadas. Los factores dominantes en el ancho del grado de coherencia temporal fueron la ventana temporal de 9 ns de la FPGA y el tiempo de respuesta de 0.35 ns de los fotodetectores en el caso del Qtools; pero la cantidad de acoples y de fibras también es significativa. Como resultado adicional se presenta un descubrimiento importante para el laboratorio relacionado al láser de 405 nm usado: no sólo emite en 405 nm sino que también tiene emisión cercana a los 810 nm.

1. Introducción

Los pares de fotones correlacionados han sido una herramienta de estudio importante en la mecánica cuántica [1]. Una aproximación usada para la generación de pares de fotones es bombardear con un láser un cristal no lineal BBO (ingl. beta-barium borate). La mayoría de fotones siguen su camino, pero en algunas ocasiones ocurre un proceso llamado SPDC (ingl. Spontaneous Parametric Down Conversion) en el cual un fotón incidente se convierte en dos fotones de menor energía. El fotón incidente es denotado *pump* (p) mientras que los fotones apareados que se generan se denotan *signal* (s) e *idler* (i). En este proceso se debe conservar la energía y el momento. Por lo tanto, $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ y $k_p = k_s + k_i$, donde ω y k son la frecuencia y el vector de onda respectivamente. En el caso del cristal BBO, se da SPDC de tipo II. En este proceso, las polarizaciones del *signal* y del *idler* son ortogonales [2]. Esto permite separar los caminos ópticos en configuraciones colineales usando un PBS (ingl. Polarization Beam Splitter) el cual deja pasar el fotón con una polarización paralela a su eje mientras refleja el fotón con polarización ortogonal [3]. Es de interés saber cómo se comporta la función de correlación temporal haciendo diferencias de caminos ópticos. Como indicador de correlación temporal, se define el grado de coherencia de segundo orden como:

$$g^{(2)}(\vec{r}_1, t_1, \vec{r}_2, t_2) \equiv \frac{\langle E^{(-)}(\vec{r}_1, t_1) E^{(-)}(\vec{r}_2, t_2) E^{(+)}(\vec{r}_1, t_1) E^{(+)}(\vec{r}_2, t_2) \rangle}{\langle E^{(-)}(\vec{r}_1, t_1) E^{(+)}(\vec{r}_1, t_1) \rangle \langle E^{(-)}(\vec{r}_2, t_2) E^{(+)}(\vec{r}_2, t_2) \rangle} \quad (1)$$

donde $E^{(-)} = (E^{(+)})^*$ y $E^{(+)}$ son los operadores de campo de frecuencia negativa y positiva respectivamente y los corchetes indican el promedio cuántico de los operadores y adicionalmente el promedio estadístico cuando se tiene en cuenta una distribución sobre estos. Esto es el valor esperado de los operadores de campo ordenados normalmente en las coordenadas espaciales y temporales dadas. Por lo tanto, se puede interpretar como un valor proporcional a la probabilidad de observar un par de fotones en (\vec{r}_1, t_1) y (\vec{r}_2, t_2) , donde t_1 y t_2 son los tiempos del evento de detección y \vec{r}_1 y \vec{r}_2 corresponderán a las posiciones de los fotodetectores [2].

2. Materiales y Métodos

Todo el proceso de generación de los pares de fotones, causar el retraso temporal y medir la función de correlación se realiza en el montaje experimental de las figuras 1 y 2.

