

Interferómetro de Hong-Ou-Mandel Fase I

David Pardo 200812952

Miguel Ángel Vargas 200713092

Se busca construir el interferómetro de Hong-Ou-Mandel como una etapa más en el desarrollo del Laboratorio de Óptica Cuántica en la Universidad de los Andes. Este experimento aportaría claros indicios de la obtención de fotones enredados, sin ser una prueba concluyente. En esta fase se realizó todo el montaje y se tomaron los datos iniciales de conteos de fotones, con el fin de comprobar la existencia de coincidencias provenientes de enredamiento.

El interferómetro de Hong-Ou-Mandel se basa en el análisis de las interferencias de dos fotones indistinguibles, es decir, cuyas propiedades físicas son totalmente iguales para el observador, que llegan a un Beam-Splitter (BS) 50-50. Sean $|a\rangle$ y $|b\rangle$ los momentos iniciales de dos fotones indistinguibles respecto a todas sus propiedades excepto el momento (dirección). Los dos momentos finales posibles para cada fotón son $|c\rangle$ y $|d\rangle$ como se ve en la Figura 1. El BS se representa mediante un operador R , que en el caso 50-50 está dado por:

$$R = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}$$

El estado inicial del sistema será $|in\rangle = |1_a 1_b\rangle$, lo cual significa que se tiene un fotón con estado $|a\rangle$ y otro con estado $|b\rangle$. *A priori* los posibles estados finales para el sistema son $|out\rangle = |1_c 1_d\rangle$, $|out\rangle = |2_c 0_d\rangle$, $|out\rangle = |1_c 1_d\rangle$ y $|out\rangle = |0_c 2_d\rangle$; dependiendo esto del efecto del BS en los fotones, i.e. si cada fotón es reflejado o transmitido. Para realizar el análisis matemático se tiene en cuenta que habrá un operador R por cada fotón; además se hará uso de los operadores de creación \hat{a}^\dagger , \hat{b}^\dagger , \hat{c}^\dagger y \hat{d}^\dagger .

$$|out\rangle = R_a R_b |in\rangle = R_a R_b |1_a 1_b\rangle = R_a R_b \hat{a}^\dagger \hat{b}^\dagger |0_a 0_b\rangle$$

$$R_a \hat{a}^\dagger = (\hat{c}^\dagger - i\hat{d}^\dagger)/\sqrt{2} \quad (1)$$

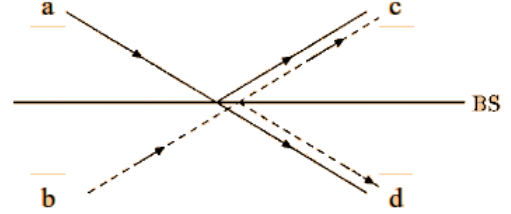
$$R_b \hat{b}^\dagger = (\hat{d}^\dagger - i\hat{c}^\dagger)/\sqrt{2} \quad (2)$$

Usando 1 y 2 se obtiene:

$$|out\rangle = \frac{\hat{c}^\dagger \hat{d}^\dagger - i\hat{c}^{\dagger 2} - i\hat{d}^{\dagger 2} - \hat{d}^\dagger \hat{c}^\dagger}{2} |0_c 0_d\rangle$$

Teniendo en cuenta la conmutatividad de los operadores de creación se llega finalmente a:

FIG. 1. Efecto del BS en los fotones incidentes.



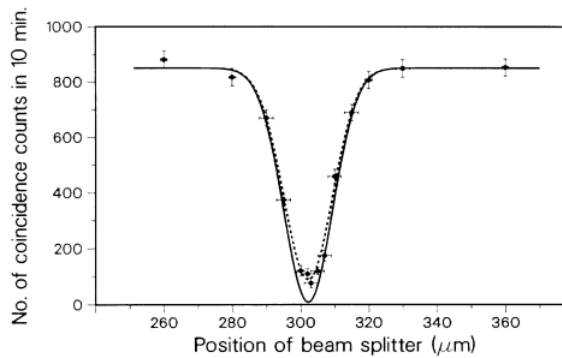
$$|out\rangle = -\frac{i}{2} (|2_c 0_d\rangle + |0_c 2_d\rangle) \quad (3)$$

Este resultado muestra que los fotones interfieren de tal forma que nunca se dirigen en direcciones opuestas tras atravesar el BS. En caso de que los fotones sean distinguibles respecto a otra propiedad distinta al momento, su estado será descrito por un producto tensorial de vectores pertenecientes a espacios de Hilbert diferentes, por lo que las el desarrollo matemático arriba presentado no será válido, perdiéndose así la interferencia característica de este experimento.

