

INFORME FINAL: FUENTE DE UN FOTÓN ANUNCIADO

Valentina Abril Melgarejo
Asesor: David Guzmán

Noviembre 23 2010

Resumen

Se reporta el montaje exitoso de una fuente de fotones anunciados, la cual es susceptible a ser mejorada. Esta fuente se probó en experimento de doble rendija de un fotón, sin obtener los resultados buscados. El proceso de construcción de una fuente de fotones anunciados (a través de la producción de fotones correlacionados), significa una experiencia de reconocimiento experimental del fenómeno de birrefringencia y de las leyes de conservación de energía y momento. El proceso con el que se obtienen las parejas correlacionadas se conoce como conversión paramétrica espontánea (SPDC), fenómeno propio de varios tipos de cristal birrefringente. Este proceso se puede dar de dos tipos (tipo I y tipo II); en este caso se utilizó un cristal no lineal tipo I, el cual genera un aro de radiación formado por la acumulación de pares de fotones correlacionados. Mediante simulación se predice el comportamiento de la radiación obtenida del cristal. Con base en dichas predicciones se pueden alinear y calibrar los instrumentos para la detección de los fotones correlacionados. Visualizar el aro producido es el primer paso de reconocimiento y entendimiento del fenómeno. Esta etapa se realiza con un detector CCD el cual permite hacer un barrido de distancias y alinear el aro con respecto a un eje de referencia fijo en el laboratorio. Con la posición del aro bien establecida se logran ubicar dos detectores en lugares opuestos del aro, donde deben encontrarse los pares de fotones correlacionados. Esta es la etapa cumbre del experimento en la que encontrar las parejas correlacionadas es un reto. Se logró aumentar el porcentaje de detección, ya que en principio no se tenían coincidencias, así que se maximizó el número de detecciones y con esto aumentó el número de coincidencias, llegando finalmente a 500. Con el montaje actual es posible maximizar aún más la detección de estas parejas pues no se encontró el máximo que corresponde a ubicar los detectores en las zonas totalmente opuestas del aro. Finalmente se aplicó el experimento de doble rendija a la rama del fotón anunciado para observar el comportamiento cuántico del mismo, sin resultados concluyentes.

Introducción

Para la construcción de nuestra fuente de fotones anunciados se utilizó primero un haz incidente de 405nm como fuente de los fotones que se someten al proceso SPDC al ser refractados por un cristal especial: cristal BBO birrefringente no lineal tipo I. El láser que produce el haz incidente tiene una potencia máxima de 50mW. Se debe ser cuidadoso de fijarlo siempre a la misma potencia pues la longitud de onda de la radiación producida varía levemente con la potencia. Nuestro montaje fue elegido entre varios modelos que existen para producir fotones anunciados con la finalidad de cumplir con la producción de un único aro de radiación con una longitud de onda determinada [1]. Para el reconocimiento de parejas correlacionadas básicamente se usaron dos detectores: uno para cada una de las ramas del aro de radiación producido. Los fotones del aro estarán correlacionados por lados opuestos del mismo, ubicar estos puntos opuestos de manera precisa es la misión más relevante en el

proceso de maximizar la detección de estas parejas correlacionadas.

Con respecto a las bases teóricas que se debieron explorar, se tuvieron en cuenta varios aspectos: la polarización de fotones correlacionados, (que tienen polarización ortogonal a la del rayo incidente), teorías de interferencia y birrefringencia (especialmente la producida por cristales BBO tipo I y tipo II). Llevar a la práctica estos conceptos fue muy interesante y retador, por ejemplo para la etapa de detección se utilizaron fibras ópticas y detectores electrónicos conectados a otro dispositivo electrónico especial (tarjeta FPGA programable). Este dispositivo se encontraba programado especialmente para la detección de las parejas correlacionadas y aunque los detectores eran muy sensibles encontrar los puntos exactamente opuestos del aro no fue un proceso directo de simples movimientos instrumentales, se debieron tener en cuenta las predicciones teóricas y una precisión en los movimientos bastante alta.

Como los detectores estaban a distintas distancias del cristal, el software utilizado para la lectura de detección permitió establecer el retardo (tiempo de diferencia en la llegada de los fotones a cada uno de los detectores), los conteos en cada detector y las coincidencias. Con estos parámetros se pudieron determinar el nivel de detección de fotones correlacionados obtenidos y la verificación del patrón de interferencia al ubicar una doble rendija en el camino del fotón anunciado. El proceso de detección de manera general consiste en lo siguiente: los detectores están diseñados para hacer conteos individuales transformando la señal de llegada del fotón a un pulso eléctrico que la tarjeta FPGA reconoce dentro de sus circuitos internos. Los fotones que hayan sido detectados al tiempo (es decir teniendo en cuenta el retraso, el programa determina cuáles fotones llegaron al tiempo en el caso en que los detectores estuvieran a la misma distancia del cristal), serán contados como coincidencias.

Posterior a la etapa de detección se realizó el experimento de doble rendija con la finalidad de observar el patrón de interferencia producido por los fotones cuando pasan a través de una de las rendijas e interfieren con ellos mismos. El porcentaje de coincidencias anteriormente logrado con este mismo montaje fue de 4 %, al final del proceso se logró 5 % de coincidencias sobre eventos individuales. En realidad no se pudo superar en gran proporción este porcentaje pero si fue suficiente para poder implementar el experimento de doble rendija, el cual se pudo montar maximizando aún más el nivel de coincidencias (aquí se logró 5 %, pues en al finalizar la etapa de detección se obtuvo 3 % de coincidencias). Con este experimento de doble rendija no se pudieron observar resultados que permitieran realizar un análisis de patrón de interferencia, pues aún el porcentaje de coincidencias es muy bajo para este efecto. Para el conteo de coincidencias también se tuvieron en cuenta las posibles coincidencias aleatorias en cada conteo que nunca fueron mayores a 1 o a 2, es decir la mayoría de las coincidencias se dieron por efectos del SPDC producido al hacer incidir la luz del láser por el cristal. A continuación se amplía la información de todos los aspectos y procesos involucrados en el estudio del proceso SPDC con un cristal BBO tipo I.

1. Marco teórico

1.1. Polarización de la luz

En el estudio de ondas electromagnéticas es muy importante el concepto de polarización, en nuestro caso es importante tener en cuenta este concepto aplicado a fotones, es decir la polarización desde una descripción cuántica, se puede entender entonces como la relación entre el comportamiento de la dirección del flujo de energía de la onda con la dirección del movimiento de sus oscilaciones, el haz de luz del láser es una onda transversal, es decir su oscilación es perpendicular a su dirección de propagación.

Aplicado conceptos de polarización se han desarrollado elementos conocidos como polarizadores, estos actúan como un tipo de filtro para la onda incidente permitiendo solo el paso de onda con la polarización deseada, en nuestro caso con polarización ortogonal a la de los fotones incidentes.

Otra de las funciones del polarizador fue la de filtrar otras fuentes de luz y sólo dejar pasar la luz del aro. En las últimas etapas del proceso fue tan útil el polarizador que en el montaje utilizábamos dos al tiempo (uno después del filtro y otro delante de la cámara como se describe en la sección de procedimiento experimental).

1.2. Interferometría

Es importante tratar un concepto con el que trabajamos en las últimas etapas del proyecto y es el uso de la interferometría para constatar la naturaleza dual del fotón, es decir lo que pretendemos con el montaje de experimentos con interferómetros es estudiar las características ondulatorias de los fotones producidos en el aro de radiación por el SPDC. Partimos entonces del hecho cuántico de que los fotones están caracterizados por una función de onda que denota la probabilidad de que se encuentre en determinada posición, este hecho nos permite predecir un comportamiento ondulatorio. Como sabemos las ondas tienen la capacidad de interferir con otras ondas y de esa interacción o superposición surge una nueva onda que tendría una amplitud resultante de la suma de las amplitudes de las ondas que se superponen. Esta suma de amplitudes depende de la fase de las ondas que interfieren: si tienen fase contraria (un máximo se encuentra con un mínimo) la onda se anulará (quedará con amplitud cero); si por el contrario interfieren en la misma fase coincidirán en ese punto y las amplitudes se sumarán. De la suma de amplitudes en diferentes fases surge un patrón de interferencia que es la onda

Ahora se tratará la interferometría que es una técnica que usa el patrón de interferencia creado por superposición de dos o más ondas para determinar sus características (longitud de onda, amplitud, fase, etc.). El instrumento con el que se hacen interferir los frentes de onda incidentes se conoce como interferómetro. La interferometría tiene múltiples aplicaciones en varios campos ya que es aplicable a cualquier tipo de radiación electromagnética.

