

Informe Final. Mecánica Cuántica Avanzada.

Entrelazamiento en Polarización mediante SPDC".

Fabiola Amazo Gómez¹.

Jefferson Rubiano Forero².

Juan Gabriel Suarez Cadena³.

Valentina Vega Caro⁴.

Resumen

Se llevó a cabo un experimento para reproducir el estado de entrelazamiento en polarización entre dos pares de fotones (signal, idler) generados mediante el proceso de conversión paramétrica descendente espontánea (SPDC) tipo I, con el ánimo de verificar la violación de la desigualdad de Bell se emplean dos cristales BBO tipo I y un polarizador tipo PBS. Para ello, se ajustó el ángulo en el polarizador asociado al detector A, buscando determinar el máximo de coincidencias, como se muestra en la figura 2, lo cual produce una función periódica entre el número de coincidencias y el ángulo. Como resultado, se obtuvo un estado entrelazado representado por la forma de la fig. 2. Este logro resalta la importancia de la manipulación precisa de parámetros (ángulos de polarización, delay temporal) experimentales y sienta las bases para la posterior violación de la desigualdad de Bell.

1. Introducción.

El proceso de SPDC es un fenómeno óptico no lineal, el cual es bastante usado en el área de óptica cuántica y sirve de base de varios fenómenos óptico-cuánticos y de diferentes experimentos. En este proceso, un fotón, 'pump', con una determinada energía incide sobre un cristal no-lineal y genera un par de fotones, 'signal' y 'idler' que tienen una menor energía. Esta energía con

la que incide está determinada por las características del cristal. En particular, el proceso de SPDC tipo I, ocurre cuando los fotones 'signal' y 'idler' comparten la misma polarización y esta a su vez es ortogonal a la polarización del fotón 'pump'.

En este caso, se implementó un montaje para el proceso de SPDC tipo I, en donde el objetivo principal es generar un estado entrelazado utilizando el montaje propuesto que se muestra en la figura 2. Para realizar las mediciones, se cercioró de que hubiera una buena alineación y de que se maximizara el número de coincidencias. Esto con el fin de obtener la gráfica esperada que se muestra en la figura 6 y que el estado entrelazado sea de la forma 2.

De esta manera, el presente artículo aborda la formulación teórica del experimento, cómo se realizó el montaje, los resultados que se obtuvieron y finalmente lo que se pudo concluir del mismo.

2. Marco Teórico

2.1. Conversión SPDC

Para la generación del estado de Bell(entrelazado), se uso el conversión paramétrica descendente espontánea. Se caracteriza porque a partir de un fotón de una longitud de onda dada(Frecuencia) genera dos fotones con el doble de la longitud de onda (mitad de la frecuencia). El proceso es paramétrico porque depende del campo eléctrico del fotón y no solo de su intensidad, espontáneo ya que no hay campos externos que lo produzcan y es intrínseco al material. Descendente porque como se menciono disminuye la frecuencia del fotón. Resultado de que es un proceso espontáneo, en consecuencia se conservan la energía del fotón y el momento angular. Estas condiciones se describen mediante las condiciones de phase matching, que indican que la energía de fotón durante todo el proceso se conserva. En particular existen dos procesos: **Tipo 1** Este proceso se caracteriza porque el par de fotones producidos tienen polarización ortogonal(Ordinaria) al fotón incidente, y estos se ubican en un cono cuyo eje corresponde a la línea de propagación del fotón de bombeo. **Tipo 2** Este los dos fotones emergen con uno con polarización ortogonal(ordinaria) al fotón de bombeo y otro con polarización paralela(extraordinaria) paralela a este.

2.1.1. Condiciones de 'Phase-matching'

El proceso de SPDC satisface la conservación de energía y momento(ver figura 1 a)), lo que lleva a la condición de 'phase-matching':

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i$$

$$k_p = k_s + k_i$$

¹dfamazog@unal.edu.co

²jarubianof@unal.edu.co

³jgsuarezc@unal.edu.co

⁴mavegac@unal.edu.co

Donde p, i y s hacen referencia al fotón 'pump', 'signal' y 'idler', respectivamente.

