

## Formato de Presentación de Informe para la Emisión de Paz y Salvo de Asistencias Intersemestrales (junio-julio 2021)

**Fecha de entrega: 20 de agosto** (fecha de envío al profesor asesor)

Medición de la función de correlación espacial de segundo orden a partir de imágenes tomadas en una cámara EMCCD

**1. Nombre del estudiante y código**

Jeimmy Alejandra Alarcón Carvajal - 202027993

**2. Programa de posgrado al que pertenece**

Maestría en Ciencias - Física

**3. Nombre de la profesora asesora**

Alejandra Catalina Valencia González

**4. Título de la propuesta**

Medición de la función de correlación espacial de segundo orden a partir de imágenes tomadas en una cámara EMCCD

**5. Objetivos propuestos**

**Objetivo general**

Implementar un algoritmo para obtener la función de correlación espacial de segundo orden de la luz a partir de imágenes obtenidas con una cámara EMCCD.

**Objetivos específicos**

1. Aprender el funcionamiento de una cámara EMCCD.
2. Aprender sobre los algoritmos existentes que permiten obtener la función de correlación espacial de segundo orden a partir de imágenes obtenidas con la EMCCD.
3. Realizar mediciones de la función de correlación espacial de segundo orden utilizando la cámara EMCCD para una fuente de pares de fotones producidos por SPDC (Spontaneous Parametric Down Conversion).

**6. Resultados encontrados**

**Principio de funcionamiento de la EMCCD**

La EMCCD (*Electron Multiplying Charge Couple Device*) es un tipo de detector multipunto es decir que pueden medir múltiples puntos en el espacio simultáneamente. Su estructura consiste en: un **área de imagen** al cual llegan los fotones durante el tiempo de exposición programado. A partir de efecto fotoeléctrico se generan fotoelectrones libres en el material según la eficiencia cuántica del chip del sensor. Estos electrones son rápidamente desplazados a un **área de**

**almacenamiento** del mismo tamaño del área de imagen para poder adquirir una nueva imagen. Posteriormente, los electrones son transferidos verticalmente a un **registro de lectura** (shift or read out register) que contiene una sección llamada **registro de ganancia** (gain register) [7]. El registro de ganancia consiste en una línea de electrodos discretos, cada uno expuesto a una secuencia de voltajes que hace que las cargas se desplacen al siguiente elemento. Uno de los voltajes es un pulso de alto voltaje (40-60V) por lo cual los electrones transferidos experimentan un efecto llamado ionización por impacto, es decir que el electrón sufre efectos de dispersión transfiriendo parte de su energía a electrones del material, desprendiéndolos y por lo tanto incrementando el número de electrones en los paquetes de carga. Esta ganancia adicional es alrededor 1.01 – 1.015 por estado. Al tener un número grande de estados  $N$  la ganancia total es de  $G = g^N$ , lo cual representa una ventaja significativa en la sensibilidad respecto a la CCD. La ganancia no es mayor a  $G=1000$  según lo reportado en la literatura. Finalmente, estos paquetes de electrones son desplazados verticalmente al **área de amplificación de salida** [16].

### Características de la EMCCD empleada en la realización del proyecto

La cámara utilizada para el desarrollo del proyecto es una iXon+ DU897E Andor Modelo No DU-897E-COO-#BV 2010. La cual es manipulada por medio del software de control Solis. Este software permite adquirir tanto imágenes como videos. La EMCCD tiene dos sistemas de enfriamiento: utilizando aire alcanza los  $-85^{\circ}\text{C}$  y enfriamiento con chorros de agua alcanza los  $-100^{\circ}\text{C}$ . A menores temperaturas se tiene mayor sensibilidad. En las opciones de configuración es posible ajustar el tiempo de exposición, el número de fotogramas, el desplazamiento vertical y horizontal. Además, la cámara presenta una opción de autoguardado que es especialmente útil a la hora de manejar grandes cantidades de imágenes. La cámara tiene opción de guardar los datos en tres formatos: Sif, Fits y Tiff. Y adicionalmente, pueden ser exportados en formatos convencionales de imágenes (jpg, png, bmp).