El experimento de interferencia que se implementó en este proyecto fue el de doble rendija, en el cual una onda de luz incide sobre un obstáculo que consiste de una rendija doble separada una distancia d , cuando la onda atraviesa esta rendija, se generan 2 ondas coherentes que interfieren entre ellas y generan el patrón de interferencia que se observa en la Fig. 1. Cuando el experimento se realiza con fotones individuales se espera observar el mismo patrón de interferencia que se presenta cuando se realiza el experimento con una onda y por lo tanto demostrar que el fotón interfiere con el mismo y por lo tanto tiene una dualidad entre onda y partícula. Sin embargo observar el patrón no se hace de forma directa por dos razones: el aro a la distancia del orden de metros desde el cristal tiene una intensidad baja por dispersión y su longitud de onda está en el infrarrojo cercano por lo que se utilizaron unos detectores especiales bastante sensibles, (Ver 1.3).

1.3. Instrumentación

1. Láser: Utilizamos dos láser:

- **Láser principal Fig 2.:** Se usa como haz incidente en el cristal, tiene una longitud de onda central que se encuentra entre 405nm y 410 nm, el pico está aproximadamente en 408nm. Su potencia máxima es de 50mW, la potencia promedio utilizada en el proyecto fue de 29.7mW.

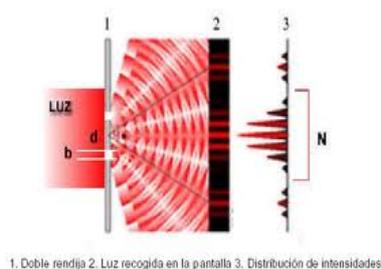


Figura 1: Patrón de interferencia experimento doble rendija. Tomado de: <http://t3.gstatic.com/images>

- **Láser secundario Fig. 2:** láser rojo que emite a 633nm, Este se utilizó en la alineación preeliminar de las fibras para la detección.



Figura 2: Láser principal, longitud de onda 405nm.

2. **Espejos:** Para darle la dirección correcta al láser y la altura adecuada para que incida de la forma necesaria en el cristal y genere el aro de fotones deseado se utilizan 2 espejos de alta reflexión que se observan en la Fig 3.

- **Espejo 1:**

Fabricante: EKSMA.

Material: BK7. Dimensiones: 25.6×6mm.

Banda de longitudes para las que es altamente reflectivo: 380-420 nm.

Ángulo de incidencia para el cual es porcentaje reflectivo es mayor: 45°

Porcentaje de reflexión máximo: 99.5 %.

- **Espejo 2:**

Fabricante: EKSMA

Material: BK7. Dimensiones: 25.6 ×6mm.

Banda de longitudes para las que es altamente reflectivo: 405 nm. Tiene alta calidad reflectiva sólo a esta longitud de onda.

Ángulo de incidencia para el cual es porcentaje reflectivo es mayor: 45°.

Porcentaje de reflectivo máximo: 99.5 %.

3. **Cristal:** Es un cristal no lineal BBO cortado para producir SPDC tipo I. Uniaxial, no lineal negativo que se observa en la Fig.4



Figura 3: Izquierda: Espejo 1. Derecha: Espejo 2

Diámetro: Tiene 1in.

Fabricante: CASIX.

Referencia: PN20553.

Ángulo del eje óptico: $\theta_{cristal} = 29,5^\circ$.

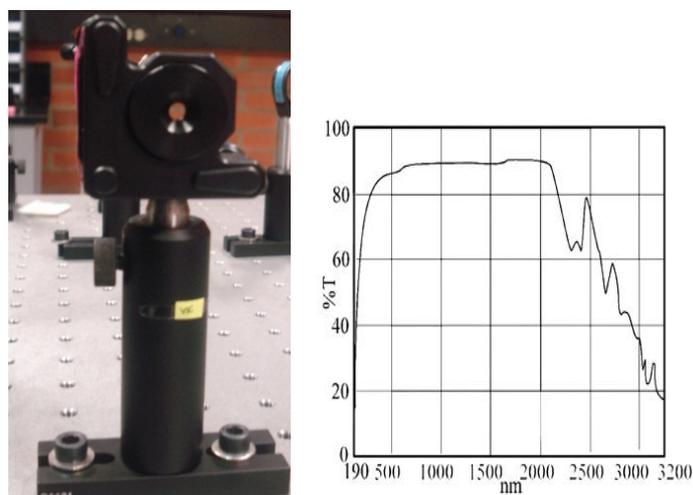


Figura 4: Izquierda: Cristal BBO tipo I. Derecha: Porcentaje de transmisión del cristal.

4. **Polarizadores:** Se utilizaron polarizadores de lámina (Fig 5), estos polarizadores no son de alta precisión pero fueron suficientes para realizar la calibración del montaje necesaria.
5. **Filtros:** Durante el montaje se usaron 2 filtros, unos para pruebas y toma de fotos ya que no bloqueaba toda la intensidad, filtro pasa-altas Fig.6, otro para la detección final de fotones, filtro pasabanda Fig.7.

- **Filtro pasa altas Fig.6:**



Figura 5: Polarizador usado para filtrar el aro de radiación.

Fabricante: THORLABS.

Referencia: FEL0750.

Región de transmisión 750nm - 2200nm.

Región de rechazo: 200nm - 720nm.

Dimensiones 5mm × 5mm × 1mm.



Figura 6: Izquierda: Filtro pasa-altas.

■ **Filtro pasabanda: Fig.7**

Fabricante: ANDOVERCORP.

Referencia: 810FS10-12.5.

Frecuencia central: 810nm±2nm.

Ancho de banda: 10nm±2nm.

Diámetro: 12,5 mm.

6. **Cámara CCD:** para revisar que si se esta generando el cono que en el plano de la cámara apa-

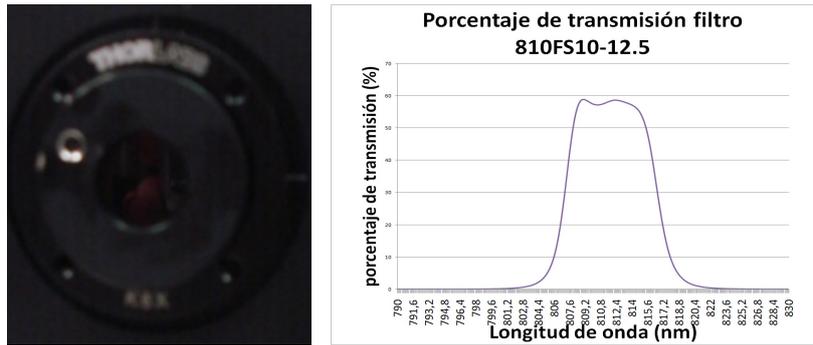


Figura 7: Izquierda: Filtro pasabanda. Derecha: Porcentaje de transmisión del filtro.

recerá como un círculo en la foto que se toma. Trabajamos con dos cámaras CCD de referencias ST 420 ME y ST 1603 ME. Fig. 8 .

■ **ST 405 ME** Fig.8:

Detector: KAF-01402MECCD

Dimensión del detector: 765×510 pixeles.

Eficiencia cuántica: 85 %

Velocidad de actualización: Hasta 2 imágenes por segundo en la pantalla del computador.

Software utilizado: CCDOPS Versión 5.

Sistema de refrigeración: No muy efectivo pues no llegaba a temperaturas bajo 0°C.

Tamaño pixeles: 9μm x 9 μm.

Tamaño: 5 x 4 x 1.8" (12.7x10.2x4.6 cm).

Tamaño del sensor CCD: 4.6mm x 6.9mm.

Peso: 20 oz. (0.6kg).

■ **ST 1603 ME** Fig.8:

Detector: KAF-1603MECCD

Dimensión del detector: 1530×1020 pixeles.

Eficiencia cuántica: 85 %

Velocidad de actualización: Actualiza una imagen cada 2 segundos en la pantalla del computador.

Software utilizado: CCDOPS Versión 5.

Sistema de refrigeración: Efectivo, normalmente trabajamos a -2°C.