Aprovechando esto es posible comprobar experimentalmente el fenómeno. Ubicando detectores independientes en los dos caminos de salida posibles no se obtendrán mediciones al mismo tiempo (coincidencias) cuando los fotones sean totalmente indistinguibles, debido a la propiedad del interferómetro. Por otro lado, si se varía gradualmente una propiedad de un fotón dejando al otro intacto, se perderá la indistinguibilidad, aumentando de esta manera el número de coincidencias. Por ejemplo, si para un fotón se aumenta la distancia de recorrido, éste será distinguible por tiempo, pues llegará al BS más tarde que el otro; de este modo, se puede construir una gráfica de el número de coincidencias en función de la diferencia de distancia de los caminos, comprobándose el fenómeno si se obtiene una caída (Dip) cuando los recorridos son exactamente iguales, como se muestra en la Figura 2.

La característica esencial del Hong-Ou-Mandel es puramente cuántica, pues clásicamente las probabilidades

FIG. 2. HOM dip obtenido por Hong-Ou-Mandel en su artículo original [Hendrych,2007]^a

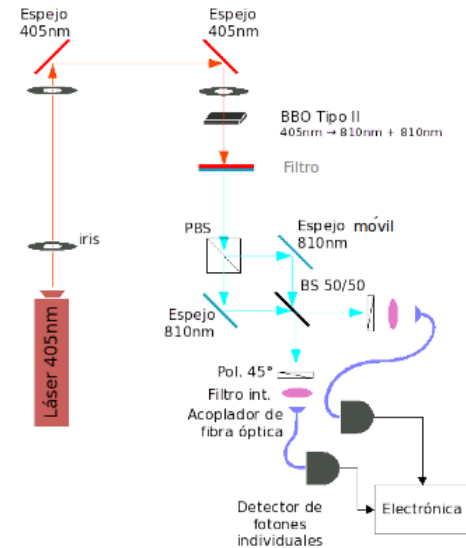


^a Obtener la gráfica del dip es el objetivo final del experimento. Precisamente la Fase II consiste en obtener esta gráfica a partir de los fotones obtenidos en la Fase actual variando uno de los caminos del interferómetro.

para cada uno de los cuatro casos son equivalentes. Sin embargo se observa que el interferómetro no tiene relación alguna con fotones enredados; el que a través de este se obtengan indicios de enredamiento se debe a la forma en que se generan los fotones indistinguibles que se usan en el experimento.

Para llevar a cabo esto se utiliza un cristal no lineal Borato de bario β (BBO) debido a que para un corte determinado de este se presenta el fenómeno de spontaneous parametric down-conversion, SPDC, por el cual el cristal no lineal transforma los fotones incidentes en parejas de fotones ortogonalmente polarizados entre sí, con menor energía, conservando de manera simultánea tanto energía como momento del fotón original. En resumen, por conservación de energía la suma de los inversos de las longitudes de onda de los fotones producidos debe ser igual a la del foton incidente, i.e. $\lambda = 405nm$; de las parejas posibles se desean obtener aquellas en las que ambos fotones tienen la misma longitud de onda ($\lambda = 810nm$), con el fin de que sean indistinguibles. Además, por conservación de momento los fotones producen dos aros, cuyo radio depende de la velocidad de sus fotones. Los fotones enredados serán aquellos que se encuentran en la intersección de ambos aros cuando esta consiste en un único punto, pues allí no se pueden distinguir por polarización. Debido a que el BBO es birrefringente, es decir, que fotones de diferente polarización ven dentro del material índices de refracción distintos, se debe hacer una compensación a lo largo del montaje, pues un fotón saldrá antes que el otro del cristal, haciéndose distinguible [Greenberger,1993].

FIG. 3. Montaje para el desarrollo del HOM



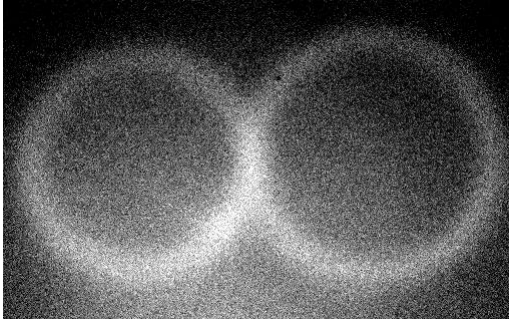
MONTAJE EXPERIMENTAL

Se emite un haz que parte de una fuente láser ajustada a una potencia óptima de $P = 29.8mW$ y cuya longitud de onda específica es de $\lambda = 405nm$, lo cual correspondería a un color azul/violeta en el espectro electromagnético. Luego, la trayectoria del haz es controlada a través de una serie de iris y espejos, lo cual se realiza con el propósito principal de garantizar el camino que éste seguirá y el lugar en donde incidirá. Una vez el rayo atraviesa el cristal no lineal BBO, se produce el SPDC tipo 2, los pares de fotones son generados y terminan, gracias a las propiedades del cristal, enredados en un dominio de frecuencias.

