
Práctica N° 4

Correlación espacial



Araiza Bautista Luis Angel
Jain Jiménez Abraham
Sánchez Nicolás Cristo Fernando
Silva Ruiz Andrés

Laboratorio de Física Contemporánea II
Universidad Nacional Autónoma de México,
Facultad de Ciencias.



12 de Julio de 2025

Resumen

Se investigó la correlación espacial de pares de fotones utilizando un láser de 120 mW y 405 nm como fuente de luz. El láser se dirigió hacia un divisor de haz 50 : 50, dirigiendo el haz resultante hacia dos detectores móviles. Se registraron las coincidencias al mover los detectores en incrementos de 1cm, representando la distribución mediante la matriz correspondiente. La mayor cantidad de coincidencias se produjo cuando ambos detectores estaban a la misma distancia de la fuente, siguiendo una distribución similar a la poissoniana con un pico de coincidencias en 7 cm, en lugar del punto medio esperado de 8 cm.

1. Introducción

Dentro del marco de la mecánica cuántica, las partículas pueden exhibir correlaciones no clásicas, conocidas como entrelazamiento cuántico. Dichas correlaciones se manifiestan mediante las relaciones entre las partículas que han interactuado o se han generado juntas [1].

La correlación espacial entre fotones se refiere a la relación entre las posiciones de detección de dos fotones que han sido generados conjuntamente, típicamente a través del proceso conocido como conversión paramétrica descendente espontánea (o SPDC por sus siglas en inglés).

La SPDC es un proceso no lineal en el cual un fotón de alta energía (fotón de bombeo) se descompone en dos fotones de menor energía dentro de un cristal no lineal, como el beta-borato de bario (BBO). Este proceso se clasifica en dos tipos: Tipo I y Tipo II. En

el SPDC Tipo I, los dos fotones hijos tienen polarizaciones paralelas, mientras que en el Tipo II, las polarizaciones son ortogonales. La elección del cristal y la configuración experimental determinan las propiedades de los fotones generados, incluyendo sus correlaciones espaciales, temporales y de polarización [2].

Las magnitudes de dichos fotones, tales como energía, momento y posición, se encuentran correlacionadas. Dado que el momento del fotón de bombeo se divide en los momentos de los fotones hijos, los fotones generados estarán correlacionados espacialmente [3].

Para medir y analizar la correlación espacial entre fotones, se utilizan sistemas de detección de coincidencia que incluyen dos detectores de fotones de alta eficiencia, como detectores de avalancha de fotones (APDs). Estos detectores son capaces de registrar la llegada de fotones individuales con alta precisión

temporal y espacial.

Los detectores se pueden mover de manera independiente en el espacio para escanear diferentes posiciones relativas. La coincidencia de detección se mide utilizando un correlacionador temporal que registra eventos de detección simultánea en ambos detectores. Al variar sistemáticamente las posiciones de los detectores y registrar las coincidencias, se obtiene un mapa detallado de la correlación espacial, que refleja la distribución de probabilidad conjunta de detección de los fotones gemelos. Este mapa proporciona información crítica sobre las propiedades del estado cuántico de los fotones y la eficiencia del proceso de generación de pares de fotones [4].

Para representar la probabilidad conjunta de detección de dos partículas en diferentes posiciones se hace uso de una matriz de correlación [5]. En esta matriz, cada elemento C_{ij} representa la probabilidad de detectar una coincidencia de fotones en las posiciones i y j de los detectores. Para cada par de posiciones (i, j) se registra el número de veces que se detectan fotones de manera simultánea en ambos detectores.

Los elementos de la diagonal principal (C_{ii}) representan las coincidencias cuando ambos detectores están en la misma posición relativa. En el caso ideal de máxima correlación espacial, se espera que estos valores sean significativamente mayores que los de fuera de la diagonal.

La forma y la distribución de los elementos no nulos de la matriz proporcionan información sobre cómo las partículas están correlacionadas espacialmente. Un pico pronunciado y concentrado en la diagonal indica una fuerte correlación espacial, mientras que una distribución más dispersa sugiere una correlación más débil o ruido en el sistema [6].

2. Objetivos

El presente experimento tiene como objetivos principales:

- Observar el comportamiento de la detección de fotones, analizando su variación cuando se

modifica la distancia entre los detectores y la fuente de luz.

- Comprender la distribución espacial de los fotones y la correlación de sus trayectorias.
- Analizar el rendimiento de detección, evaluando la eficiencia y capacidad de los detectores para registrar los fotones en diferentes posiciones.
- Comparar los datos obtenidos con las simulaciones proporcionadas para encontrar similitudes o diferencias importantes.