Tamaño pixeles: 9μm x 9 μm.

Tamaño de la cámara: 5 x 4 x 1.8" (12.7x10.2x4.6 cm).

Peso: 20 oz. (0.6kg).

Tamaño del sensor CCD: 13.8 x 9.2 mm.

a) **Fibras**

Se usaron 2 fibras ópticas, cada una para detectar un fotón del par (anunciado y señal), Fig. 9.

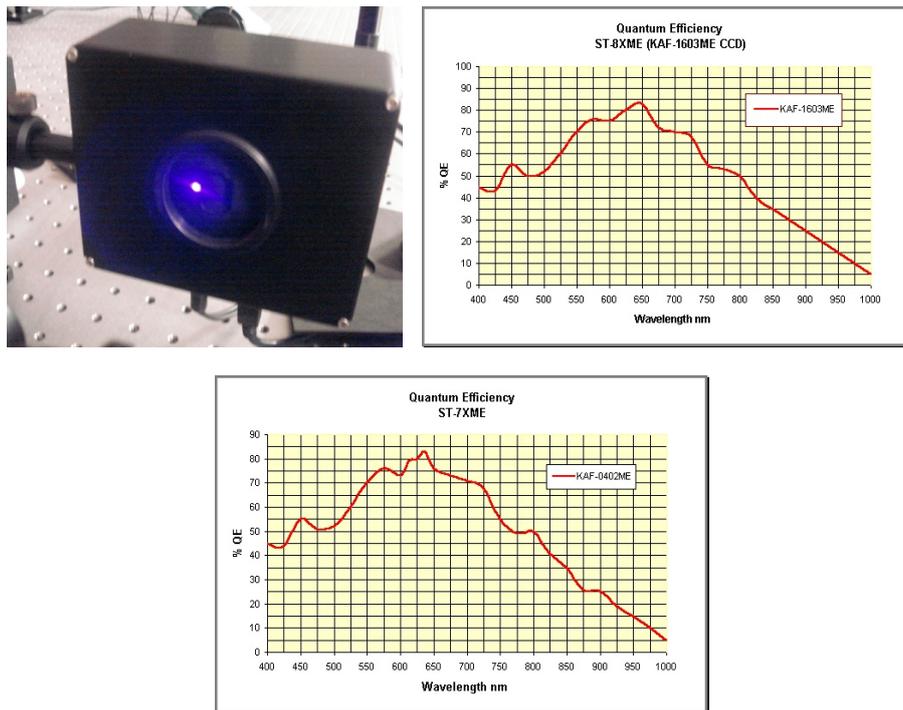


Figura 8: Izquierda: apariencia de las Cámaras CCD ST1603ME y ST402ME. Centro: Curva de transmisión para la cámara ST1603ME. Derecha: Curva de transmisión para la cámara ST402ME. Las curvas de transmisión fueron tomadas de [?]

Fabricante: THORLABS.
Referencia: M31L05.
Longitud: 5m.
Diámetro núcleo: 62.5 μm .
Conectores: FC/PC.
Atenuación: 2.7-3.2 dB/Km.
Apertura numérica: 0.275 ± 0.015



Figura 9: Acoples y fibras ópticas

b) FPGA

Dispositivo digital reprogramable Fig.10, tiene una velocidad de procesamiento de 48MHz que fueron mejorados por David Guzmán hasta 200Hz. El tiempo de retardo de 1.8ns. La frecuencia a la que funciona la FPGA es una de las principales características por la que se

escogió sobre otros dispositivos electrónicos digitales, esta frecuencia define los conteos por segundo que el detector podrá ver.

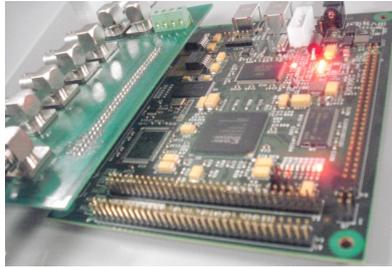


Figura 10: Tarjeta FPGA

c) **Detectores**

La fibra se conecta a estos detectores y cada fotón genera un pulso TTL de 2.5V, este pulso es la señal que llega a la FPGA y el cual indica que se detectó un fotón. Se utilizaron 2 detectores de la misma referencia pero diferente serie lo que genera ligeros cambios en las especificaciones. Fig.19.

Fabricante: Perkin Elmer Precisely.

Distribuidor: Pacer.

Referencia: SPCM-AQRH-13-FC. (Single Photon Counting Module)

Eficiencia: Mínima: 35 %, Máxima: 45 % a 830nm.

Serie: 17561 Cuentas oscuras: Max: 181/seg. Promedio: 134/seg.

Pulso TTL: Ancho: 15.74ns. Amplitud: 2.91V Flanco de subida: 1.67ns(Tiempo en el que sube del 10 % al 90 % de la amplitud máxima).

Serie: 17564 Cuentas oscuras: Max: 127/seg. Promedio: 93/seg.

Pulso TTL: Ancho: 15.8ns. Amplitud: 2.89V Flanco de subida: 1.48ns(Tiempo en el que sube del 10 % al 90 % de la amplitud máxima).



Figura 11: Detectores de alta sensibilidad.

d) **Lente Acople:** El acople de las fibras ópticas lleva un lente encargado de enfocar toda la luz incidente para que entre por la fibra. Este lente tiene una capa antireflectiva en el infrarrojo cercano. Fig.12.

Fabricante: Thorlabs.

Referencia: C220TME-B

Distancia focal: 11mm
Apertura numérica: 0.25.
Apertura: 5.50mm.

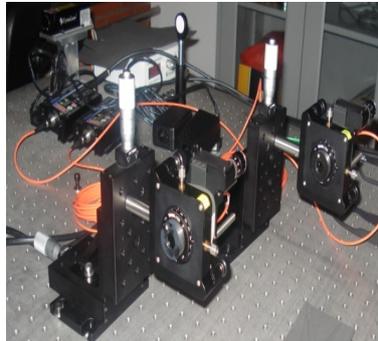


Figura 12: Lente del acople de la fibra óptica.

2. Procedimiento experimental

A continuación se describe en orden cronológico el proceso que se siguió durante el semestre para la construcción de la fuente de fotones anunciados.

2.1. Diseño y ensamble del montaje

El montaje final con el que se obtuvo la fuente de fotones anunciados fue producto de una serie de montajes que cambiaban según las necesidades y misines que se tenían, como se amplía a continuación.

3. Montajes iniciales

Como se ve en Fig.13 los primeros elementos que necesitábamos para producir que un rayo de luz coherente de 405 nm incidiera sobre uno cristal birrefringente se montaron de tal manera que los haces producidos después del cristal se dirigieran a lo largo de la mesa con la finalidad de maximizar el espacio para los montajes futuros. Un hecho de suma importancia es que el rayo incidente siempre debe estar a la misma altura a la que sale del laser, aún después de los múltiples procesos de reflexión y refracción que sufra, ya que el aro de radiación producido se intervendrá por medio de detectores que se deberán ubicar en puntos opuestos del aro donde se encuentran los fotones correlacionados, dichos puntos opuestos se encuentran sobre el mismo plano en ramas opuestas del mismo. La escogencia del plano paralelo a la mesa se hace así porque un plano paralelo al plano de la mesa es fácil de referenciar y además los fotones correlacionados se van a ubicar en la parte más ancha del aro cuando se corta con planos horizontales. La altura entonces estuvo fijada desde el comienzo en 11,6 cm. Como se ve en Fig. 13 el haz incidente es generado en el láser 1 de 405nm a una potencia de 29,6 mW, este haz es desviado por el primer espejo, el cual se encuentra a 45° de la dirección de incidencia, luego es desviado de nuevo también 45° con

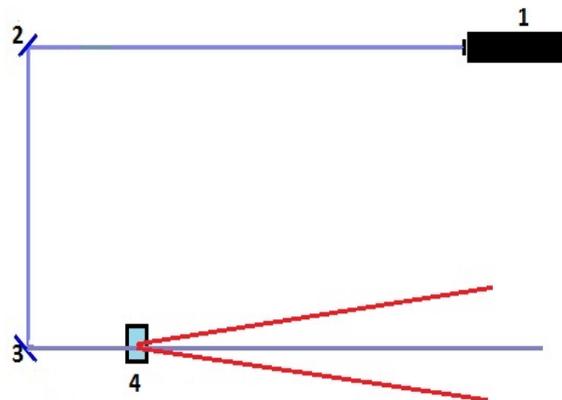


Figura 13: Montaje experimental esquemá. 1. Láser 405nm. 2. Espejo BK7, refleja 99.5 % a un ángulo de 45°. 3. Espejo dinámico. 4. Cristal BBO tipo I.

respecto a la dirección del haz de 2 a 3. Finalmente se dirige el haz hacia el cristal donde se presenta el proceso SPDC y por birrefringencia se produce el aro de radiación que en este caso tiene una λ de 810nm en todas las direcciones. Los elementos 1 y 2 en el montaje son elementos invariantes, permanecieron en la misma ubicación durante todo el proceso. Los elementos dinámicos fueron el espejo 3 y el cristal 4, cuyos movimientos permitieron la manipulación del aro de radiación.