Ubicado después del cristal, se coloca un filtro para longitudes de onda específico de $\lambda = 810nm$ con la finalidad de restringir el rango de fotones que se desean medir, ya que la única condición que sigue al cristal una vez genera los fotones, es satisfacer la conservación de momento y energía.

Siguiendo la ruta establecida por el montaje, las parejas de fotones generados viajan en dirección de un BS de polarización (PBS), que se encargará de clasificar o de categorizar a cada uno de los fotones a partir de su polarización. Como resultado de este proceso, los fotones con una polarización dada son transmitidos y los que tienen polarización ortogonal a esta son reflejados; lo cual define así 2 ramas o trayectos iniciales. En la rama en la cual los fotones se transmiten, se ubicó un espejo móvil con el propósito de controlar el camino, y por ende, el retraso entre las parejas de fotones. Estos serán reflejados y se dirigirán hacia un segundo BS. Por otra parte, en la rama en la cual estos son reflejados, se utiliza un iris y subsecuentemente un espejo que dirija de

FIG. 4. Radiación generada por SPDC $\lambda = 405nm$. BBO tipo II. Enredamiento caso colineal



la misma manera los fotones en dirección a un segundo BS.

Con el propósito de implementar el Hong-Ou-Mandel (HOM), y generar de manera controlada el fenómeno de interferencia, se utiliza un segundo BS que es no polarizador 50/50, el cual separa los fotones que inciden sobre este. Antes de la detección es necesario hacer indistinguibles a los fotones, lo cual se puede asegurar haciendo coincidir tanto el tiempo de retraso mediante el espejo móvil, como la energía de los fotones por medio de los filtros y por medio de las propiedades del cristal BBO, las cuales aseguran la conservación de energía. La última variable que garantizará la indistinguibilidad será la polarización, la cual se controlará mediante el uso de polarizadores con orientación de 45° que se ubicarán en la trayectoria que seguirán los fotones después de ser transmitidos o reflejados por el BS 50/50.

Una vez se han asegurado las condiciones del interferómetro de HOM, la trayectoria de las señales se define tal que, a través de acopladores de fibra óptica, se pueda reconocer la señal de los fotones incidentes por medio de detectores de silicio que funcionan a partir de detección de señales por medio de fotodiodos de avalancha. La señal de estos detectores es traducida por una tarjeta reprogramable FPGA para adquisición de datos, mediante un software previamente diseñado y por último estos datos son visualizados a través de una interfaz desarrollada para medir la cantidad de conteos detectados por canal y el número de coincidencias.

Para asegurar que la trayectoria definida se encontraba alineada a medida de que modificaba el montaje inicial, se utilizó un láser infrarrojo de prueba, de frecuencia de $\lambda = 810nm$, con el cual se revisaba constantemente la alineación del sistema. Por otra parte, para asegurar que se tenían fotones enredados generados por medio del cristal no lineal, se utilizó una cámara CCD que permitió definir la posición óptima de ubicación del cristal, como se puede observar en la Figura 4.

Inicialmente, se utilizó entre el cristal y el BSP un prisma

con el propósito de separar las longitudes de onda de interés y de esta manera atenuar las posibles fuentes de ruido presentes en la detección.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

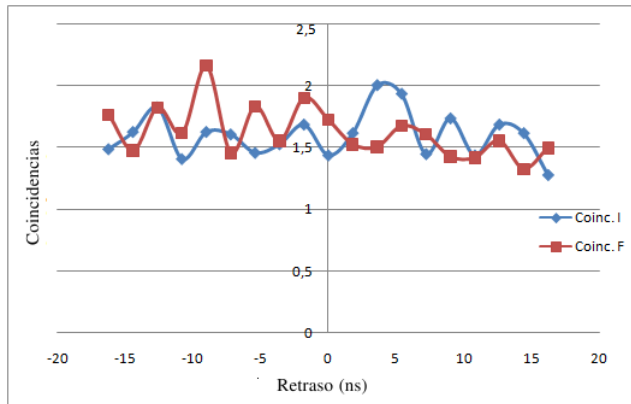
Tras realizar todo el proceso de montaje y alineación, se tomaron los primeros datos de conteos y coincidencias, con el fin de optimizar los resultados y así tener una estadística considerable para el inicio de la Fase II. El número de coincidencias a alcanzar estaba alrededor de 400, que era la referencia establecida por el montaje anterior al interferómetro, en el que se contaban coincidencias tras la incidencia del haz en un único BS. Se tuvo en cuenta dos tomas de datos de días diferentes, después de haber alcanzado la alineación óptima en cada caso. Los promedios de coincidencias para diferentes valores de retrasos en la electrónica de cada detector se encuentran en la Tabla I; cada número corresponde al promedio de 100 datos para el mismo retraso. La gráfica 5 muestra estos datos, tomándose los retrasos como negativos para uno de los detectores.

