Laboratorio 4: Correlación de 2 Orden*

Sergio Gutiérrez** and Camilo Rivera***
Universidad de los Andes
(Dated: abril de 2017)

El siguiente informe resume la elaboración y resultados de una práctica de laboratorio en la cual se pretendía medir experimentalmente el grado de coherencia de 2^o orden de dos diferentes tipos de luz: láser y SPDC. Mientras que el primer tipo se midió directamente usando *Single Photon Counters* (SPC) y una FPGA, para el segundo tipo se emplearon dos metodologías; a través del SPC y la FPGA, y a través de un *Time-to-Digital Converter* (TDC).

Para el caso de la luz coherente se observó que si bien el grado de coherencia no se mantenía en 1, no mostraba una dependencia clara en función del retraso. Para el caso de los fotones SPDC producidos por el BBO, se observaron comportamientos similares para las etapas 2 y 3, con formas gaussianas centradas en el retraso generado por la birrefringencia del cristal, pero se evidenció una mayor resolución temporal por parte de la TDC respecto a la observada en la FPGA.

I. INTRODUCCIÓN

El grado de coherencia de segundo orden $g^{(2)}(\tau)$, en su forma más general, surge al analizar las probabilidades de que dos detectores detecten un fotón cada uno en determinados tiempos; esto es, la detección de dos fotones en dos lugares y momentos diferentes. Sin embargo, la definición enunciada en la Ecuación (1) muestra que se está interesado en la detección de dos fotones, en principio, en el mismo punto espacial pero separados por un tiempo τ. Este grado de coherencia resalta inteferencias (a dos fotones) de intensidad de la radiación, a diferencia del grado de coherencia de orden uno que muestra interferencias en amplitud.

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{G^{(2)}(\vec{r},t;\vec{r},t+\tau;\vec{r},t+\tau;\vec{r},t)}{G^{(1)}(\vec{r},t;\vec{r},t)G^{(1)}(\vec{r},t+\tau;;\vec{r},t+\tau)} \qquad (1)$$

Es por esto que las tres etapas desarrolladas durante el experimento se basan en detección de dos fotones con cierto tiempo de detección entre ellos.

Si $g^{(2)}(\tau) > 1$, la detección de los dos fotones estará correlacionada. Si $g^{(2)}(\tau) = 1$, la detección de ambos fotones será inpendiente. Mientras que si $g^{(2)}(\tau) < 1$ la detección de ambos fotones estará anti-correlacionada [1]. Es por esto que en los análisis experimentales de $g^{(2)}(\tau)$ se suele utilizar el parámetro de anti-correlación, mostrado en la Ecuación (2), que es el parámetro por el cual se estimará la $g^{(2)}(\tau)$ a través de los experimentos[2].

$$\alpha_2 = \frac{R_{AB}(\tau)}{\tau_{coin} R_A R_B} \qquad (2)$$

Como se nombraba anteriormente, cuando $g^{(2)}(\tau) > 1$ es porque los dos fotones emitidos están correlacionados, lo cual puede explicarse con el término de *bunching*. Esto es, que para fuentes de luz con estas características, al encontrar un fotón en el detector, es altamente probable encontrar un segundo fotón "inmediatamente después". Esta es una característica que se ve principalmente en las fuentes de luz térmicas.

Por otro lado, cuando $g^{(2)}(\tau) < 1$ se da el efecto de *anti-bunching*, el cual es un efecto completamente cuántico y evidencia la naturaleza corpuscular de la luz, como se mostró con el experimento de Hanbury Brown and Twiss. Por ejemplo, un sistema de dos niveles no puede emitir dos fotones inmediatamente, de manera que es menos probable encontrar un segundo fotón para τ pequeños.

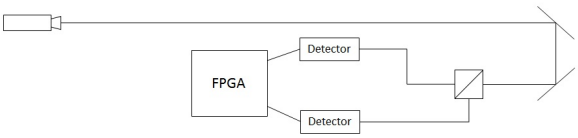


Figura 1. Montaje experimental de la primera etapa

Para el caso de $g^{(2)}(\tau) = 1$, es lo que se puede observar para un láser (que de hecho se cumple para cualquier $g^{(n)}(\tau)$), puesto que la probabilidad de encontrar un segundo fotón es independiente de τ.

II. MONTAJE EXPERIMENTAL

La práctica de laboratorio estuvo dividida en 3 segmentos. En el primero, mostrado en la Figura 1, se realizó el análisis de coherencia para una fuente de luz láser. El haz de luz se enfoca en un divisor de haz en fibra, cuyos dos extremos opuestos se acoplan a los SPC (Single Photon Counter) y éstos a su vez a una FPGA.