Con el montaje anterior obtuvimos el aro de radiación pero se necesitaba su visualización

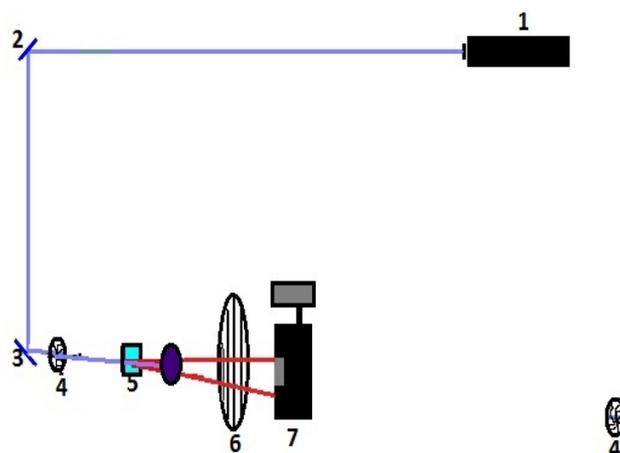


Figura 14: Izquierda: Montaje experimental esquemático. 1. Láser 405nm. 2. Espejo BK7, refleja 99.5 % a un ángulo de 45°. 3. Espejo dinámico. 4. Cristal BBO tipo I. 5. Filtro pasa altas. 6. Polarizador. 7. Cámara CCD. .

para poder estudiar su comportamiento a distintas distancias. Para la visualización inicial usamos una cámara CCD que es sensible a un rango amplio de longitudes de onda como se especificó en la sección ???. Con esta, pudimos observar el aro, pero para esto debimos añadir dos elementos más: un filtro pasaaltas y un polarizador, ver Fig 14. El filtro pasaaltas bloqueaba en gran medida al haz incidente (405nm), esto permitió visualizar el aro que era en general nítido pero se apreciaba mucho ruido de fondo. Sin embargo, se necesitaba una prueba de que en realidad este aro observado se debía al proceso SPDC y no a otra fuente de luz. Se recurrió al hecho de que la radiación producida por el proceso SPDC tiene una polarización ortogonal a la del rayo incidente. Se observó que la polarización del rayo incidente era vertical, entonces se debió usar un polarizador superpuesto a la cámara con dirección de polarización horizontal. Cuando se hizo esto el aro se vió mucho más nítido que cuando no se tenía el polarizador, ahora, cuando se giraba hacia posición vertical efectivamente se bloqueaba y no se obtenía ninguna imagen.

Finalmente los iris permitían marcar la trayectoria del haz incidente. Con dicha trayectoria marcada se podía tener seguridad sobre posibles accidentes con el montaje pues el haz se podía ubicar de nuevo en la trayectoria original sin complicaciones.

3.1. Alineación aro

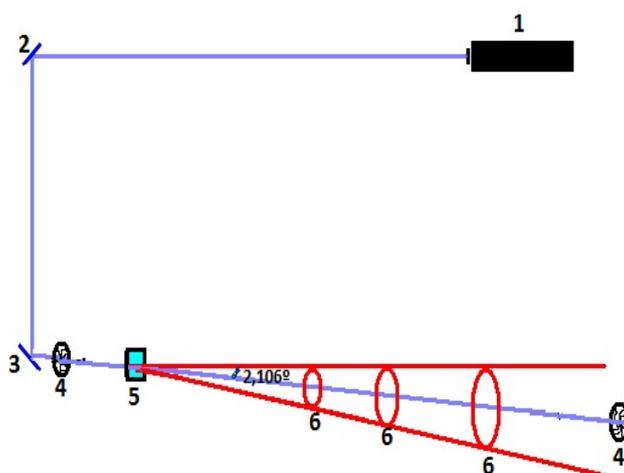


Figura 15: Izquierda: Montaje experimental esquemático. 1. Láser 405nm. 2. Espejo BK7, refleja 99.5 % a un ángulo de 45°. 3. Espejo dinámico. 4. Iris. 5. Cristal BBO I y filtro pasa-altas. 6. Polarizador. 7. Cámara CCD. .

Con el montaje de la Fig. 14 se hizo un barrido de distancias para observar que ocurría con el aro. A medida que el detector CCD se alejaba del cristal donde se originaba el aro de radiación ocurrían dos efectos: El aro se hacía más grande pero también la intensidad con la que se veía era menor. Se hicieron varios de estos barridos simplemente como observación del comportamiento del aro cuando se manipulaban los tornillos micrométricos del segundo espejo y del cristal. El objetivo de esta etapa es manipular la dirección de salida del aro de tal manera que una de las ramas quedara alineada de forma paralela al eje del largo de la

mesa como se muestra en la Fig. 15

En esta etapa no se podía simplemente seguir el barrido y correr el aro sin saber el ángulo de apertura de las ramas del aro con respecto al haz incidente. Las nociones necesarias de la estimación de dicho ángulo se hicieron a través de la construcción de un programa en lenguaje C en el que se tienen en cuenta rangos de variación de parámetros como la temperatura, el ángulo de incidencia, posición dentro del cristal, la longitud de onda de incidencia, las posiciones dentro del cristal, entre otras. Se implementaron ciclos para hacer esos barridos. También se tuvieron en cuenta para el cálculo de los índices de refracción las ecuaciones de Sellmeier y con esto se pudo determinar que el ángulo de alineación tenía un valor entre 1° y 3° [11]. A partir de conocer un rango restringido se tienen nociones más claras sobre la trayectoria que el aro debe tener. La estrategia de alineación consistía en que al hacer el barrido de distancias (desde el cristal en la dirección del largo de la mesa), un punto de referencia sobre el aro (el punto superior que en la imagen generada por la cámara) debía tener la misma ubicación en la imagen sin importar el cambio de distancia. Moviendo al tiempo el segundo espejo, la cámara y el cristal se pudo fijar finalmente la posición de alineación. Como se ve en el esquema de la Fig.15, el segundo espejo no se encuentra propiamente a 45° se tuvo que girar y finalmente se fijó a $43,94^\circ$ con respecto a la dirección del rayo incidente. También se ve en la Fig. 15 que el ángulo de alineación resultó ser $2,106^\circ$ que está dentro del rango predicho por la simulación.

4. Detección

Cuando se fijó la posición de alineación del aro se tuvo la oportunidad de ubicar los acoples de las fibras ópticas de manera directa ya que además de tener una rama del aro paralela al largo de la mesa teníamos definido el ángulo de alineación. La trayectoria final quedó marcada con ayuda de dos iris, esto asegura que no se perderá la posición de alineación frente a cualquier error o accidente. Esta etapa tuvo una serie de procesos intermedios que se describen a continuación.

4.1. Alineación acoples

Los acoples se montaron en las posiciones aproximadas por las que debe pasar el aro, con base en la alineación del aro. Esto no quiere decir que se ubicaron a la misma distancia del cristal, sino que aunque están a distintas distancias, ambos están atravesando la trayectoria del aro.