Descripción	Valores
Tamaño del pixel ( $\mu\text{m}$ )	16 x 16
Nº pixeles	512 x 512
Readout noise	< 1 a 49 @ 10MHz
Readout rate	10, 5, 3, 1 MHz
Método de enfriamiento	$-80^{\circ}\text{C}$ con aire, $-100^{\circ}\text{C}$ con agua.
Eficiencia cuántica máxima	92.5% para 575nm

Tabla 1: Detalles de la EMCCD iXon+ DU897E empleada en el desarrollo del proyecto

Con el fin de estudiar los algoritmos existentes que permiten obtener la función de correlación espacial de segundo orden a partir de imágenes obtenidas con la EMCCD se hizo un recuento de los estudios reportados [17, 13, 16, 11, 18].

Se encontró que en 2002 se reportó el estudio de las correlaciones en SPDC (Spontaneous Parametric Down Conversion) con una cámara ICCD (Intensified CCD) [17]. En este estudio se utilizó una fuente de SPDC tipo I en configuración colineal para generar pares de fotones (signal - idler) correlacionados con el fin de establecer las correlaciones en momento en dos dimensiones. Estos fotones son emitidos en un cono, tiene la misma polarización y para el caso degenerado sus frecuencias son iguales. Para esto se configuró la cámara ICCD y la fuente de tal forma que se obtuvieran imágenes con 0 a 3 píxeles activos, es decir, que llegaran a la cámara un máximo de 3 fotones. Se adquirieron aproximadamente 436000 imágenes y se hizo una selección de imágenes relevantes (~0.4%) tomando como principio que las imágenes tuvieran solamente dos píxeles activos, los cuales serían los fotones correlacionados, signal y idler. Haciendo la superposición de las imágenes se reconstruye el anillo y se determina el centro de masa de la imagen. Tomando este punto como referencia se mide el ángulo relativo entre la posición de los dos píxeles activos en cada imagen en dirección a las manecillas del reloj. Luego, estudia la correlación entre los fotones y el ángulo de llegada a la cámara, graficando el número de imágenes encontrado para cada ángulo en función del ángulo. Finalmente, se encuentra una correlación en  $180^\circ$  concluyendo que los fotones generados por SPDC tipo I con configuración colineal llegan en posiciones diametralmente opuestas en el plano de Fourier.

En 2004 se estudia la correlación espacial del ruido presenta en imágenes obtenidas con una fuente PDC [13]. Se presenta una descripción de la radiación emitida por PDC (Parametric Down Conversion) en la imagen de campo lejano emitida por un cristal no lineal BBO tipo II en configuración colineal. Los haces signal y idler son separados experimentalmente y observados en secciones diferentes de la misma imagen. Las dos secciones muestran patrones que en principio parecen aleatorias pero que en realidad son replicas idénticas la una de la otra. Para cuantificar la correlación se mide la varianza entre las secciones.

Posteriormente, en 2009 es publicado un estudio en el cual se realiza la caracterización de la sensibilidad de un solo fotón en una cámara EMCCD [16]. Este trabajo tuvo como objetivo caracterizar la ganancia, el tiempo de respuesta y el ruido de una EMCCD usando pares de fotones generados por PDC (Parametric Down Conversion). A partir de esta caracterización se busca medir las correlaciones espaciales entre los pares de fotones por PDC entrelazados. Este artículo se organiza abordando las propiedades de entrelazamiento de los fotones producidos por PDC, introduce el principio de operación y las características de la EMCCD, se discute el montaje experimental y se emplea la EMCCD para medir las funciones de correlación espaciales para la fuente de PDC.

En este sentido, se este artículo menciona la importancia que tiene el tiempo de exposición de la EMCCD, siendo el análogo al tiempo de detección cuando se estudian las correlaciones con detectores de fotones individuales. Se aborda en detalle la importancia que tiene las fuentes de ruido al medir las correlaciones espaciales de los fotones y debido a la sensibilidad de la EMMCD. Las imágenes pueden tener información acerca de los pares de fotones correlacionados, también tienen información de fotones correspondientes al ruido del ambiente y electrónico. El ruido puede ser minimizado configurando la rapidez de lectura, la rapidez de desplazamiento de vertical, el umbral y el tiempo de exposición.