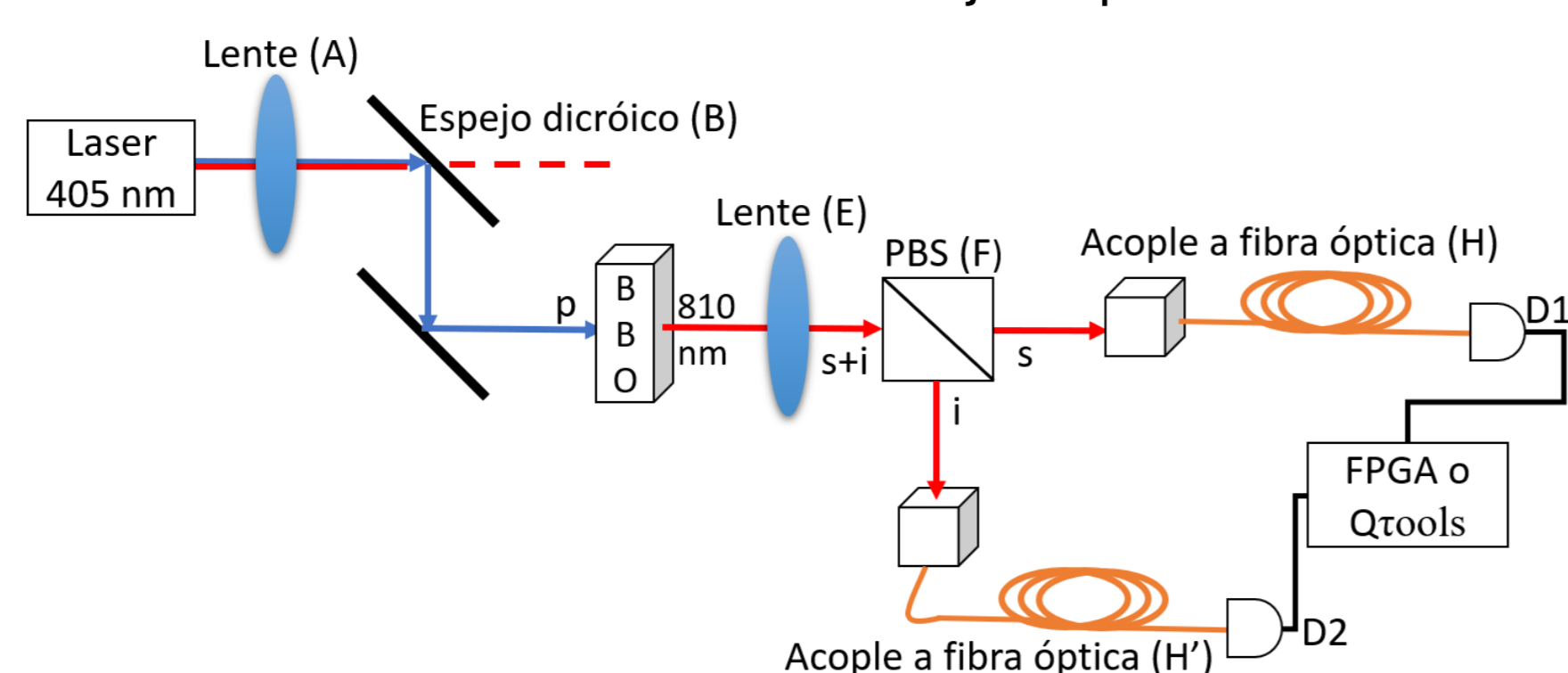


Figura 1: Esquema. Se utiliza una fuente láser de 405 nm enfocada por una lente (A) al cristal BBO. El lente (E) colima los haces que salen del BBO y los dirige al PBS (F) donde se separa *signal* de *idler*. Los haces se acoplan a las fibras ópticas (H y H') usando filtros pasa bajas. Se implementa la diferencia de camino óptico cambiando la longitud de las fibras. Finalmente se usan los detectores D1 y D2 para el conteo de fotones y la detección de coincidencias con los instrumentos FPGA y Qtools.