Se debe tener una precisión muy alta para poder ubicar los puntos opuestos del aro pues van a pasar pocos fotones por la apertura micrométrica de las fibras. Se usó un láser rojo de Helio Neón que nos permitió marcar la trayectoria aproximada que seguiría el aro. Primero se dirigió al acople que estaba hacia el interior de la mesa, y con el medidor de potencia óptica se movieron todos los tornillos de los acoples que variaban básicamente la distancia focal del lente convergente con el que cada uno cuenta. Luego se realizó el mismo proceso con el segundo acople dirigiendo el haz hacia el y con los movimientos de los tornillos se buscó la máxima potencia. Para el acople cercano se obtuvo una máxima potencia de 810mW y para el acople lejano de 750mW. Ver Fig. 17

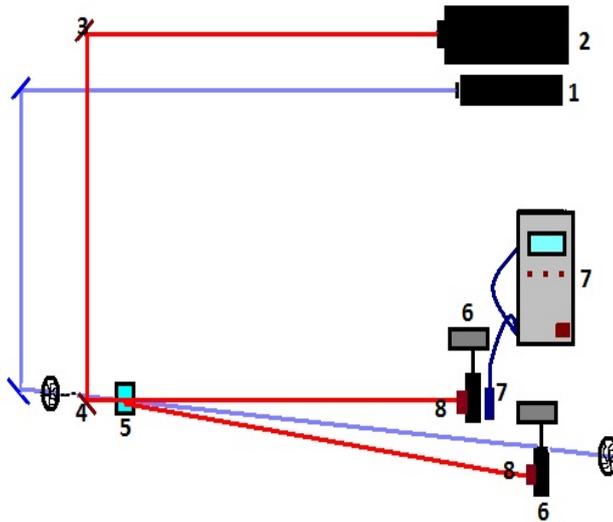


Figura 16: Esquema del montaje para la alineación de los acoples. 1. Láser 405nm. 2. ELáser Helio Neon. 3 y 4 Espejos altamente reflectivos, ambos dinámicos. 5. Cristal BBO I. 6. Soportes xy para los acoples. 7. Acoples para las fibras ópticas. 7 Medidor de potencia óptica.

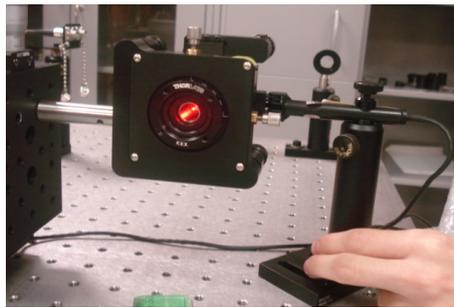


Figura 17: Proceso de medición de potencia directamente sobre los acoples.

4.2. Alineación fibra

Al maximizar la potencia con los acoples solos se procedió a acoplar las fibras. Con ellas se realizó el mismo proceso que con los acoples, dirigiendo el láser a cada uno de ellos y maximizando la potencia que se captaba al otro lado de la fibra, ver Fig. 9

Después de alinear las fibras resultó que las potencias registradas eran casi iguales, ambas reportaron una potencia de 500mW. Con esto se pudo pasar a la etapa de detección conectando cada fibra a los detectores electrónicos

4.3. Maximización coincidencias

Para esta etapa ya no se necesitaba el laser rojo ya que al usar los detectores electrónicos altamente sensibles es precisamente el aro. Ahora no se capto su imagen pero si el número de conteos recibidos para cada detector. Usamos los detectores electrónicos unidos por un lado a las fibras, y por el otro unido a una tarjeta FPGA especialmente programada para transferir las detecciones de fotones como pulsos electrónicos en un contador interno, estos

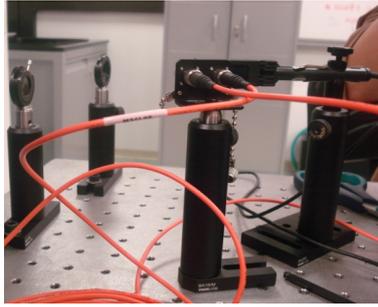


Figura 18: Medición de potencia óptica de las fibras

conteos se exportan al computador y se leen mediante un programa especial diseñado por el Profesor David Guzman.

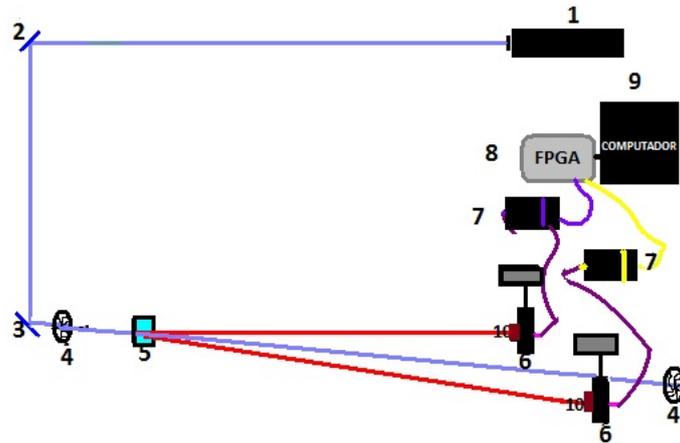


Figura 19: Izquierda: Montaje experimental esquemático. 1. Láser 405nm. 2. ELáser Helio Neon. 3 y 4 Espejos altamente reflectivos, ambos dinámicos. 5. Cristal BBO I. 6. Acoples para las fibras, 7. detectores electrónicos, 8. Tarjeta FPGA y 9. Computador.

Con el montaje de la Fig. 19 vemos la imagen del aro localizada sobre un plano del grosor de la fibra. El reto en esta etapa fue mover con precisión todos los tornillos de los acoples con la finalidad de que los conteos fueran los máximos posibles. Al hacer esto se empezaban a obtener algunas coincidencias pero eran muy pocas como para asegurar que fueran fotones correlacionados. Otro factor a tener en cuenta es que las fibras se encuentran a 22cm aproximadamente una de la otra por lo que los fotones no llegarán realmente al tiempo a los dos detectores. El retraso que representa esa distancia es de 0,7 ns o aproximadamente 1ns. El programa tiene la opción de establecer varios retrasos, con estos se hace un barrido de retrasos (siempre y cuando las coincidencias sean altas) y se determina cuál es el retraso óptimo para obtener las coincidencias. A partir de esto se deja un retraso fijo y se sigue buscando la configuración que tenga el mayor número de coincidencias posible. Por último se debió tener cuidado con no exceder 500000 conteos por cada detector ya que esa es la intensidad máxima que pueden tolerar.

5. Doble rendija

En el camino del fotón anunciado se interpone una doble rendija con la cual se producirá el proceso descrito en la sección 1.2, es decir se producirá un patrón de interferencia. Para posicionar la doble rendija a una distancia adecuada del cristal se usó el láser rojo con el que se pudo observar el ancho del patrón de interferencia y la apertura de los máximos. Con esto se identificó un problema y es que varios máximos a la vez podían llegar al lente y ser enfocados como una suma de intensidades. De esta forma ver el patrón de interferencia sería algo infructuoso. La solución que se implementó fue pegar una rendija sencilla para dirigir la luz de un sólo mínimo hacia el lente de los acoples de la fibra. Sin embargo la rendija sencilla reduce enormemente la cantidad de luz que entra a los acoples. Por esto se hicieron mediciones con y sin rendija sencilla, los resultados y su significado se presentan en la sección 6.

6. Análisis

A continuación una descripción del proceso realizado en la primera sesión de detección que dió algunas pautas para hacer más efectivo el proceso en sesiones siguientes:

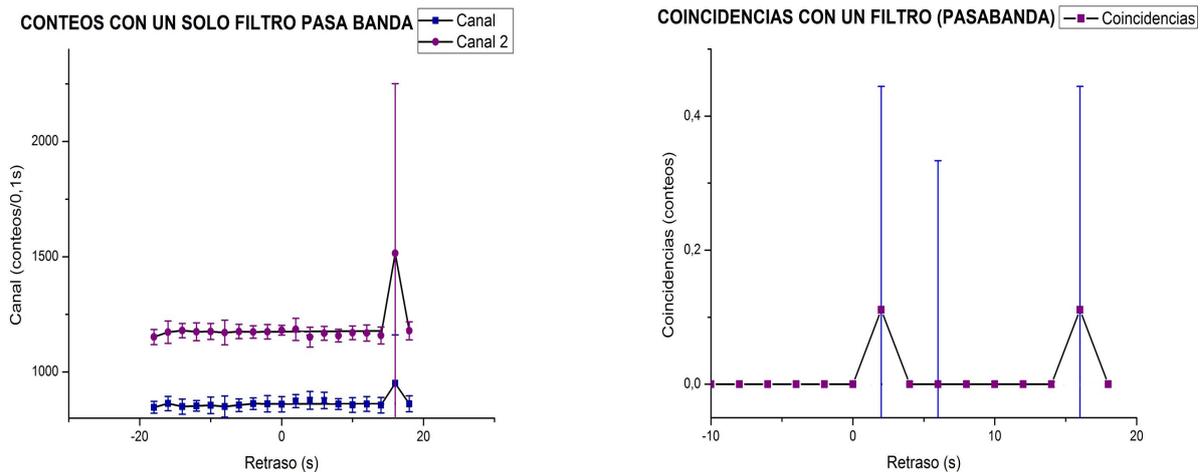


Figura 20:

