

Fuente de fotones anunciados

Karla Varela

Asesor: David Guzmán

Noviembre 23 2010

Abstract

Se presenta el proceso experimental llevado a cabo para la construcción de una fuente de fotones anunciados correlacionados. Se parte de una base de conocimientos teóricos en óptica relacionados con interferencia, cristal, refracción y polarización principalmente. Estas bases teóricas permiten entender procesos de producción de fotones en cristales no lineales. El mecanismo de producción analizado es la Producción paramétrica espontánea (SPDC) que se puede presentar en 2 tipos según el corte del cristal. En este proyecto se utiliza un cristal BBO cortado para que la SPDC sea de tipo I. Para el análisis teórico también se implementa un programa en C, éste permite estimar el comportamiento de los fotones producidos (810nm) a partir de un láser incidente de 405nm. Combinar las predicciones teóricas con un uso adecuado de la instrumentación, conduce a lograr una correcta alineación y calibración del montaje experimental. Con el montaje debidamente calibrado, se realiza un proceso de detección de los fotones de 810nm producidos. La detección se se lleva a cabo utilizando fibras ópticas multimodo de $62.5\mu\text{m}$ de diámetro acopladas a detectores especiales. El registro de datos se realiza con un FPGA a la cual se conectan los detectores. Finalmente se realiza el experimento de doble rendija con los fotones de 810nm que salen de nuestra fuente.

Introducción

A partir de la teoría básica de óptica cuántica relacionada con la conversión paramétrica espontánea (SPDC por sus siglas en inglés), polarización, interferencia, refracción, conservación de momento lineal y el funcionamiento de detectores electrónicos, se construye una fuente de fotones anunciados correlacionados. El proceso de SPDC se presenta en cristales no lineales cuando haz de fotones incide sobre un cristal no lineal. Dependiendo el corte del cristal, este proceso se presenta en 2 formas diferentes, tipo I en el cual los fotones producidos tienen la misma polarización entre ellos y ortogonal a los incidentes y tipo II en la cual los fotones producidos tienen polarización ortogonal entre ellos.

Para la realización de la fuente se utilizó principalmente un láser que emite fotones con longitudes de onda de 405nm idealmente, espejos que reflejan hasta el 95% de la luz en esta longitud de onda (405nm), un cristal no lineal BBO tipo I, polarizadores, filtros pasabandas con longitud de onda central 810nm y una tarjeta FPGA debidamente programada. En este proyecto los fotones generados salen con el doble de la longitud de onda de los incidentes (caso degenerado). El porcentaje de detección alcanzado fue de 7.5% aproximadamente.

Una de los puntos más importantes en la realización de la fuente de fotones anunciados, se encontraba en la parte de detección, para este proceso se utilizaron fibras ópticas multimodo de $62.5\mu\text{m}$ de diámetro, detectores digitales y una tarjeta FPGA. Las coincidencias, es decir lo pares de fotones que llegan al tiempo (cada fotón a su respectiva fibra y teniendo en cuenta el retraso de cada canal), era el mayor indicador de que la producción era de fotones correlacionados, esto lo permitía la programación que tiene la tarjeta FPGA.

Finalmente con la fuente de fotones se realizaron algunos intentos de observar el patrón de interferencia que se genera cuando el fotón interfiere con él mismo, para esto se monto el experimento de doble

rendija y se tomaron algunas muestras de datos con 2 esenarios diferentes como se explica en la sección de 2.

A continuación se presentan cada uno de los factores influyentes en la construcción de la fuente y el experimento de doble rendija. Primero se encuentra una sección de marco teórico 1, en ésta se explica la parte teórica de SPDC, interferencia, refracción y polarización, además se dan detalles de los instrumentos utilizados. La sección 2 describe detalladamente el procedimiento experimental que se llevo a cabo en la construcción de la fuente, se dan detalles del diseño y montaje experimental, así como de los pasos que se siguieron en el proceso de detección. La siguiente sección 3 muestra los datos obtenidos con el experimento de doble rendija. Luego se encuentra la sección de análisis 4 donde se explica cada uno de ls datos obtenidos. Antes de concluir hay una breve sección 5 en la cual se dan algunas ideas de cosas posibles a realizar y finalmente encontramos las conclusiones.