Para caracterizar las correlaciones de los momentos transversos se toman alrededor 1000 frames. Cada frame denotado por una función  $F(x, y)$  se convoluciona consigo mismo, es decir que se mide el solapamiento entre el frame original y el mismo frame pero reflejado  $F(x_0 - x, y_0 - y)$  de esta manera es posible determinar la correlación entre los pares de fotones generados por PDC en el plano de Fourier. Para medir la función de correlación total de los fotones y minimizar las correlaciones generadas por el ruido es necesario tomar un número de imágenes del orden  $10^3$ . Entonces, la correlación total está dada por

$$C_{tot}(x, y) = \sum_l^n F^l * F^l$$

donde \* denota la convolución y  $n \gg 1$  el número de frames. Como los pares de fotones están anticorrelacionados en momentos  $C_{tot}(x, y)$  exhibe un pico en el punto  $(x_0, y_0) = (x_a, y_a)$  pues cada punto en el anillo se superpone con el punto diametralmente opuesto en el frame reflejado. Al tener la superposición de numerosos frames, la contribución del ruido se reduce.

Basados en los estudios anteriores [13,16,17], en 2012 se estudia el entrelazamiento para una fuente de fotones por SPDC midiendo las correlaciones espaciales en el plano de la imagen y de los momentos [11]. Se utiliza un cristal lineal BBO tipo I y se analizan alrededor de 100000 imágenes. Se encuentra que las correlaciones espaciales violan el criterio de EPR pero el ruido en las imágenes no permite tener una conclusión final acerca del entrelazamiento.

Finalmente, se encontró que el método más vigente ha sido desarrollado por investigadores de la universidad de Pinceton, publicado en 2018 [18]. Este estudio presenta un modelo general para la detección de pares de fotones con un sensor de imagen. Se miden las correlaciones en intensidad, es decir las correlaciones espaciales de segundo orden, con tres sensores diferentes: una cámara de conteo de fotones individuales efectivos (EMCCD sin umbral), una EMCCD lineal (con umbral) y una CCD estándar. Para desarrollar el modelo se hacen dos consideraciones:

- 1) Los pixeles del sensor operan independientemente.
- 2) El estado de entrada es un estado puro de dos fotones.

Cuando se adquieren múltiples frames se obtienen dos tipos de imágenes, la imagen directa  $\langle x_i \rangle$  obtenida como el promedio de múltiples frames y la imagen de correlación  $\langle x_i, x_j \rangle$  obtenida a partir del producto tensorial de cada frame consigo mismo

$$\begin{aligned} \langle x_i \rangle &= \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{l=0}^M x_i^{(l)}, \\ \langle x_i \rangle &= \sum_{m=0}^{+\infty} P(m) \sum_{k_i=0}^{2m} I_{k_i} \sum_{q=0}^{\lfloor k_i/2 \rfloor} (\eta^2 \Gamma_{ii})^q (2\eta \Gamma_i - 2\eta^2 \Gamma_{ii})^{k_i-2q} (1 - 2\eta \Gamma_i + \eta^2 \Gamma_{ii})^{m-k_i+q} \binom{k_i-q}{q} \binom{m}{k_i-q}, \\ \langle x_i x_j \rangle &= \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{l=0}^M x_i^{(l)} x_j^{(l)}. \\ \langle x_i x_j \rangle &= \sum_{m=0}^{+\infty} P(m) \sum_{k_i=0}^{2m} \sum_{k_j=0}^{2m} I_{k_i} I_{k_j} \sum_{q=0}^{\lfloor (k_i+k_j)/2 \rfloor} \sum_{l=0}^q \sum_{p=0}^{q-l} (1 - 2\eta \Gamma_i - 2\eta \Gamma_j + \eta^2 \Gamma_{ii} + \eta^2 \Gamma_{jj} + 2\eta^2 \Gamma_{ij})^{m-(k_i+k_j-q)} \\ &\quad \times (\eta^2 \Gamma_{jj})^p (2\eta^2 \Gamma_{ij})^l (\eta^2 \Gamma_{ii})^{q-l-p} (2\eta \Gamma_i - 2\eta^2 \Gamma_{ii} - 2\eta^2 \Gamma_{ij})^{k_i+l-2(q-p)} (2\eta \Gamma_j - 2\eta^2 \Gamma_{jj} - 2\eta^2 \Gamma_{ij})^{k_j-2p-l} \\ &\quad \times \binom{k_j-l-p}{p} \binom{k_i-q+p}{q-l-p} \binom{k_i+k_j-q-l}{k_i-q+p} \binom{k_i+k_j-q}{l} \binom{m}{k_i+k_j-q}. \end{aligned}$$