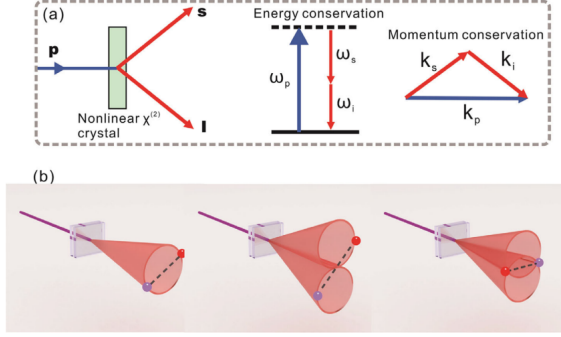


Figura 1: a) Esquema del proceso SPDC. b) De izquierda a derecha: SPDC tipo I, SPDC tipo II colinear, y SPDC tipo II no colinear [1].

En el SPDC tipo I forman círculos concéntricos entrados en el haz del fotón 'pump' desde el punto de vista de la sección transversal. (ver figura 1 b)).

Usando SPDC y el hecho de que ambos fotones estado indeterminación cuántico de polarización, se genero un estado de Bell 2, y se estudió la probabilidad de encontrar el estado entrelazado.

2.2. Generación fotones entrelazados

2.2.1. Polarización lineal

Inicialmente, el objetivo consistió en generar a partir del haz láser con una longitud de onda específica (en nanómetros), un estado lineal caracterizado por una probabilidad igual de polarización horizontal (H) y vertical (V). Este estado, descrito por la Ecuación 1, se encontraba en su forma original antes de interactuar con los cristales BBO.

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle + |V\rangle) \quad (1)$$

Con el fin de que los dos cristales no lineales generen un estado de Bell con la forma descrita en la Ecuación 2,

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle |H\rangle + |V\rangle |V\rangle) \quad (2)$$

Partiendo del estado general en la base $H-V$ y siguiendo la metodología y el montaje experimental propuestos, el estado inicial del sistema se puede representar como una superposición de los estados de polarización horizontal y vertical. Supongamos que el estado inicial del sistema es $|\psi\rangle = \cos \theta |H\rangle + e^{i\phi} \sin \theta |V\rangle$. El estado general del sistema puede estar en cualquier superposición de los estados $|H\rangle$ y $|V\rangle$ antes de interactuar con el PBS.

Si para el HWP se asigna una matriz de Jones:

$$M_{PBS} = \begin{pmatrix} \cos 2\theta_1 & \sin 2\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 & -\cos 2\theta_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\cos \theta |H\rangle + e^{i\phi} \sin \theta |V\rangle \quad (4)$$

Por lo tanto, la placa de onda media (HWP) con un ángulo de rotación θ cambia el estado de polarización del haz de luz que lleva:

$$\begin{pmatrix} \cos 2\theta_1 & \sin 2\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 & -\cos 2\theta_1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ e^{i\phi} \sin \theta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{i\phi} \end{bmatrix}$$

se puede verificar que usando $\theta_1 = \theta/4$ produce el estado similar 1, también corresponde a un estado de máximo entrelazamiento. Una vez obtenido el estado polarizado diagonal 1 se uso un cristal BBO tipo I, del cual emergen dos fotones polarizados linealmente en $|V\rangle$. Si el estado esta polarizado $|H\rangle$, como se menciona en la sección SPDC. Si ubica posteriormente un segundo cristal BBO cuyo eje principal es perpendicular al primero, de tal forma que emergerán dos fotones polarizados verticalmente, Si el estado es $|H\rangle$. En consecuencia para un fotón en un estado de superposición 1, se tiene que los fotones generados estarán en un estado $|HH\rangle$ ó en el estado $|VV\rangle$ por tanto se tiene el estado entrelazado 2.

2.3. Medición estado entrelazado

Con lo anterior, una forma propuesta para medir el entrelazamiento es con las coincidencias usando dos canales de detección diferentes y considerando la tasa de detección de los dos canales. Donde $P(A, B)$ representan las probabilidad conjunta de detectar el primer A el y segundo fotón B. Si asumimos que estos fotones se detectan en un intervalo de tiempo que define la ventana de coincidencia, la tasa de coincidencia C puede expresarse en términos de las probabilidad conjunta de detección:

Donde se uso PBS para transmitir una única componente en la base H-V del fotón al correspondiente al detector, ejemplo:

$$M_{PBS} |I\rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot (a |H\rangle + b |V\rangle) = a |H\rangle \quad (5)$$

2.4. Probabilidad teórica

La probabilidad conjunta en este montaje experimental se calcula por medio del valor esperado del operador de proyección $\hat{P}(\theta_A, \theta_B)$. En este caso particular, se dispone de un único divisor de haz (PBS, por sus siglas en inglés), lo que limita las mediciones posibles. La única medición viable es configurar el PBS del detector A a un ángulo de 45° mientras se varía el ángulo del PBS (componente del) del detector B.