1 Marco teórico

Durante la realización del proyecto hay 2 factores muy importantes: la parte teórica relacionada a procesos de refracción en cristales no lineales y principios de interferencia y la parte instrumental. Las 2 de igual de importancia para el análisis de resultados.

1.1 Polarización de la luz

En el estudio de ondas electromagnéticas un concepto muy importante es el de polarización. En nuestro caso es importante tener en cuenta este concepto aplicado a fotones, es decir, la polarización desde una descripción cuántica. Ésta se puede entender 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 utilizado en el proyecto tiene oscilaciones perpendiculares a su dirección de propagación, i.e. onda transversal. [ref1](#).

Aplicando la teoría acerca 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 el proyecyo presentado en este reporte, la polarización deseada es ortogonal a la de los fotones incidentes al cristal.

Otra de las funciones del polarizador fue la de filtrar otras fuentes de luz y sólo dejar pasar la luz del aro de radiación SPDC tipo I. En las últimas etapas del proceso fue tan útil el polarizador que en el montaje se utilizaron dos al tiempo (uno después del filtro y otro delante de la cámara como se describe en la sección procedimiento experimental 2.

1.2 Birrefringencia e interferencia

Cunado un onda electromagnética cambia de medio por el cual se está propagando, tenemos entonces que la velocidad de la luz cambia, esto lo conocemos un proceso de refracción.

Entre los diferentes casos de refracción encontramos la presentada en medios anisotrópicos, como por ejemplo cristales transparente no lineales. En estos hay 2 efectos principales que dependen de la orientación del cristal: el primero consiste en la variación de la velocidad de fase de la luz dada por la E_{c1} ; el segundo tiene relación con los índices de refracción, los cuales se convierten en una función del estado de polarización de la luz, implicando que el rayo incidente es dividido en dos rayos que se refractarán de forma diferente, estos cristales se conocen como cristales birrefringentes. Depeniendo de la estructura cristalina, la polarización de los haces resultantes es lineal o circular.

$$v_p = \frac{\omega}{k}. \quad (1)$$

El proceso por el cual se divide el haz incidente en 2, se conoce como conversión paramétrica espontánea (SPDC por sus siglas en inglés) y es un proceso aleatorio que no cambia la estructura del cristal impli-

cando que la relación entre energías y momentos de los fotones incidentes y generados, está dada por la conservación de energía y momento lineal. Los fotones producidos están correlacionados en el dominio de frecuencias. Para el caso de la *SPDC* tipo I, siempre hay producción de fotones en pares que llevan la misma polarización, mientras que para el caso de *SPDC* tipo II los fotones producidos tienen polarización ortogonal entre ellos, como se ilustra en la Fig1. Los cristales no lineales tipo I pueden ser uniaxiales positivos o negativos, los cristales no lineales tipo II son biaxiales.

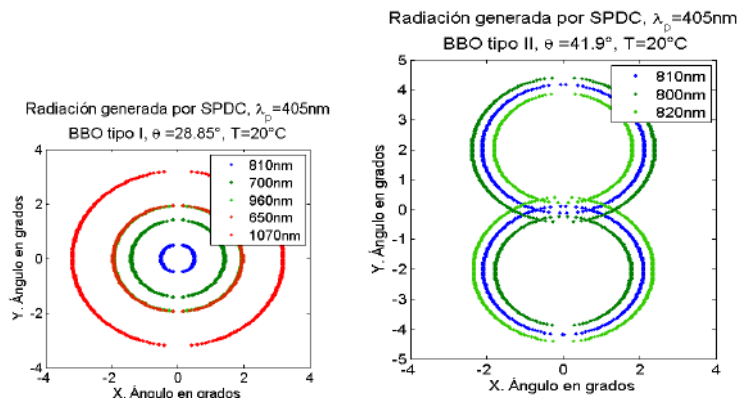


Figure 1: **Derecha:** Aro de radiación producido por un cristal BBO tipo I (simulación para distintas λ de los fotones producidos). **Izquierda:** Doble aro de radiación producido por un cristal BBO tipo II (simulación para distintas λ de los fotones producidos). Tomado de Ref3