Mediante un software en el computador de adquisición, se pueden inducir retrasos electrónicos en la adquisición de la FPGA. Así se deja uno de los canales con un

* Curso de Óptica Cuántica
**
***

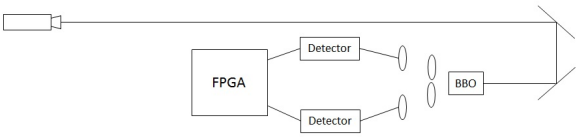


Figura 2. Montaje experimental de la segunda etapa

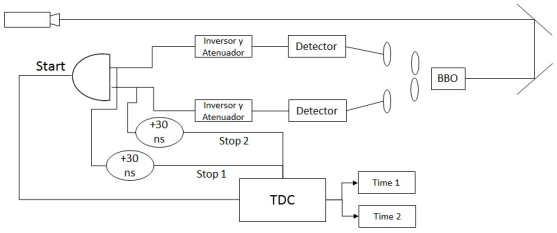


Figura 3. Montaje experimental de la tercera etapa

retraso fijo de 3 unidades (cada unidad equivale a 1.8 ns) mientras que el otro canal se varía de 1 a 10 unidades. Para cada caso se obtiene el número de coincidencias, así como el número de conteos por detector.

Para el segundo segmento, mostrado en la Figura 2, se utiliza un cristal BBO para generar pares de fotones enredados. El camino seguido por cada haz de fotones se enfoca en una fibra óptica, que lleva al mismo montaje de detectores-FPGA que se tenía para la primera etapa. Para la segunda etapa la toma de datos es idéntica a la de la primera etapa.

Finalmente, el tercer montaje, mostrado en la Figura 3 consta también de un BBO para la generación de fotones enredados, pero con la diferencia de que la señal de los detectores es primero invertida y atenuada, por los requerimientos electrónicos de las etapas subsiguientes. Después de esto, la señal resultante tiene forma de pulso y cada una de estas señales se divide en dos (idénticas por pares). El primer par (no idéntico) se pasa por una compuerta AND y esta señal se usa como trigger para inicial dos contadores en el TDC (Time-to-Digital Converter). El segundo par es desviado por un camino óptico que agrega 30ns de retraso a cada uno y finalmente son usados como señal de stop para cada uno de los contadores. En el computador se adquieren los dos tiempos, codificados en bins de 25ps.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. FPGA

Al obtener los datos de la cantidad de coincidencias par luz coherente esperamos tener valores constantes de 1 pero al tomar los datos vemos que no obteneos un valor el cual no es constante y tampoco tenemos ninguno de los puntos cerca al valor esperado. Esta desviación de los datos obtenidos con la teoría puede estar dada por varios parámetros de error, como es esperado los foto detectores están expuestos mediadas equivocas por error electrónico o también porque se detecta luz del ambiente que no era parte del experimento, además el láser no es perfecto como se estudia así que con estos parámetros de error es suficiente como para generar una desviación de los datos respecto a la teoría

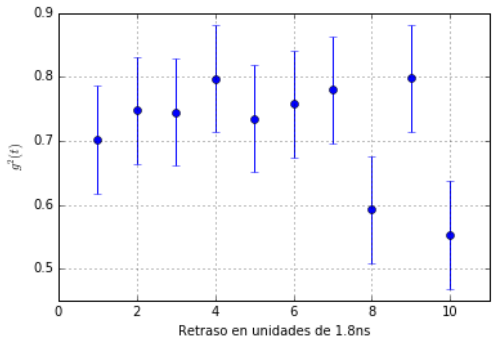


Figura 4. $g^2(t)$ luz coherente

Si traficamos la cantidad de coincidencias contra unidades de retraso vemos que tiene un comportamiento gaussiano pero realmente estamos interesados en ver la función de correlación que tiene basiacmente la misma forma pero tiene un factor de normalización por cada retraso.

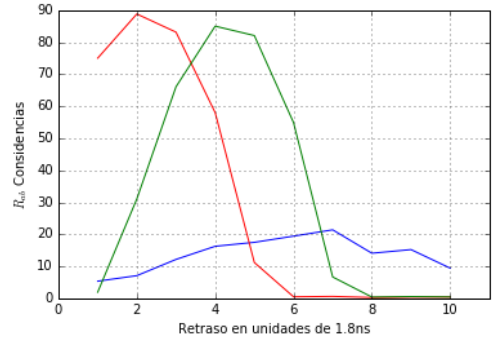


Figura 5. Coincidencias contra retraso temporales

Comparando las funciones de correlación vemos que si se están los comportamientos asintóticos esperados de estas puesto que vemos que hay un máximo coincidencias para retrasos iguales y vemos que cada ves que nos alejamos del valor de retraso las coincidencias tienden a cero que es lo que esperamos. En la gráficas podemos ver que el máximo de coincidencias no esta exactamente en el valor donde no hay retraso, esto lo podemos interpretar porque cuando no hay retraso entre los detectores tenemos un retraso entre fotones debido la propiedad birefrigentes del cristal así que cuando tenemos un retraso

inferior muy cercano al retraso entre fotones vemos que tenemos un máximo coincidencias.