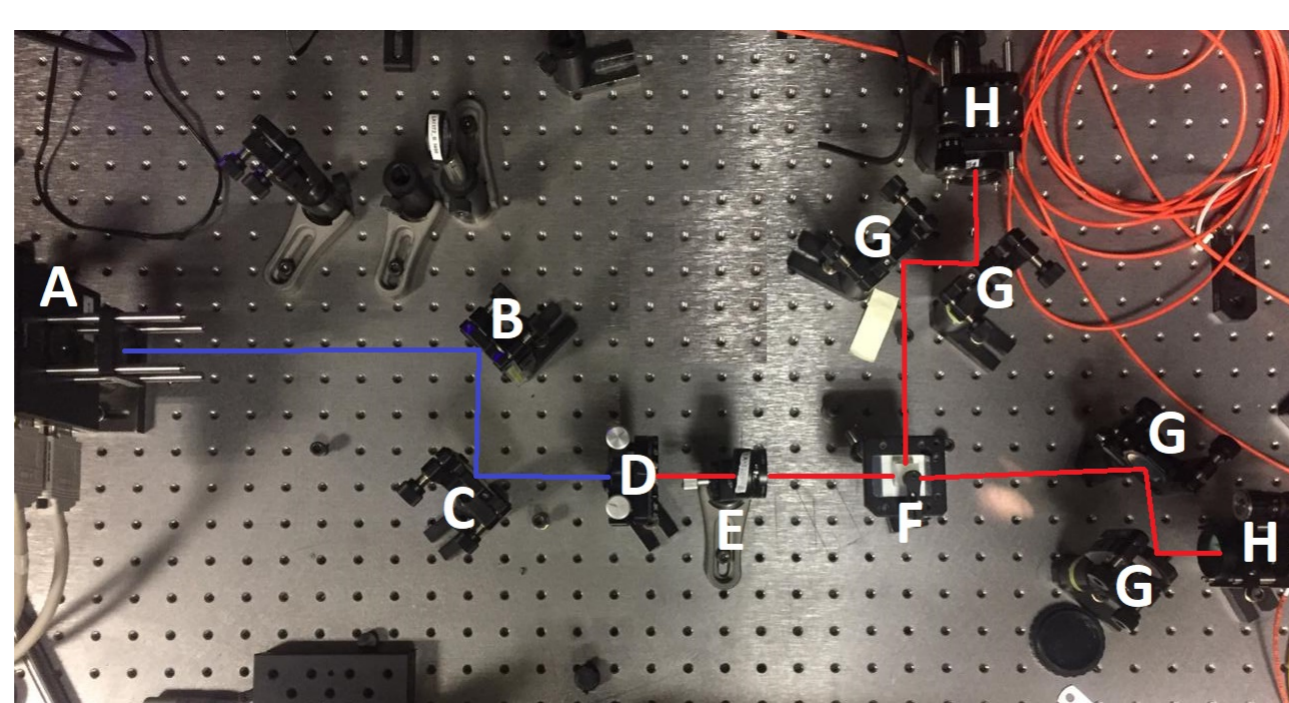


Figura 2: Montaje final. A. Láser de diodo (DL5146-101S) 405 nm y lente de enfoque (40 cm) B. Espejo dicróico (380-420 nm) C. Espejo E02 (azul) D. BBO E. Lente de colimación (6 cm) F. PBS G. Espejos E03 (rojo) H. Acople a fibra multimodo con filtro pasabajos de 750 nm.

El par de fotones generados en el BBO (D) se separan con un PBS (F) y se acoplan a dos fibras. En este montaje están fijos los detectores y por lo tanto $g^{(2)}$ será función de la diferencia entre los tiempos de detección de los fotones $\tau = t_1 - t_2$. La diferencia de caminos se realizó con distintas fibras ópticas.

3. Resultados

5. Agradecimientos

Agradecemos a Johnny Tenorio por la gran ayuda brindada en el laboratorio.

Como se muestra en (a), se logró realizar la configuración colineal de SPDC tipo II. La medición de $g^{(2)}(\tau)$ se realizó con FPGA y Qtools. La FPGA cuenta coincidencias en una ventana de 9 ns y Qtools calcula $g^{(2)}(\tau)$ directamente con una resolución temporal de 81 ps. En las figuras 3.b y 3.c se muestra $g^{(2)}(\tau)$ con FPGA y Qtools respectivamente.