Recordando que probabilidad conjunta se refiere a la probabilidad de detectar el fotón B a un cierto ángulo de polarización, dado que el fotón A permanece en

un ángulo fijo de 45° . La expresión del operador de proyección asociado con esta configuración es $\hat{P}(45^\circ, \theta_B) = |45, \theta_B\rangle \langle 45, \theta_B|$.

$$\begin{aligned}
p(45, \theta_B) &= \langle \phi_+ | \hat{P}(45^\circ, \theta_B) | \phi_+ \rangle \\
&= \frac{1}{2} (\langle HH | + \langle VV |) [|45, \theta_B\rangle \langle 45, \theta_B|] (|HH\rangle + |VV\rangle) \\
&= \frac{1}{2} [(\langle HH | + \langle VV |) \\
&\quad [\frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle + |V\rangle)(\cos(\theta_B) |H\rangle + \sin(\theta_B) |V\rangle) \\
&\quad (\frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle + |V\rangle)(\cos(\theta_B) \langle H| + \sin(\theta_B) \langle V|))] \\
&\quad [|HH\rangle + |VV\rangle] \\
&= \frac{1}{4} [(\langle HH | + \langle VV |) \\
&\quad [(\cos(\theta_B) |HH\rangle + \sin(\theta_B) |VV\rangle + \cos(\theta_B) |VH\rangle + \sin(\theta_B) |HV\rangle) \\
&\quad (\cos(\theta_B) \langle HH| + \sin(\theta_B) \langle VV| + \cos(\theta_B) \langle VH| + \sin(\theta_B) \langle HV|)] \\
&\quad [|HH\rangle + |VV\rangle]
\end{aligned}$$

donde los términos HV y VH se anulan ya que son ortogonales a VV y HH

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{4} [(\langle HH | + \langle VV |) \\
&\quad [(\cos(\theta_B) |HH\rangle + \sin(\theta_B) |VV\rangle + \cos(\theta_B) |VH\rangle + \sin(\theta_B) |HV\rangle) \\
&\quad (\cos(\theta_B) \langle HH| + \sin(\theta_B) \langle VV| + \cos(\theta_B) \langle VH| + \sin(\theta_B) \langle HV|)] \\
&\quad [|HH\rangle + |VV\rangle] \\
&= \frac{1}{4} [\cos(\theta_B) + \sin(\theta_B)] * [\cos(\theta_B) + \sin(\theta_B)]
\end{aligned}$$

Finalmente se obtiene:

$$P(45, \theta_B) = \frac{1}{4} (1 + 2\sin\theta_B \cos\theta_B) \quad (6)$$

3. Desigualdad de Bell

La desigualdad de Bell es un concepto en la mecánica cuántica que fue introducido por el físico John Stewart Bell en 1964. Este resultado fue fundamental por que demuestra la incompatibilidad entre la mecánica cuántica y teoría locales de variables ocultas.

Las variables ocultas locales son propiedades hipotéticas de las partículas cuánticas que no son incluidas en la teoría pero pueden afectar los resultados de experimentos. Las teorías alrededor de estas variables proponen que las propiedades son determinadas por el entorno inmediato de las partículas y que las interacciones entre ellas está limitada por la velocidad de la luz.

El teorema de Bell se puede derivar bajo ciertas suposiciones sobre la naturaleza de la medida y de las propiedades del sistema cuántico. Este plantea que si la teoría física de las variables ocultas es correcta, debe cumplir la desigualdad [4].