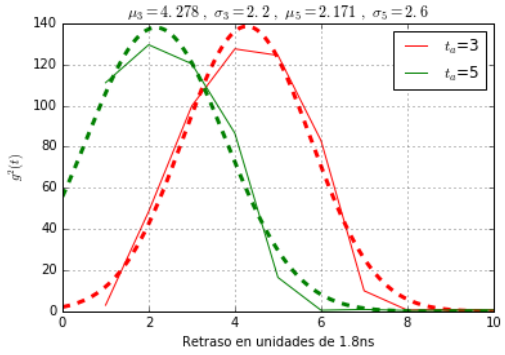


Figura 6. $g^2(t)$ Spdc con retraso de 3 y 5

Esperamos que el máximo de coincidencias para un retraso de 5 sea cuando amos están en 5 pero vemos de la gráfica que el máximo es cuando esta uno en 5 y el otro en 4 pero por el ajuste podríamos decir que el máximo es en 4.278 y en el caso de 3 el máximo de coincidencias es en 2 y el ajuste nos dice que esta en 2.17 así que vemos que si es ligeramente inferior.

B. TDC

Con la TDC en ves de tener una ventana de conteos tenemos es información sobre la diferencial temporal entre detección de fotones con este metodología tenemos un resolución de datos mayor puesto que podemos tener medición de mayor resolucion puesto que este tiene un sistema de detección que cuenta con ventanas temporales menores a la que la electrónica de la FPGA puede manejar entonces tomamos datos de cuando se detecta un foton por un detector

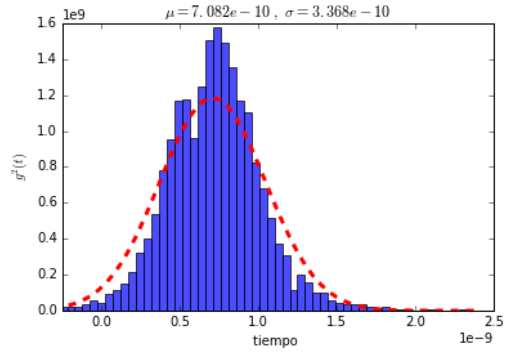


Figura 7.

IV. CONCLUSIONES

Como se dijo en la Sección I, se espera que para un láser el grado de coherencia sea 1 (para el láser ideal) o al menos que la probabilidad de encontrar dos fotones sea independiente del τ. Se puede observar en los resultados que la función obtenida es una aproximación de este ideal, puesto que está alrededor de 0.72, y no existe una dependencia clara del retraso.

Para el caso de los experimentos con fotones SPDC, el BBO crea pares de fotones al incidir la luz láser a este. A pesar de que se espera que ambos fotones se emitan simultáneamente, la misma birrefringencia causa que haya un ligero retraso entre cada uno. Es por esto que se espera que el pico de $g^{(2)}(\tau)$ esté localizado en este desfase causado por el cristal. Sin embargo, esta diferencia temporal es muy pequeña para ser registrada por la resolución temporal de las unidades de retraso de la FPGA ($1.8ns$), y por esto aparece un pico centrado en el caso en el que $\tau_A = \tau_B$. Por errores electrónicos, probablemente la forma en la que se cuentan estas unidades, el pico de la gaussiana aparece corrido por una unidad.

Si comparamos la desviación estándar de ambos métodos vemos efectivamente que la resolución de la TDC es mejor puesto que la desviación de la TDC en nano segundos es 0.33 pero en cambio la desviación de la FPGA es de 3.96 ns de tal forma vemos que la resolución de TDC es mucho mas alta. Esto es consistente con lo que esperábamos puesto que como las ventas de detección so mucho menores deberíamos ver una mejora en la sensibilidad del dispositivo.

En el caso en el que se utiliza la TDC, se tienen unidades de conteos de $25ps$ por lo que se tiene una mejor resolución para observar el desfase causado por el el cristal. Como se observa en la Figura 7 el máximo de conteos está centrado alrededor de los 0.7ns, para todos los trials concatenados en una sola estructura.

[1] J. Liu, Y. Zhou, F. li Li, and Z. Xu. The second-order interference between laser and thermal light. *EPL (Europhysics Letters)*, 105(6):64007, mar 2014.

[2] B. J. Pearson and D. P. Jackson. A hands-on introduction to single photons and quantum mechanics for undergraduates. *American Journal of Physics*, 78(5):471–484, may 2010.

[3] J. J. Thorn, M. S. Neel, V. W. Donato, G. S. Bergreen, R. E. Davies, and M. Beck. Observing the quantum behavior of light in an undergraduate laboratory. *American Journal of Physics*, 72(9):1210–1219, sep 2004.