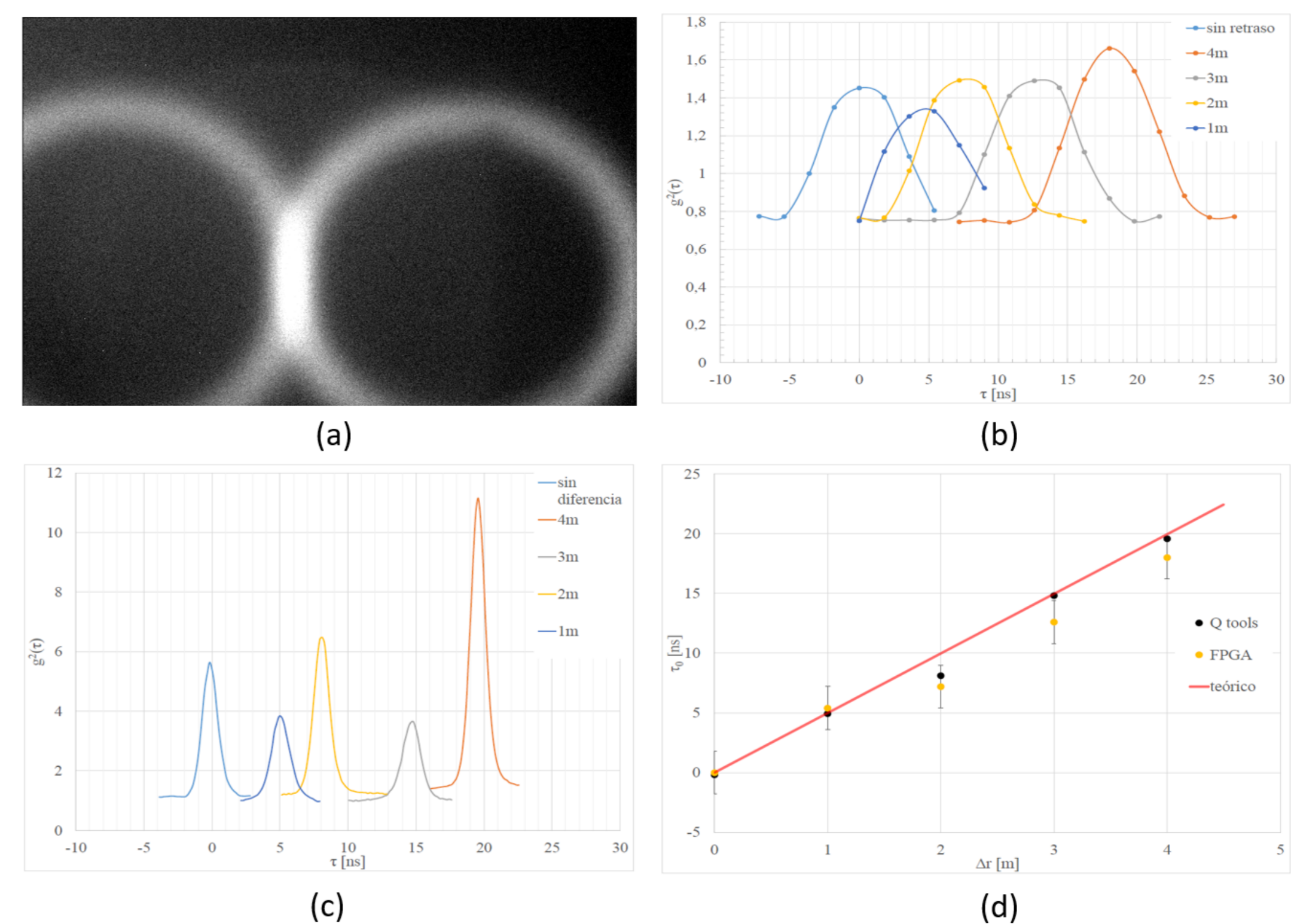


Figura 3: (a) Alineación colineal tomada con cámara CCD. (b) Grado de coherencia temporal de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$ medida con FPGA. Se ve desplazada abajo del 1 debido a que existían coincidencias de luz que no provenía del SPDC. (c) Grado de coherencia temporal de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$ medida con Qtools. (d) Tiempo τ_0 (centro del grado de coherencia temporal de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$, el cual correspondiente a la diferencia temporal para obtener un máximo de coincidencias) para distintas diferencias de caminos ópticos $\Delta\tau$ con los dos métodos distintos. La curva teórica se muestra en rojo. Las barras de error de los datos de Qtools son del tamaño de los puntos.

En la figura 3.d se muestra el desplazamiento horizontal de $g^{(2)}(\tau)$ para distintas diferencias de camino. Los datos concuerdan con la predicción teórica calculada a partir de la diferencia temporal de la luz dentro de la fibra a excepción del dato de 2m donde se usaron dos acoples.

4. Conclusiones

En este trabajo se montó y alineó una fuente de fotones correlacionados temporalmente por SPDC tipo II usando un BBO y un láser de diodo de 405 nm. Se realizó una configuración colineal y se separaron los pares de fotones con un PBS, acoplándolos a fotodetectores para obtener el grado de coherencia de segundo orden en la variable temporal.

En la fase del montaje, se descubrió que el láser de diodo de 405 nm con referencia DL5146-101S tiene una emisión en otro modo cercana a 810 nm la cual se debe filtrar antes de impactar el BBO. Este descubrimiento puede ahorrar bastante tiempo en futuros montajes evitando los inconvenientes que se presentaron.

Se implementaron diferencias de caminos ópticos de 1m, 2m, 3m y 4m con las fibras ópticas disponibles y la función de correlación temporal de segundo orden se trasladó como se esperaba midiéndola con dos elementos distintos: FPGA y Qtools. En ambos casos, el dato de 2m fue el único que no se acomodó a la predicción teórica. Esto se debe a que en esta diferencia se usaron dos acoples en las fibras. La ventana temporal del FPGA fue el factor dominante en el ancho de la curva mientras que el tiempo de respuesta de los detectores fue el factor dominante al medir con Qtools. La forma de la curva puede ser alterada debido a la dispersión de la luz en las fibras y en los acoples. Para obtener mejores resultados, se deben usar fibras cortas y sin acoples. También se pueden hacer diferencias de caminos ópticos con espejos para no tener variables adicionales que cambien entre mediciones.

Referencias

- [1] R. J. Glauber. (2006) Nobel lecture: One hundred years of lightquanta, Reviews of modern physics 78, 1267
- [2] Y. Shih. (2016) An introduction to quantum optics: photon and biphoton physics CRC press
- [3] Beam splitters https://www.rp-photonics.com/beam_splitters.html
- [4] B. Dayan, A. Pe'er, A. A. Friesem, and Y. Silberberg. (2004) wophoton absorption and coherent control with broadband-down-converted light Phys. Rev. Lett.93, 023005
- [5] P. G. Kwiat, P. H. Eberhard, A. M. Steinberg, and R. Y. Chiao (1994) Proposal for a loophole-free bell inequality experiment Physical Review A49, 3209 (1994)