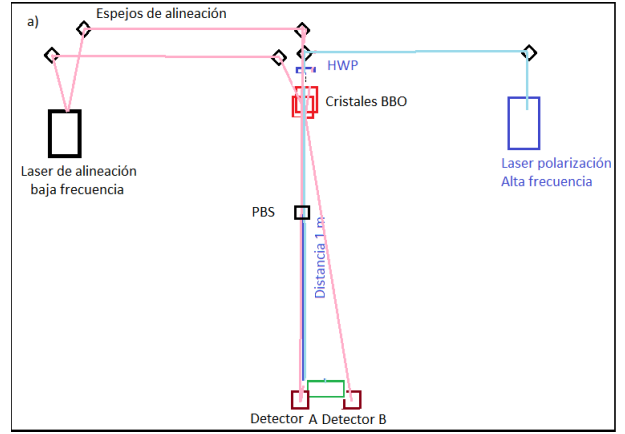
$$S = P(\theta_1, \theta_2) - P(\theta_1, \theta'_2) + P(\theta'_1, \theta'_2) + P(\theta'_1, \theta_2) - P(\theta'_1, -) - P(-, \theta_2) \leq 0 \quad (7)$$

Donde $P(\theta'_1, -)$ y $P(-, \theta_2)$ son las probabilidades correspondientes al retirar el polarizador correspondiente a uno de los fotones.

4. Metodología propuesta

4.1. Montaje Experimental.

Para realizar el experimento, se usó el montaje mostrado en la figura 2. Se generan los pares de fotones con dos cristales BBO perpendiculares entre sí, se ubican los correspondientes detectores para maximizar el conteo. Posteriormente, se coloca el PBS en uno de los haces para medir el estado entrelazado.



b)

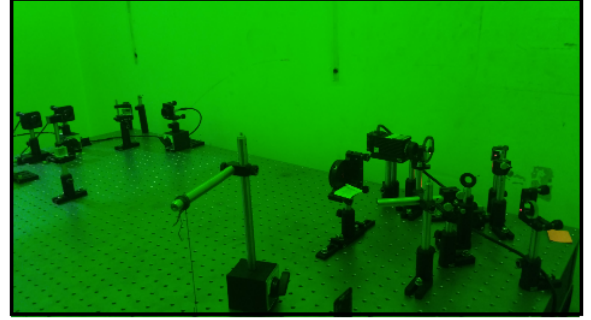


Figura 2: a) Esquema de montaje experimental realizado. b) Foto del montaje utilizando los cristales BBO.

4.2. Ajuste y Alineación.

Se realiza un ajuste al montaje experimental de la figura 2 para mejorar el conteo de fotones de los detectores A y B, así como el conteo de coincidencias. Para lo anterior se busca alinear correctamente los implementos ópticos de tal manera que se logre un conteo de alrededor de 700 coincidencias. Ya que se está considerando un sistema co-lineal, los pares de fotones emergen en la misma dirección del haz que atraviesa el cristal y por lo tanto, debe utilizarse un filtro. Se emplea la referencia del cristal BBO de la fig. 3 orientado ortogonalmente.



Figura 3: Referencia cristal BBO empleado.

Al ser un proceso de SPDC tipo I, los fotones tienen

polarización paralela entre sí. luego de mejorar el conteo de fotones, se procedió a realizar la medición de uno de los haces por medio de un divisor de haz polarizador (PBS122) fig. 4.



Figura 4: Referencia polarizador PBS empleado.

El estado descrito es, justamente, el par de fotones generados antes de una posible detección. Se tiene entonces la parte del montaje que corresponde al estado inicial Ψ_0 y el montaje correspondiente el estado Ψ_1 asociado a la polarización, ajustado en el montaje de acuerdo a la siguiente imagen:

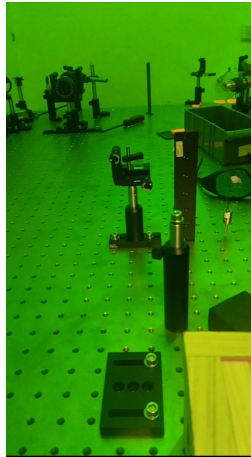


Figura 5: Montaje ajustado con polarizador PBS.

4.3. Secuencia metodológica.

En este orden de ideas, los siguientes pasos a seguir serían los siguientes:

1. Establecer un estado de polarización utilizando una placa de media onda 1
2. Generar un par de fotones usando dos cristales BBO tipo 1 perpendiculares entre sí y obtener un estado descrito por 2.
3. Verificar un máximo de coincidencias, utilizando una ventana de coincidencias de $5ns$ y un *sampling time* de $5s$ en la configuración de los detectores y variando el ángulo del par de cristales cada 5° .

4. Establecer la base de medición mediante el uso de un PBS en el brazo .
5. Verificar coincidencias de los pares de fotones y variar el ángulo del PBS cada 10° que está después de los cristales y así obtener una gráfica de coincidencias en función del ángulo en radianes.