En la gráfica de la izquierda en 20, se tienen los conteos iniciales en la primera sesión de detección que se realizó. Se hizo un barrido de retrasos desde -18ns hasta 18ns (se obtuvieron 19 archivos con 10 datos cada uno). Lo que se observa es un comportamiento muy constante en el número de detecciones hasta un retraso 16ns en el que el pico se explica a causa de una fuente de luz adicional: una linterna que se debió utilizar de emergencia en ese momento. Se observa que los conteos por el canal 1 eran en promedio 865 y por el canal 2, 1188 conteos; si a este total se le restan las cuentas oscuras que obtenidas para ese momento: por el canal 1 se veían aproximadamente 300 conteos efectivos y 500 por el canal 2, ese es un rango de detección muy bajo para observar cualquier indicio de parejas correlacionadas. Estos datos se tomaron con un solo filtro acoplado a los detectores (filtro pasa banda con centro de longitud de onda de 810nm). La gráfica de la derecha en 20 corresponde al barrido del número de coincidencias en el mismo rango de retrasos

que para la gráfica de la izquierda en 20. Se observa que el promedio de coincidencias es muy bajo (0,1 coincidencias), por esto se sabe que en ese momento no se estaba obteniendo ninguna pareja de fotones correlacionados. Las barras de error son muy grandes debido a que existe mucha incertidumbre acerca de las pocas coincidencias que se tenían, es decir hay muy poca información. Lo único que se podía concluir en ese momento era que se debían maximizar en gran medida los conteos, es decir que se debían buscar los centros de cada rama del aro con cada detector.

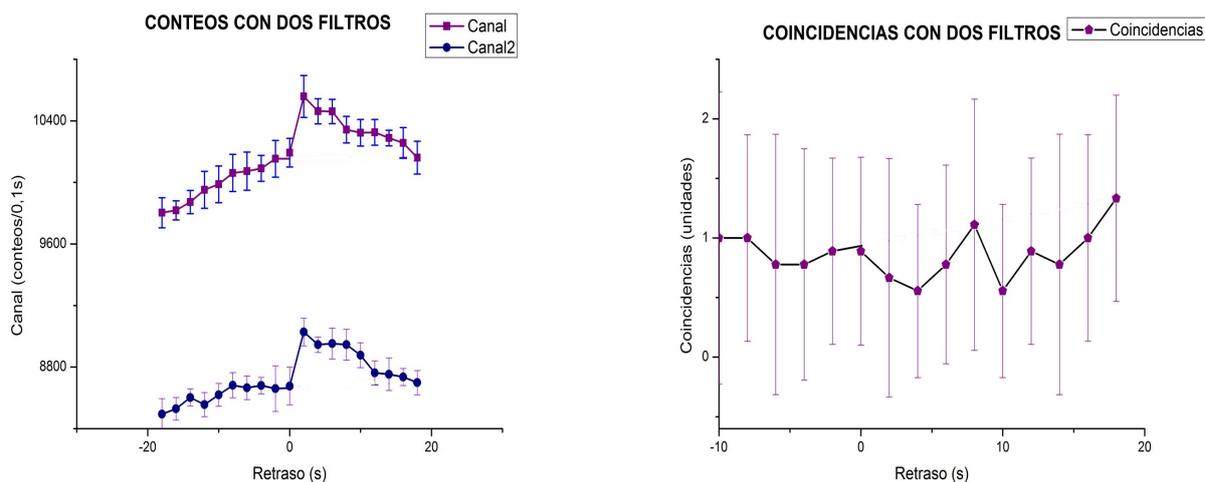


Figura 21:

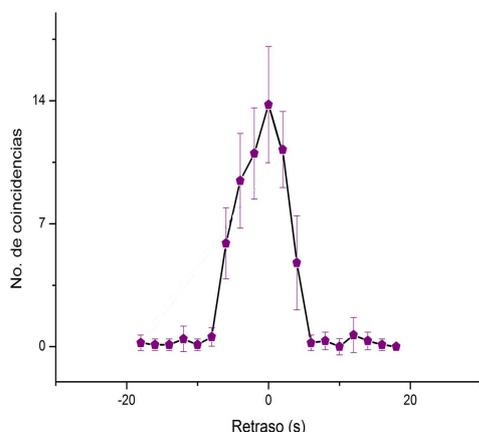
Ahora analizaremos otros de los datos producidos para la primera sesión de detección. La gráfica de la izquierda en 21, presenta un hecho muy interesante: cuando se ponía un filtro pasabanda delante del cristal los conteos subían considerablemente: en el canal 1 se tenían aproximadamente 9600 conteos efectivos y en el canal 2 casi 8000. Esto sucedió porque la cara del filtro que se apuntaba hacia los detectores es en principio un espejo y estaba reflejando luz del láser hacia los mismos. Entonces este resultado sirvió para saber que el uso del filtro pasabanda afectaba de manera perjudicial en la toma de datos.

La gráfica ubicada a la derecha en 21 corresponde al número de coincidencias en el escenario de la toma de datos para la gráfica 3. Se ve que el promedio de coincidencias sube a 1,22 con respecto a la toma de datos con un filtro. El aumento no es considerable lo que apoya el razonamiento de que la luz que aumenta los conteos es reflejo de la luz del láser y las coincidencias de más son coincidencias aleatorias que no tienen nada que ver con el proceso SPDC. Entonces el siguiente paso fue maximizar los conteos teniendo en cuenta que era mejor sólo utilizar un filtro pasabanda en cada detector.

De lo anterior se tenía claro que se debían maximizar los conteos para poder hallar el camino hacia los puntos contrarios donde se encontraban los pares correlacionados. Lo primero que se hizo fue maximizar los conteos efectivos hasta que se obtuvieron en promedio 10 coincidencias. Luego el profesor David Guzmán realizó una sesión de maximización hasta llegar a 200 coincidencias, pero esto aún no era suficiente para aumentar el porcentaje de detección registrado para este montaje. En el proceso de maximización se realizaron dos barridos en retardos, aparte de los que se hicieron para la primera sesión en la que no se ve ninguna característica relevante. Ahora para cuando se tenía un promedio de 10 detecciones

se hizo el barrido en deltas de la Fig.

No. Coincidencias. Canal 1: 4832. Canal 2: 4740



No. Coincidencias. Canal 1: 5799 .Canal 2: 5200

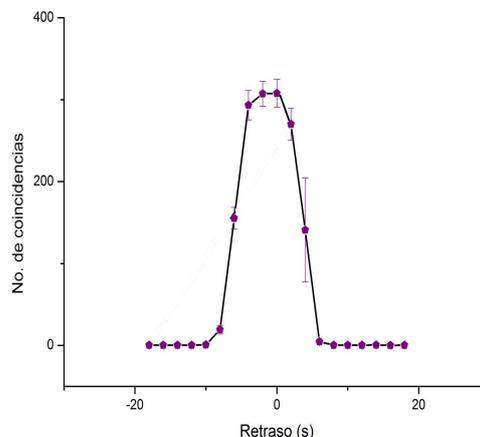


Figura 22: Izquierda: Coincidencias para un barrido de retardos con un promedio de 10 conteos. Coincidencias para varios deltas con un promedio de coincidencias de 400

A partir de los resultados que se ven en las gráficas de la Fig. 22, se puede observar que el retraso óptimo está entre 0 y -1. Con varias tomas de datos y teniendo en cuenta que el detector 2 estaba conectado al acople más lejano, el fotón anunciado llega antes al detector, por lo que se fijó el retraso en -1.