En este proyecto el fotón incidente de longitud de onda $\lambda = 405nm$ se divide en 2 fotones de longitud de onda $\lambda = 810nm$ cada uno (caso degenerado). Debido a que se utilizó un cristal no lineal tipo I, los fotones producidos tienen polarización ortogonal a los incidentes. Dependiendo de la simetría axial del cristal se tienen dos tipos de frente de onda, uno extraordinario (*e-waves*) cuya polarización es elipsoidal (el vector de campo eléctrico es perpendicular al eje óptico) y por lo tanto su índice de refracción depende del ángulo del eje óptico, y otro ordinario (*o-wave*) cuya polarización es circular (vector de campo eléctrico normal al eje óptico) y su índice de refracción no tiene dependencia angular como se ve en la Fig.2.

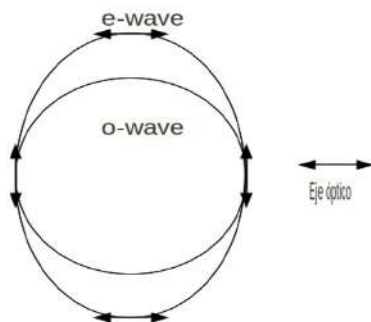


Figure 2: Frentes de Onda ordinaria y extraordinario de una fuente puntual en un cristal uniaxial. La flecha doble indica el sentido del campo eléctrico. La polarización de la onda ordinaria esta saliendo del plano. Ref libro optica pag 122

Para la fuente de fotones anunciados que se construyó se utilizó BBO (*beta - BaB₂O₄*) tipo I, cristal no lineal. Este cristal es uniaxial negativo, es decir tiene un solo eje de simetría y el índice de refracción n_e es mayor que el n_o . Fig 3.

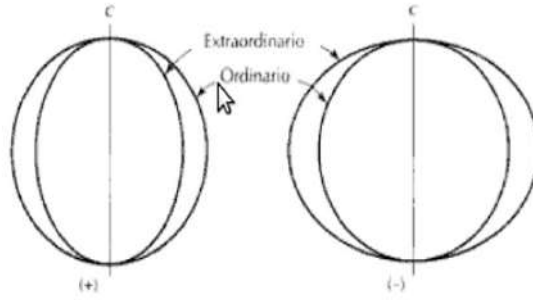


Figure 3: Superficies de velocidad del rayo de cristales uniaxiales. Tomado de Ref7

1.3 Interferometría

Es importante tratar un concepto con el que trabajamos en las últimas etapas del proyecto: la interferometría. Éste se utilizó para constatar la naturaleza dual del fotón. A partir del montaje de experimentos con interferómetros, se intentó estudiar las características ondulatorias de los fotones producidos en el aro de radiación por medio de *SPDC* tipo I, estas características vienen dadas por la función de onda que describe en el cual se encuentran los fotones a partir de su descripción cuántica.

Para la realizar el estudio planteado anteriormente, se parte del hecho de que las ondas tienen la capacidad de interferir entre ellas 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 resultante.

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. 4. 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 él mismo y presenta una dualidad entre onda y partícula.

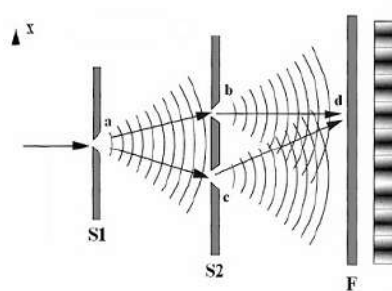


Figure 4: Patrón de interferencia experimento doble rendija.

1.4 Instrumentación

A continuación haremos una breve descripción de todos los elementos ópticos utilizados en el transcurso del semestre y que hicieron parte de varios montajes experimentales (los cuales se especifican en la sección procedimiento experimental 2. Se darán las especificaciones de cada elemento descritas directamente por los fabricantes.

1. **Láser:** Utilizamos dos láser:

- **Láser principal Fig 5.:** Diodo láser de GaN que se utiliza como haz de fotones incidentes 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. Para su uso se deben tener ciertas precauciones, en especial el uso de gafas protectoras en esa longitud de onda y cuidado en el encendido correcto y pausado del láser.