Con el ánimo de dar aún más detalle de los pasos a realizar en la medición en la correlación de entre fotones, para la generación de pares entrelazados en polarización para un procesos SPDC de Tipo I

■ Paso 1: Fuente Láser

Se utiliza una fuente láser de alta frecuencia como fotón de bombeo para iniciar el proceso de SPDC tipo I, en nuestro caso, se utilizó un láser con una longitud de onda de $405nm$ a una potencia de $40W$. El estado del fotón de bombeo es un solo fotón con polarización horizontal o vertical, dependiendo de la configuración inicial.

- Paso 2: Placa de Onda Semirrígida (HWP) La Placa de Onda Semirrígida (HWP) está inicialmente alineada a 0 grados, lo que significa que su eje rápido está en la dirección horizontal. El estado del fotón después de pasar por la HWP sigue siendo un solo fotón con polarización Diagonal con una fase, la cual se elimina con el sampling time.

- Paso 3: Cristales no Lineales BBO Se colocan los dos cristales no lineales BBO en el camino óptico. En estos cristales ocurre el proceso de SPDC de Tipo I, en donde se generan el par de fotones entrelazados. Al pasar por el primer BBO, se genera un par de fotones con polarización H. Luego, se ubica un segundo cristal BBO el cual está rotado 90 grados respecto al primero y produce un par de fotones con polarización V, formando un estado entrelazado H/V. (ver ecuación 2).

■ Paso 4: Detectores de Fotones

Al final del montaje óptico, se colocan dos detectores A, B, uno en cada brazo de los haces de fotones individuales generados por el proceso SPDC tipo I. Para ello, se configuran los detectores como ya se mencionó en el paso 3 de la *secuencia metodológica*.

- Paso 5: Implementación del PBS Se cambia la polarización y escogiendo una componente colocando el PBS. Posteriormente se contabilizan las coincidencias en función del ángulo.

■ Paso 6: Análisis de Resultados

Luego de completar la adquisición de datos, se procede a analizar los resultados obtenidos. Se verifica la generación exitosa de fotones entrelazados con polarización idéntica mediante SPDC de Tipo I y se evalúan las coincidencias en los estados H/H o V/V, según la configuración inicial.

5. Desarrollo Teórico

La principal dificultad en los experimentos que utilizan fotones de SPDC radica en seleccionar pares de fotones convertidos y distinguirlos del ruido de fondo debido a coincidencias accidentales. Dado que la eficiencia de conversión es baja, es esencial prelinear los detectores y los componentes ópticos con precisión. Se deben calcular los parámetros de dirección de salida de los fotones en función de su longitud de onda, así como la dirección del eje óptico del cristal y su espesor [6].

En particular, para SPDC de Tipo I, las condiciones de coincidencia de fase aseguran que los dos fotones generados tengan la misma polarización y se propaguen en direcciones específicas. Aquí hay algunas consideraciones importantes sobre las condiciones de coincidencia de fase en SPDC de Tipo I en el contexto del proyecto en desarrollo: [7]

- Coherencia Espacial: Para que las condiciones de coincidencia de fase se cumplan, es esencial que los dos fotones generados en el proceso SPDC tengan coherencia espacial. Esto significa que los fotones deben compartir la misma dirección de propagación y estar en el mismo modo espacial. La falta de coherencia espacial puede llevar a una reducción significativa en la eficiencia de generación de pares de fotones entrelazados.

- Conservación de Energía y Momento: Las condiciones de coincidencia de fase aseguran que la conservación de la energía y el momento se cumpla en el proceso de SPDC de Tipo I. En este tipo de SPDC, la energía del fotón de bombeo se divide en dos fotones idénticos con la misma frecuencia, pero polarización ortogonal. Esta conservación se logra mediante la configuración adecuada de los componentes ópticos, como el cristal no lineal BBO y las placas de onda [3].

- Compensación de Desfases: En algunos casos, es necesario compensar los desfases inherentes a los componentes ópticos, como el BBO, para asegurar que las condiciones de coincidencia de fase se cumplan de manera óptima. Esto se logra ajustando la orientación y la temperatura del BBO u otros métodos de compensación de fase.

- Alineación de Componentes: La alineación precisa de los componentes ópticos, como las placas de onda (HWP y QWP) y el BBO, es fundamental para cumplir con las condiciones de coincidencia de fase. Los ángulos de orientación de estas placas deben configurarse correctamente para garantizar la generación eficiente de fotones entrelazados.