Después de tener un retraso fijo se procedió a hacer el montaje de la doble rendija. Se realizaron dos tomas de datos: se hicieron dos barridos a lo ancho del aro, uno con rendija sencilla y el otro sin rendija. Ver Fig.23 y Fig. 25

Ahora se considera la influencia del uso de la rendija sencilla en los conteos. En la Tabla ?? se ve que al poner la rendija sencilla los conteos sobre el canal que recibe el fotón anunciado caen bastantes. En este caso los conteos cayeron de 8800 a 346 y las coincidencias cayeron de 487 a 7,2.

Con estas condiciones no era posible observar el comportamiento ondulatorio de los fotones. Por esto se siguieron maximizando los conteos con la rejilla puesta, pero no fue mucho lo que se pudo mejorar. Finalmente obtuvimos los resultados vistos en 23 y 25. En ambas gráficas se ven unas pequeñas oscilaciones. Estas oscilaciones se ven más claras con la presencia de la rendija sencilla, sin embargo no se puede reconocer un máximo dominante en las amplitudes como sucede con un verdadero patrón de interferencia. En el caso sin rejilla se ve un máximo mayor a los demás pero las oscilaciones pequeñas no se pueden ver claramente, esto en principio se debe a que ambas gráficas no están a la misma escala. Obtuvimos algunos indicios de oscilaciones pero no es el patrón de interferencia buscado ya que para hallarlo se debía maximizar el número de coincidencias a un mínimos de 30 con la rendija sencilla puesta.

6.1. Otros experimentos posibles con la montura actual

Interferómetro de Mach Zender: Con una maximización efectiva de conteos y coincidencias en el montaje actual se pueden aplicar otros experimentos que también estudian

Coincidencias vs. Distancia de barrido . Con rendija sencilla

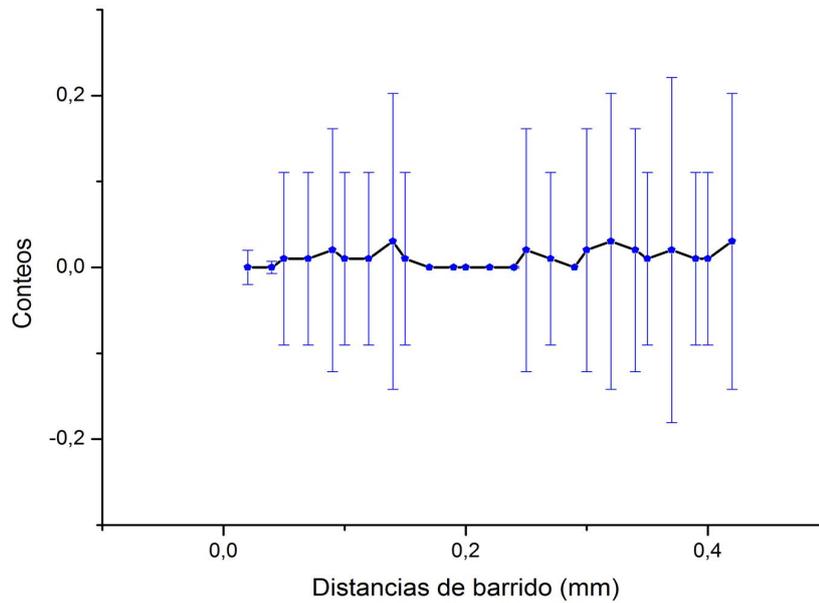


Figura 23: No. de coincidencias en el barrido de distancias con rendija sencilla

Conteos vs. barrido de distancia. Sin rendija sencilla

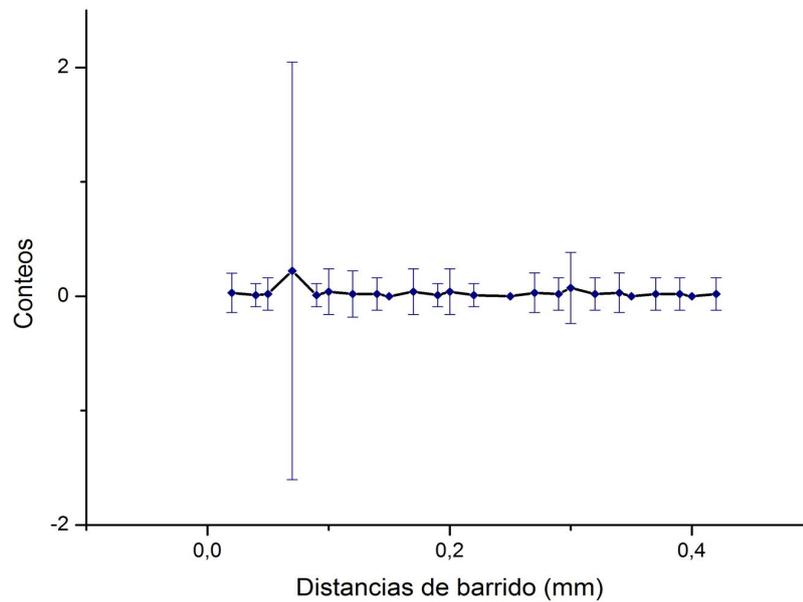


Figura 24: o. de coincidencias en el barrido de distancias con rendija sencilla

características ondulatorias de los fotones producidos a partir de su relación con los fotones que los anuncian, es decir las detecciones en general: patrones de interferencia e imágenes

| Nombre del archivo | Descripción | Canal 1 | Canal 2. | Coincidencias |
|--------------------|---|---------|----------|---------------|
| j.txt | 300 detecciones de 1s, sin rejilla sencilla | 8896 | 6300 | 482 |
| j2.txt | 300 detecciones de 1s, sin rejilla sencilla | 8875 | 6305 | 487 |
| jr.txt | 300 detecciones de 1s, con rejilla sencilla | 346 | 6293 | 7,2 |

Figura 25: **Tabla 1** influencia de la rendija sencilla sobre los conteos y las coincidencias

de las rendijas se darán en términos de coincidencias.

Uno de dichos experimentos es el interferómetro de Mach Zehnder que consiste en un arreglo especial de espejos y beams splitters (dispositivos que idealmente reflejan el 50% de la radiación incidente y dejan transmitir el otro 50%)²⁶. Con este montaje se construye un interferómetro que permite medir una diferencia de fase relativa entre los patrones de interferencia que se forman en los dos detectores a causa de la diferencia de longitud de los caminos que pueden seguir los fotones (dos posibles caminos), ver 26. Para la alineación inicial del experimento no se puede usar directamente la radiación que surge del cristal ya que tiene una intensidad muy baja, debemos usar una fuente coherente de la misma λ , es decir se usa un diodo láser infrarrojo de 810nm.

Como se mencionó anteriormente la interferometría tiene múltiples utilidades, entre ellas la determinación de: variaciones de longitud de onda, diferencias de fase e índices de refracción. El interferómetro de Mach-Zehnder es un interferómetro de doble haz (rayo muestra o incidente y rayo secundario o de referencia). Este interferómetro usa el siguiente principio: El haz de luz coherente que proviene de una fuente única es dividido en dos partes por un beam splitter. Estos haces parciales atraviesan luego distintos caminos; son desviados por espejos y se vuelven a combinar mediante otro beam splitter que manda dos parejas de rayos hacia dos detectores distintos, cada fotón interfiere con su pareja. Debido a la interferencia de las ondas de luz se produce una figura de interferencia en cada detector. Cada uno de estos patrones tiene fase distinta cuya diferencia se calcula por la comparación de los patrones de interferencia. Como se mencionó estos patrones de interferencia surgen de la variación en la longitud del camino óptico, el cual se define como el producto del índice de refracción por el camino geométrico que sigue el fotón, en este caso se varió la longitud para uno de estos haces parciales, por consiguiente éste último experimenta un corrimiento de fase respecto al haz al que no se le varió la longitud del camino óptico. Un aspecto importante es que al calcular la diferencia de fase se obtiene también la diferencia entre los caminos ópticos.