donde  $i$  representa la posición del píxel del primer fotón y  $j$  el segundo fotón del par de fotones correlacionados.  $x_i$  el valor de intensidad del fotón en  $i$ .  $M$  es el número total de adquisiciones y  $l$  lleva el conteo de adquisiciones. La distribución de probabilidad conjunta es representada por  $\Gamma_{ij}$  y significa la probabilidad de que el primer fotón del par que llegan al sensor llegue al píxel  $i$  y el segundo al píxel  $j$ . Y por último, se tiene que  $\eta$  representa la eficiencia cuántica del sensor.

Estas dos ecuaciones muestran que conociendo las características del sensor, como lo son la eficiencia cuántica, la función de respuesta u la distribución del número de pares incidentes, se puede encontrar una relación entre la imagen directa y correlacionada, y la distribución de probabilidad conjunta. Adicionalmente, en este estudio se llega a que la distribución de probabilidad conjunta está dada por

$$\Gamma_{ij} = \frac{1}{2A^2 \bar{m} \eta^2} [\langle x_i x_j \rangle - \langle x_i \rangle \langle x_j \rangle],$$

donde  $c$  es una variable binaria que puede tomar valores 0 o 1. Y  $m$  es el valor medio de la rata de pares de fotones, que pueden ser controlado ajustando el tiempo de exposición del sensor o la potencia del láser. La expresión para la probabilidad conjunta puede ser interpretada como: Un factor de escala. Un primer término que está asociado al producto tensorial del frame consigo mismo y corresponde a la correlación entre los pares de fotones correlacionados adquiridos en un frame. Y un segundo termino que corresponde a la correlación de intensidad de fotones leídos en una imagen, pero cuyo par se encuentra en otra adquisición. Al hacer la sustracción entre estas dos cantidades las correlaciones espaciales de segundo orden son obtenidas.

De todo lo anterior, se encontraron dos posibles protocolos para medir las funciones de correlación espaciales de segundo orden para una fuente de SPDC. El primero, consiste en tomar la fuente de fotones SDPC, y formar el sistema óptico que se quiera estudiar, ya se el plano de la imagen o plano de Fourier, configurar la cámara para minimizar ruidos electrónicos y del ambiente, adquirir un número de imágenes mayor a  $10^3$ , y realizar la suma de todas las auto convoluciones de cada imagen consigo mismas. Este algoritmo se programó en MatLab y se obtuvieron resultados similares a los del estudio publicado.

El otro protocolo estudiado consiste en tomar una fuente tal que los estados de entrada sean estados puros de dos fotones, formar el sistema óptico que se quiera estudiar, ya se el plano de la imagen o plano de Fourier, configurar la cámara para minimizar ruidos electrónicos y del ambiente, adquirir un número de imágenes del orden de  $10^7$ , calcular la imagen directa y la imagen de correlación con las ecuaciones para  $\langle x_i \rangle$  y  $\langle x_i, x_j \rangle$ . Calcular la distribución de probabilidad conjunta  $\Gamma_{ij}$ .

Abordando los aspectos experimentales, se instaló el montaje experimental para medir la función de correlación espacial de segundo orden (correlación en intensidad) en el laboratorio Q402. Se tomaron imágenes de ruido y se aprendió la configuración de la cámara. Empleando una fuente pseudo-térmica, se encontró que el tiempo de exposición y el umbral configurados en la cámara son primordiales para la adquisición de datos y la cantidad de ruido en las imágenes.

## 7. Justificación de incumplimiento

Se abordaron todos los objetivos. Se aprendió que la fuente empleada para determinar las correlaciones espaciales debe cumplir con unas características específicas según el algoritmo que emplee, debido a que no existe un algoritmo general que permita encontrar las correlaciones espaciales para cualquier tipo de fuente. A pesar de encontrar estudios que reportan métodos de medición de las correlaciones en intensidad para la EMCCD y reproducir con simulaciones algunos resultados, aún hace falta obtener el protocolo específico a usar en el laboratorio.