6. Resultados Esperados

Después de realizar el procedimiento mencionado anteriormente, se espera obtener la siguiente gráfica [2] de coincidencias en función del ángulo, en donde para cada medición se espera un tiempo de $\tau = 15(s)$ y rotando cada 22.5° .

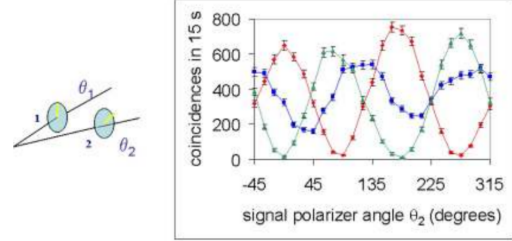


Figura 6: Medición de las correlaciones de pares de fotones. En la gráfica, los datos en verde $\theta_1 = \pi/4$, en rojo $\theta_1 = 0$ y en azul $\theta_1 = \pi/2$

7. Resultados

7.1. Obtención de pares de fotones

Para obtener el número máximo de coincidencias se utilizó una ventana de coincidencias de $5ns$ y un *sampling time* de $5s$. El ángulo del BBO se va variando cada 5° empezando en 0° y se toman 5 datos por cada uno, tal como se observa en la figura 7.

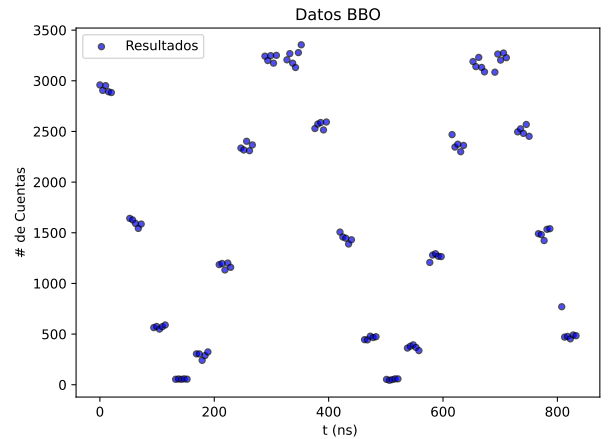


Figura 7: Resultados experimental BBO con una ventana de coincidencias de $5ns$ y un *sampling time* de $5s$, variando el ángulo cada 5° .

A partir de este montaje, se evidencia la búsqueda de un número máximo de coincidencias, correspondiente a un ángulo de 35° , en donde se obtuvieron alrededor de (650 ± 32) coincidencias. Como se utilizó un *sampling time* de $5s$ se obtiene la gráfica mostrada en la figura 8.

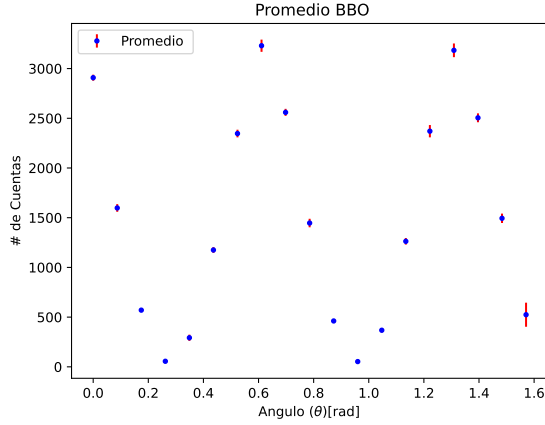


Figura 8: promedio de los datos obtenidos por cada ángulo.

7.2. Medición Estado Entrelazado

Identificado el máximo de coincidencias en función del ángulo, se procedió a realizar la medición de coincidencias usando un PBS en el brazo correspondiente al detector del brazo A. y variando el ángulo obteniendo los resultados de la figura 9

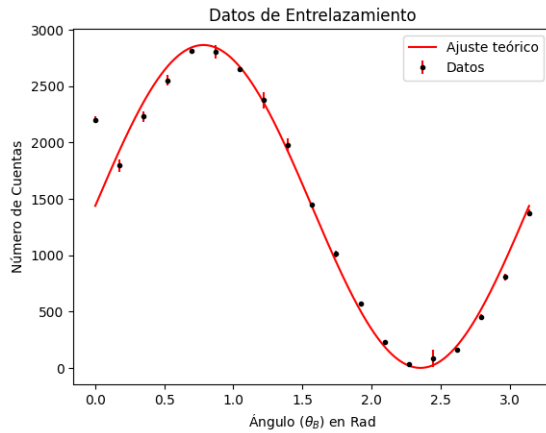


Figura 9: Medición estado de Bell, correspondiente a ángulos entre 0-180 PBS

[10]

una vez identificado el resultado se usó la ecuación correspondiente a la probabilidad conjunta 6, donde se verificó que bajo esta configuración los datos se ajustan a la siguiente función.