Borrador Cuántico: Existe otro experimento muy interesante que es posible con este montaje y es el que se refiere al borrador cuántico. Se utiliza el mismo montaje del experimento de doble rendija y como ya se describió, cuando un fotón pasa por una doble rendija se forma un patrón de interferencia. Sobre dicho patrón se pueden provocar varios efectos con el uso de polarizadores como se describe a continuación[10]:

- 1) Marcadores: La primera fase de este experimento consiste en anular el patrón de interferencia marcando el camino por el que pasan los fotones. Esto se hace poniendo dos polarizadores con polarización ortogonal uno con respecto al otro y pegando el conjunto a la doble rendija. Cuando se ponen estos polarizadores ya no se observará el patrón de interferencia ya que los fotones que pasan por la rendija de la derecha tendrán una de-

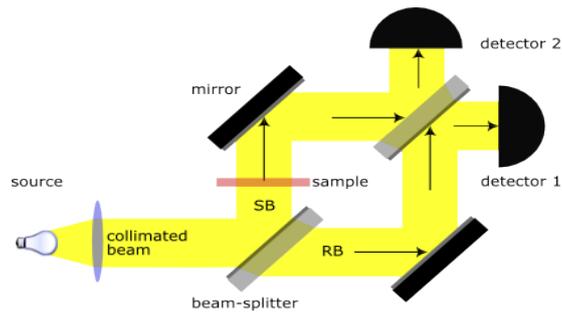


Figura 26: Interferómetro de Mach Zehnder. Tomado de:[5]

terminada polarización (polarización H) y los que pasan por la de la izquierda salen con polarización ortogonal a los anteriores (polarización V). Cada polarizador será entonces un indicador del camino que eligió el fotón y así no habrá dualidad de caminos, por lo tanto la probabilidad de que el fotón pase por uno u otro camino ya no depende de una función de onda, entonces el fotón se comportará como una partícula. El resultado de detección será solo de dos máximos correspondientes a los fotones que entraron por cada rendija. Los polarizadores pegados a la rendija con polarización ortogonal entre si se conocen como marcadores. La rendija y el conjunto de marcadores estarán fijos durante la aplicación de todo el experimento. A continuación se tratarán los elementos dinámicos del experimento que serán los responsables de anular y reestablecer el patrón de interferencia.

- 2) Polarizador analizador en la dirección H: Si se pone un tercer polarizador en polarización H, entonces de los fotones atraviesan cada rendija, sólo se dejan pasar por el polarizador los fotones que entraron por la derecha. Los fotones que entran por la izquierda son totalmente bloqueados pues tienen polarización V ortogonal a la H. Como resultado de detección se encontrará la imagen de la rendija derecha (un sólo máximo), con una intensidad un poco menor a la de la etapa de marcadores.
- 3) Polarizador analizador en la dirección V: El tercer polarizador que estaba en dirección H se gira hasta que queda con polarización V. En este caso el polarizador bloqueará los fotones con polarización H, por lo que tendremos la imagen de la rendija izquierda con las mismas características de la imagen del caso anterior.
- 4) Borrador de información de camino (polarización D): Ahora el tercer polarizador se gira en el sentido de las manecillas de reloj 45° desde la polarización V. Con esta disposición el patrón de interferencia vuelve a aparecer: esto sucede porque al poner el polarizador de esta manera se retoma la dualidad de camino ya que todos los fotones tienen polarización D (diagonal), entonces de nuevo no se puede saber por cuál rendija pasó cada fotón, es decir se borra la información del camino seguido. Observamos de nuevo el patrón de interferencia con máximos y mínimos tal y como se tenía con la doble rendija sola.
- 5) Antiborrador (polarización A): Otra disposición que se puede analizar es la del tercer polarizador girado 45° desde la polarización V pero en sentido contrario al montaje anterior. De nuevo todos los fotones tienen una misma polarización, en este caso polarización A, así tenemos dualidad de caminos y de nuevo un patrón de interferencia, que no es el mismo del caso anterior sino que en los lugares donde habían mínimos ahora hay máximos y viceversa.
- 6) Ambos borradores al tiempo: Este es la última etapa de este experimento. Se usa

un polarizador híbrido que tiene una mitad con polarización D y la otra mitad con polarización A. Se espera que al final se tenga un patrón de interferencia cortado por la mitad y uno corrido una fase de $\pi/2$ con respecto al otro. Este patrón parecerá un conjunto de dientes con máximos superiores sobre mínimos inferiores y viceversa.

7. Conclusiones

- 1) En la etapa de visualización el detector CCD fue muy útil para observar el aro a pequeñas distancias del cristal, sin embargo a grandes distancias este detector no tenía la sensibilidad suficiente para ver el aro de radiación, por esto la etapa posterior de alineación fue de gran dificultad ya que cuando se intentaba observar el aro a una distancia del orden de m desde el cristal se perdía casi totalmente su imagen.
- 2) Se logró construir un programa de simulación con todas las variables a tener en cuenta en el laboratorio para el cálculo del ángulo de salida de las ramas del aro con respecto a la dirección de la luz incidente. Con base en estas predicciones computacionales se tenía un estimativo muy útil para llevar a cabo el proceso de alineación.
- 3) Con los resultados del programa de simulación se pudo calibrar la apertura del aro y sus tamaños para distintas distancias. Cuando se logró alinear el aro de radiación el ángulo medido desde el haz incidente hasta uno de los extremos del aro estuvo dentro el rango predicho por el programa: entre 1° y 3° . Finalmente el valor del ángulo de alineación fue de $2,106^\circ$.
- 4) Fue posible la alineación efectiva del montaje y el aro de tal forma que el montaje de los detectores se diera de forma directa.
- 5) Las coincidencias aleatorias en todo el proceso de maximización fueron casi nulas, por lo que supimos que las coincidencias logradas si pertenecían al proceso SPDC.
- 6) Al final del proceso de maximización logramos máximos de coincidencias cercanas a 580. Como se encuentra el montaje actual es posible seguir maximizándolo, sin embargo ha concluido el semestre, sin embargo es posible darle continuidad al proyecto por parte de otros estudiantes que puedan estar interesados en él, el próximo semestre.
- 7) Se pudo construir efectivamente la fuente de fotones correlacionados, sin embargo los detectores aún no están ubicados en las posiciones óptimas que corresponden a puntos opuestos del aro, por este hecho se está perdiendo un alto porcentaje de coincidencias que no permiten el montaje de otros experimentos de interferometría como el interferómetro de Mach Zender y el borrador cuántico.
- 8) Aunque montamos el experimento de doble rendija, éste no arrojó datos que nos permitieran observar el patrón de interferencia a causa de la necesidad de usar una rendija sencilla delante del filtro en los acoples de la fibra que detecta los fotones anunciados. Esta rendija reduce enormemente la cantidad de fotones que ingresan al detector imposibilitando ver un patrón de interferencia más allá del ruido propio del experimento. Las coincidencias caían casi a 0, entonces para que el experimento funcione lo único que queda por hacer es maximizar aún más los conteos y con estos las coincidencias hasta

que se tenga un mínimo de 30 coincidencias en los máximos del patrón de interferencia.

Referencias

- [1] Galvez, J. 2010, AJP. vol. **78**, 5.
- [2] Down conversion. Tomado de <http://departments.colgate.edu/physics/research/Photon-root/Apparatus/spdc.htm> . Agosto de 2010.
- [3] Galvez, J, et. al., 2010, AJP. vol. **73**, 127.
- [4] Tesis de doctorado, Alejandra Valencia. “High-Accurate Nonlocal Timing and Positioning Using Entangled Photon Pairs”. Julio de 2005. Universidad de Maryland.
- [5] File:Mach-zehnder-interferometer.png. Tomado de <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Mach-zehnder-interferometer.png>
- [6] Óptica Ondulatoria, Interferómetro de Mach Zehnder. Montaje de un Interferómetro de Mach Zehnder en un banco de óptica láser. Tomado de : [http : //www.ld – didactic.de/literatur/hb/s/p5/p5351s.pdf](http://www.ld-didactic.de/literatur/hb/s/p5/p5351s.pdf) . Tomado el 19 de Noviembre de 2010.
- [7] Barium Borate BBO Crystals Tomado de: [http : //www.casix.com/products/crystalproducts/birefringent – crystals/a – bbo – crystal.shtml](http://www.casix.com/products/crystalproducts/birefringent-crystals/a-bbo-crystal.shtml) . Tomado el 22 de Noviembre de 2010.
- [8] Guzman, D. Radiación generada por SPDC BBO tipo I y tipo II. Resultados de programa de simulación de David Guzmán.
- [9] Santa Barbara instruments <http://www.sbig.com/>
- [10] HILLMER, R. & KWIAT, P. A Do it by yourself, QUANTUM ERASER. Scientific American. 2007.
- [11] Varela, K. Programa simulación para ángulo de alineación del aro. Programa escrito en lenguaje c. 2010