3. Metodología

Como fuente de luz se utilizó un láser de potencia $120mW$ y longitud de onda $405nm$ (color violeta). Este láser se colocó frente a un divisor de haz 50:50. El haz dividido incidió en dos direcciones opuestas, donde se ubicaron dos detectores, uno a cada lado. Los detectores fueron montados en sistemas de posicionamiento que permitían su movimiento milimétrico.

El experimento consistió en la toma de barridos utilizando un programa computacional adaptado para este propósito. Los detectores se movieron en un rango de $10cm$, desde $13cm$ hasta $3cm$, con incrementos de $1cm$.

Inicialmente, se mantuvo fijo uno de los detectores a una distancia de $13cm$. Luego, el segundo detector se movió desde $13cm$ hasta $3cm$, registrando datos en cada posición con un tiempo de prueba de $500000\mu s$ y una ventana de coincidencia de $5ns$. Este procedimiento se repitió para cada posición fija del primer detector, disminuyendo la distancia en $1cm$ después de cada serie de barridos, hasta que ambos detectores se encontraron a $3cm$. Así, se realizaron un total de 11 barridos para cada posición inicial del primer detector.

De los 121 conjuntos de datos se promediaron todas las correlaciones NTR se formó una matriz de 11×11 que representa la distribución total de los datos.

Para cada configuración de los detectores, se registraron las coincidencias de detección de fotones, lo que permitió mapear la correlación espacial entre ellos. Este proceso sistemático aseguró una cobertura completa del rango de distancias especificado, proporcionando los datos necesarios para el análisis de la función de correlación espacial.

Para tener un análisis completo de la distribución de coincidencias detectadas, estas se modelaron mediante tres sistemas, de acuerdo a la información contenida en la matriz:

- Una proyección bidimensional, correspondiente a un mapa de calor, de las coincidencias en función de las posiciones variantes del detector señal y del detector testigo.
- Una gráfica de coincidencias en función de la posición variante del detector testigo con respecto al haz, fijando la posición del detector señal.
- Una proyección tridimensional correspondiente a una superficie de coincidencias en función de las posiciones variantes de ambos detectores.

Estos datos, se compararon con los obtenidos de una simulación que se presenta en el Apéndice A, en donde además se encuentra un hiperenlace a la misma.

4. Resultados

La matriz de los datos del promedio de coincidencias medidas, dependiente de la variación de la posición de ambos detectores se puede consultar en el hiperenlace del Apéndice B.

Proyección bidimensional:

Se desarrolló el siguiente mapa de calor con los datos obtenidos en una proyección dos dimensional:

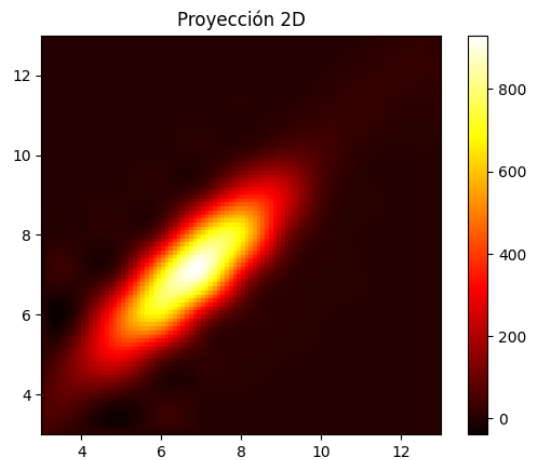


Figura 1: Mapa de calor bidimensional de la distribución matricial conformada por el promedio de coincidencias en función de la posición del detector testigo con la posición del detector señal.

Coincidencias en función del testigo:

Para esta representación de la distribución del promedio de coincidencias se tomó como punto de partida el número máximo de coincidencias reportado (895.375), el cual se midió cuando la distancia asociada a ambos detectores fue de 7cm. De aquí que para el análisis nos centramos en analizar las mediciones donde el detector señal se fija en 7cm, mientras que la posición del testigo varía.