Nombre y firma del estudiante  
asesor

Jeimmy Alejandra Alarcón Carvajal  
González

Vo.Bo. del profesor

Alejandra Catalina Valencia

## Referencias

- [1] N. J. Cerf, G Leuchs, E. S. Polzik, "Quantum Information with Continuous Variables of Atoms and Light", Imperial College Press (2017).
- [2] M. G. Raymer, A. C. Funk, D. F. McAlister "Measuring the Quantum Polarization State of Light" Quantum Communication, Computing, and Measurement 2. Springer, Boston, MA. (2002).
- [3] S. Takeda, M. Fuwa, P. Look and A. Furusawa, "Entanglement Swapping between Discrete and Continuous Variables" Phys. Rev. Lett. **114**, 100501 (2015).
- [4] K. E. Dorfman, F. Schlawin, and S. Mukamel, "Nonlinear optical signals and spectroscopy with quantum light", Rev. Mod. Phys. **88**, 045008 (2016).
- [5] O. Calderón, J. Flórez, J. Villabona, Y A. Valencia, "Measuring different types of transverse momentum correlations in the biphoton's Fourier plane" Opts. Lett. **41**, 255830 (2016).
- [6] O. Calderón and A. Valencia, "On the control of the momentum distribution of paired photons generated by non-collinear type-II spontaneous parametric down-conversion," J. Opt. Soc. Am. B **36**, 1769-1773 (2019).
- [7] Oxford Instruments ANDOR, *EMCCD*, (Mayo 2021).  
<https://andor.oxinst.com/learning/view/article/electron-multiplying-ccd-cameras>
- [8] M. Edgar, D. Tasca, F. Izdebski, R. Warburton, J. Leach, M. Agnew, G. Buller, R. Boyd, and M. Padgett "Imaging high-dimensional spatial entanglement with a camera" Nat Commun **3**, 984 (2012).
- [9] F. Devaux, A. Mosset, P-A. Moreau, and E. Lantz, "Imaging Spatiotemporal Hong-Ou-Mandel Interference of Biphoton States of Extremely High Schmidt Number", Phys. Rev. X **10**, 031031 (2020).

- [10] E. Lantz, J-L Blanchet, L. Furfaro, F. Devaux, "Multi-imaging and Bayesian estimation for photon counting with EMCCDs", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **386**, 2262–2270 (2008)
- [11] M. Edgar, D. Tasca, F. Izdebski, R. Warburton, J. Leach, M. Agnew, G. Buller, R. Boyd, and M. Padgett "Imaging high-dimensional spatial entanglement with a camera" *Nat Commun* 3, 984 (2012).
- [12] M. Reichert, H. Defienne, and J. W. Fleischer "Massively Parallel Coincidence Counting of High-Dimensional Entangled States". *Sci Rep* 8, 7925 (2018).
- [13] O. Jedrkiewicz, Y.-K Jiang, E. Brambilla, A. Gatti, M. Bache, L. A. Lugiato, and P. Di Trapani "Detection of Sub-Shot noise spatial correlation in high-gain Parametric Down Conversion" *Phys. Rev. Lett.* 93, 243601 – Published 6 December 2004
- [14] Y. Shih, "Entangled biphoton source - property and preparation" *Rep. Prog. Phys.* **66** 1009 (2003)
- [15] H. Rojas, and A. Valencia, "Interferencia Espacial de Dos Fotones" Facultad de Ciencias UniAndes INV – 2020-104-2052
- [16] L. Zhang, L. Neves, J. S. Lundeen and I. A Walmsley "A characterization of the single-photon sensitivity of an electron multiplying charge-couple device" *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **42** 114011 (2009)
- [17] S. S. R. Oemrawsingh, W. J. van Drunen, E. R. Eliel, and J. P. Woerdman, "Two-dimensional wave-vector correlations in spontaneous parametric downconversion explored with an intensified CCD camera," *J. Opt. Soc. Am. B* 19, 2391-2395 (2002)
- [8] H. Defienne, M. Reichert, and J. W. Fleischer, "General Model of Photon-Pair Detection with an Image Sensor", *Phys. Rev. Lett.* **120**, 203604 (2018).