Tabla I. Número de coincidencias obtenidas para diferentes retrasos temporales en el circuito (dos tomas de datos)

| Retraso canal 1(ns) | Retraso canal 2(ns) | Coincidencias I | Coincidencias II |
|---------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| 1.8 | 1.8 | 1.44 | 1.72 |
| 3.6 | 1.8 | 1.61 | 1.52 |
| 5.4 | 1.8 | 2.00 | 1.50 |
| 7.2 | 1.8 | 1.93 | 1.67 |
| 9.0 | 1.8 | 1.45 | 1.60 |
| 10.8 | 1.8 | 1.73 | 1.43 |
| 12.6 | 1.8 | 1.44 | 1.42 |
| 14.4 | 1.8 | 1.68 | 1.41 |
| 16.2 | 1.8 | 1.61 | 1.55 |
| 18 | 1.8 | 1.27 | 1.33 |
| 1.8 | 3.6 | 1.68 | 1.50 |
| 1.8 | 5.4 | 1.52 | 1.90 |
| 1.8 | 7.2 | 1.46 | 1.55 |
| 1.8 | 9.0 | 1.60 | 1.83 |
| 1.8 | 10.8 | 1.62 | 1.46 |
| 1.8 | 12.6 | 1.40 | 2.16 |
| 1.8 | 14.4 | 1.82 | 1.61 |
| 1.8 | 16.2 | 1.62 | 1.82 |
| 1.8 | 18 | 1.49 | 1.48 |
| Promedio | | 1.60 | 1.76 |

Se esperaba obtener un máximo para cierto retraso, dado que si las coincidencias provienen efectivamente de los fotones generados en el cristal, habrá un punto para el cual estos serán detectados al mismo tiempo y por ende se medirán coincidencias no aleatorias. Dicho retraso óptimo se verá como un pico en estas gráficas. El hecho

FIG. 5. Número de coincidencias en función del retraso introducido en cada uno de los canales



de que para todos los retrasos se tenga un número de coincidencias similar, implica que éstas se deben a ruido proveniente de otras fuentes de luz, como LED's presentes en el laboratorio o filtraciones en la puerta de entrada. Este problema indica que muy probablemente no se tenga ninguna coincidencia debida a enredamiento, hipótesis que se refuerza si se tiene en cuenta que tras todo el proceso de optimización las coincidencias permanecieron en valores muy cercanos a los originales. Claramente para los los datos que provienen exclusivamente de ruido, toda variable que sea modificada en los acopladores de fibra óptica no tendrá ninguna relevancia, como efectivamente sucedió. Más aun, es evidente que el número de coincidencias, aunque no fueran ruido de fondo, están muy lejos de la referencia anteriormente establecida, es decir 400.

Estos resultados muestran que antes de entrar de lleno a la Fase II se deben corregir problemas con la alineación, principalmente asegurar que los fotones enredados tomen la misma dirección del láser de prueba con el que se realizan todos los procesos de montaje. Para esto se debe usar la cámara CCD, o montar más acopladores a lo largo de la ruta, lo cual a pesar de ser demorado, es, como se ve a partir de lo realizado, un paso necesario para asegurar la presencia de fotones enredados en el interferómetro. Así, aunque se construyó todo el montaje, no fue posible obtener indicios de los fotones enredados, lo cual es el requisito esencial para continuar con la Fase II.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

- No se han detectado coincidencias provenientes de fotones enredados, como lo revelan los datos obtenidos para diferentes retardos temporales producidos electrónicamente. Esto parece deberse a problemas con la alineación del montaje, principalmente del cristal en el que se producen dichos fotones.

- Se debe obtener evidencia de coincidencias debidas a fotones enredados antes de pasar a la siguiente fase, pues estos son la fuente básica de la información requerida para llegar al dip.
- Para la fase II se debe revisar constantemente cada parte del montaje, pues se evidenció que este es muy susceptible a cambios y requiere altísima precisión de alineación para la adquisición de datos útiles.

BIBLIOGRAFÍA

-
- [Hong,1987] Hong C K, Ou Z Y and Mandel L 1987 Phys. Rev. Lett. 59 2044, *Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference*
- [Hendrych,2007] M. Hendrych,* M. Mi uda, and J. P. Torres *Tunable control of the frequency correlations of entangled photons*
- [Zeilinger,1995] P.G. Kwiat, K. Mattle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, A.V. Sergienko, and Y. Shih, *New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs*, Phys. Rev. Lett. 75, 4337-4341, 1995
- [Greenberger,1993] 1. D.M. Greenberger, M.A. Horne, and A. Zeilinger, *Multiparticle interferometry and the superposition principle*, Physics Today 46. 8, 22-29. 1993