Obtuvimos el siguiente gráfico:

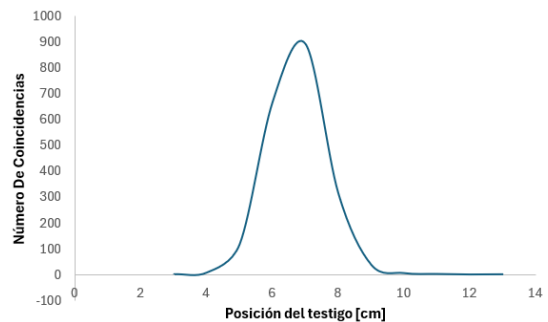


Figura 2: Distribución del promedio de coincidencias en función de la posición (en cm) del detector testigo, con la posición del detector señal establecida a 7cm.

Proyección tridimensional:

De acuerdo con los datos obtenidos, obtuvimos la siguiente representación tridimensional de las coin-

cidencias con posiciones variantes para ambos detectores:

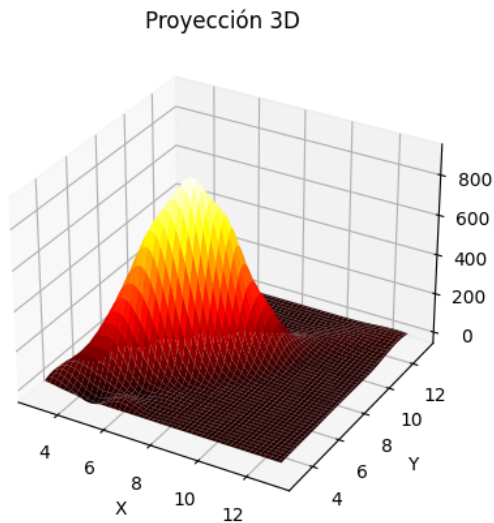


Figura 3: Mapa de calor de la distribución matricial conformada por el promedio de coincidencias en función de la posición del detector testigo con la posición del detector señal.

5. Análisis, discusión e interpretación de los resultados

Las proyecciones bidimensional y tridimensional muestran como la mayor cantidad de coincidencias se dan en los puntos donde $x = y$ dentro de la matriz (x, y) , esperando que el punto de mayor coincidencias sea aquel conformado por los puntos medios de los pasos dados como se muestra en la simulación.

En el caso experimental el punto medio entre 3cm y 13cm es 8cm sin embargo el mayor punto de coincidencias esta ubicado en el paso dado en 7cm , donde se encuentra el punto de mayor calor, es decir, el punto con mayores coincidencias, mientras que al redor de dichos puntos hay una cantidad similar de coincidencias, cayendo a los extremos.

Mientras tanto, en la distribución de coincidencias, la simulación indica que experimentalmente podemos esperar que exista una meseta ligeramente ascendente donde el punto medio sea aquel que tenga mayores coincidencias sin variar en gran cantidad

respecto a algún punto cercano, sin embargo experimentalmente se tiene un pico en 7cm mas parecido a una distribución de Poisson.

Por su parte el mapa de calor en tres dimensiones producto de la simulación muestra como hay una diversidad de elevaciones, es decir una serie de picos de coincidencias, mientras que experimentalmente existe un solo pico con aumento gradual de la elevación, como si de una montaña se tratase.

Todo lo anterior muestra como experimentalmente sigue una distribución cercana a la distribución de Poisson, así como que la detección se da mejor cuando ambos detectores se posicionan a la misma distancia de detección.

6. Conclusiones

Como se expresó anteriormente, se puede notar que la distribución de detección de pares de fotones sigue una muy similar a las distribuciones de Poisson, teniendo en cuenta las diferencias entre los resultados de las simulaciones y los experimentales se puede observar fácilmente que la experimental tiene más coherencia en la distribución llegando a un solo pico máximo de detección, sin pasar por diversos picos como si se observa en lo simulado. Además como hay un punto máximo que puede no ser el punto medio como podría esperarse observando la simulación.

Una manera de obtener mejores distribuciones, una distribución más acertada sería repetir el experimento con un numero mayor de pasos para observar si se sigue manteniendo dicho comportamiento o existen algunos cambios además de compararlos con la simulación y los datos obtenidos con anterioridad.

Referencias

- [1] Mark Fox. *Quantum Optics: An Introduction*. Oxford University Press, Oxford, 1st edition, 2006.

- [2] Bahaa E. A. Saleh and Malvin Carl Teich. *Fundamentals of Photonics*. Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, 2nd edition, 2007.
- [3] Juan P. Torres and Lluís Torner. *Twisted Photons: Applications of Light with Orbital Angular Momentum*. Wiley-VCH, Berlin, 2011.
- [4] Alan Migdall, Sergey Polyakov, Jianming Fan, and Joshua C. Bienfang, editors. *Single-Photon Generation and Detection: Physics and Applications*. Academic Press, New York, 2013.
- [5] Leonard Mandel and Emil Wolf. *Optical Coherence and Quantum Optics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1st edition, 1995.
- [6] Roy J. Glauber. *The Quantum Theory of Optical Coherence*. Wiley-VCH, Berlin, 1st edition, 2007.