$$A(1/4)(1 + 2\sin(x + t)\cos(x + t)) \quad (8)$$

En donde $A = (5,7 \pm 0,2) \cdot 10^3$ y $t = (1,7 \pm 2) \cdot 10^{-3}$. Al comparar la ecuación de la función de ajuste obtenida con la función de probabilidad descrita en la ecuación

6, se observa que ambas tienen la misma forma funcional. En donde la ecuación 8 se obtiene multiplicando la ecuación 6 por A . Además, el valor teórico de t es 0, por lo que se encuentra dentro del rango determinado por la incertidumbre del resultado experimental y este valor es bastante pequeño por lo que se obtiene la función esperada.

Así mismo se observa de la ecuación 7 se observa la necesidad de un segundo PBS con el fin de obtener una segunda medición así determinar la violación de la desigualdad de Bell.

8. Conclusiones.

1. Para trabajar con mediciones tan precisas de entrelazamiento de fotones, se deben garantizar óptimas condiciones del láser de alineación y calibración de los detectores, optimizando el montaje experimental para obtener el máximo conteo en cada detector y en sus coincidencias.
2. Al girar el par de cristales BB0 cada 5° , se obtuvieron un máximo de coincidencias de (650 ± 32) a aproximadamente cada 35° .
3. Los resultados experimentales obtenidos muestran parcialmente los resultados esperados. Sin embargo, la función del número de coincidencias vs el ángulo del PBS se ajusta a una función periódica (ver ecuación: 8), como fue lo esperado. De manera que, el experimento sirvió como punto de partida para tratar otros montajes relacionados con el entrelazamiento cuántico y la verificación de las desigualdades de Bell.
4. Se evidencia que el montaje constituye una primera aproximación al experimento de entrelazamiento. Donde la ausencia de un segundo PBS impide la realización de una segunda medición complementaria necesaria para detectar una desigualdad de Bell.

Referencias

- [1] Zhang, C. et al. (2021) ‘Spontaneous parametric down-conversion sources for multiphoton experiments’, *Advanced Quantum Technologies*, 4(5), pp. 7–8. doi:10.1002/qute.202000132. 2
- [2] Galvez, Enrique J. *Correlated-Photon Experiments Laboratory Manual*. Colgate University (2008). 6
- [3] Ibarra, Z. (2017) TESIS. <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/210/1/16640.pdf>. 6
- [4] Bell, J.S. (1964) ‘On the einstein podolsky rosen paradox’, *Physics Physique*, 1(3), pp. 195–200. doi:10.1103/physicsphysiquefizika.1.195. 4

- [5] Ou, Z.Y. and Mandel, L. (1988) 'Violation of Bell's inequality and classical probability in a two-photon correlation experiment', *Physical Review Letters*, 61(1), pp. 50–53. doi:10.1103/physrevlett.61.50.
- [6] O. Kuzucu, M. Fiorentino, M.A. Albota, F.N.C. Wong, and F.X. Kärtner, 'Two-photon coincident-frequency entanglement via extended phase matching' *Physical Review Letters*, vol. 94, no. 8, p. 083601, 2005. Published by APS. 6
- [7] S. Slussarenko and G.J. Pryde, 'Photonic quantum information processing: A concise review', *Applied Physics Reviews*, vol. 6, no. 4, 2019, Published by AIP Publishing. 6
- [8] J.-W. Pan, Z.-B. Chen, C.-Y. Lu, H. Weinfurter, A. Zeilinger, and M. Żukowski, 'Multiphoton entanglement and interferometry', *Reviews of Modern Physics*, vol. 84, no. 2, p. 777, 2012, Published by APS.
- [9] P.G. Kwiat, K. Mattle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, A.V. Sergienko, and Y. Shih, "New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs", *Physical Review Letters*, vol. 75, no. 24, p. 4337, 1995, Published by APS.
- [10] Resultados Experimentales. Repositorio en línea. Disponible en: <https://github.com/jgsuarezc/Entrelazamiento> 7