Apéndice A

La [simulación](#) se estableció para recrear condiciones similares a las experimentales, con 11 posiciones, para la cual se obtuvieron los tres gráficos que se presentaron en la sección de resultados.

Proyección bidimensional:

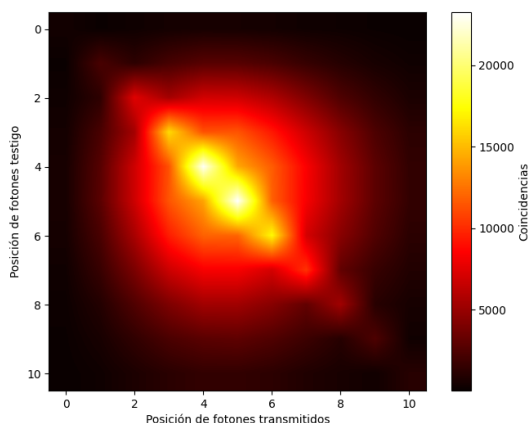


Figura 4: Mapa de calor bidimensional de una distribución conformada por las coincidencias en función de la posición del detector testigo con la posición del detector señal.

Coincidencias en función del testigo:

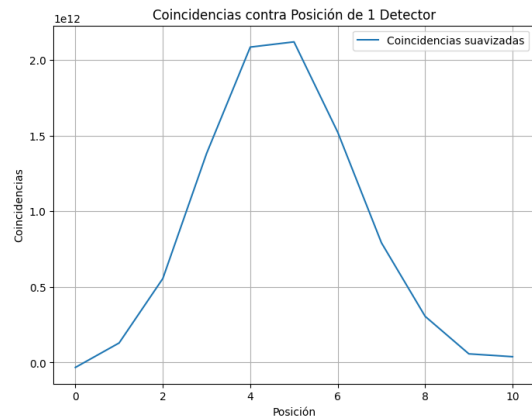


Figura 5: Distribución del promedio de coincidencias en función de la posición de un detector testigo, con la posición del detector señal.

Proyección tridimensional:

Coincidencias en función de las posiciones de fotones transmitidos y testigo 3D

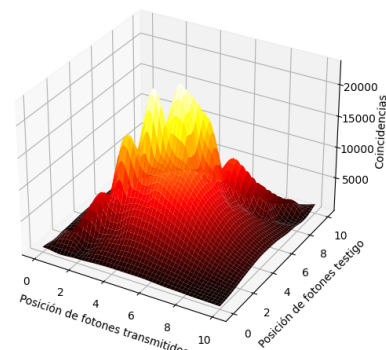


Figura 6: Mapa de calor de una distribución conformada por las coincidencias en función de la posición del detector testigo con la posición del detector señal.

Apéndice B

[Matriz](#) de los datos consistentes en el promedio de las coincidencias reportadas para cada medición de acuerdo a las respectivas posiciones asociadas a ambos detectores:

xy	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
3	34.9	13.75	3.125	1.75	1.95	1.25	0.95	675	625	0.7	575
4	46.225	88.5	41.175	8	3.575	3	1.675	1.35	925	0.6	0.85
5	194	178.325	301.675	139.25	27.1	8.775	4.325	2.55	1.625	1.325	925
6	3.425	63.325	459.075	682.175	270.175	41.8	10	3.8	2.325	1.9	1.525
7	2.5	09.025	119.425	670.025	895.375	316.95	39.775	6.875	3.525	1.6	2.35
8	2.175	3.75	13.15	141.725	632.475	686.55	199.1	20.25	2.7	1.675	1.7
9	1.15	2.15	3.75	11.225	93.175	325.475	280.425	59.575	5.7	0.95	1.075
10	375	675	1.275	2.575	5.325	34.575	85.975	54.7	10.55	1.475	1.225
11	225	0.5	1.025	1.4	1.475	1.9	6.8	21.2	36.825	10.925	12.3
12	0.15	0.45	0.75	925	01.06	1.125	0.5	3.55	18.125	21.525	21.3
13	0.1	225	425	0.65	625	625	0.45	0.35	2.55	11.175	10.45

Figura 7: Matriz conformada por el promedio de coincidencias en función de la posición del detector testigo con la posición del detector señal.