Figure 5: Láser de longitud de onda 405nm al fondo (negro). Fuente del láser al frente.

- **Láser secundario:** Láser rojo HeNe que emite a 633nm. Este se utilizó en la alineación preliminar de las fibras para la detección de los fotones generados en el cristal.



Figure 6: Láser de longitud de onda 633nm.

2. **Espejos:** Para darle la dirección correcta al láser y la altura de incidencia sobre el cristal adecuados de forma tal que se genere el aro de fotones deseado, se utilizan 2 espejos de alta reflexión mostrados en la Fig 7. Para el manejo de estos espejos es importante el uso de guantes, de esta forma se evitan posibles marcas de huellas o ensuciar la superficie de cada espejo y afectar su eficiencia en la reflexión.

- **Espejo 1:**
Fabricante: EKSMA.
Material: BK7.
Dimensiones: Diámetro de 25.6mm. Grosor: 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: Diámetro de 25.6mm. Grosor: 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%.



Figure 7: Izquierda: Espejo 1. Derecha: Espejo 2

3. **Cristal:** Es un cristal no lineal BBO (*Beta-Barium-Borate*) cortado para producir SPDC tipo I. Uniaxial, no lineal negativo. Su montaje y su curva de transmisión se observan en la Fig.8

Dimensiones: 5cm x 5cm x 1cm.

Fabricante: CASIX.

Ángulo del eje óptico: $\theta_{cristal} = 29.5^\circ$.

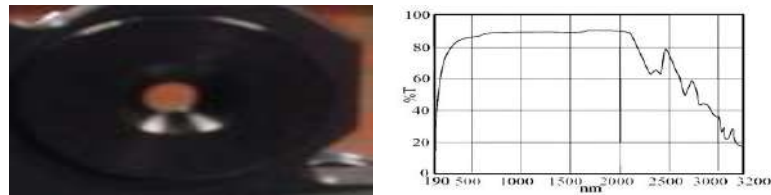


Figure 8: Izquierda: Cristal BBo tipo I (Dentro de su montura). Derecha: Porcentaje de transmisión del cristal.

4. **Polarizadores:** Se utilizaron polarizadores de lámina (Fig 9), estos polarizadores no son de alta precisión pero fueron suficientes para realizar la calibración necesaria del montaje.



Figure 9: Polarizador usado para filtrar el aro de radiación.

5. **Filtros:** Durante el montaje se usaron 2 filtros: filtro pasa-altas para pruebas y toma de fotos ya que no bloqueaba toda la intensidad, filtro pasabandas para la detección final de los fotones generados. Los cuidados con estos son similares a los que se deben tener con los espejos, principalmente se deben manipular con el uso de guantes tratando de no tocarlos directamente.

- **Filtro pasa altas: Fig10.**

Fabricante: THORLABS.

Referencia: FEL0750.
 Región de transmisión 750nm - 2200nm.
 Región de rechazo: 200nm - 720nm.
 Diámetro:12,5mm.

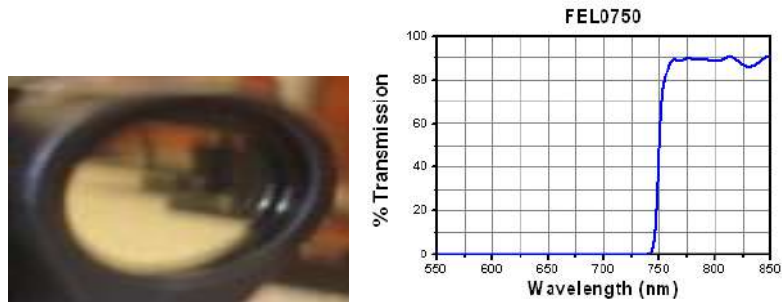


Figure 10: Izquierda: Filtro pasa-altas Derecha: Curva de transmisión del filtro.

- **Filtro pasabanda: Fig11.**
 Fabricante: ANDOVERCORP.
 Referencia: 810FS10-12.5.
 Frecuencia central:810nm±2nm.
 Ancho de banda: 10nm±2nm.
 Dimensiones: Diámetro: 5mm. Ancho:1mm.

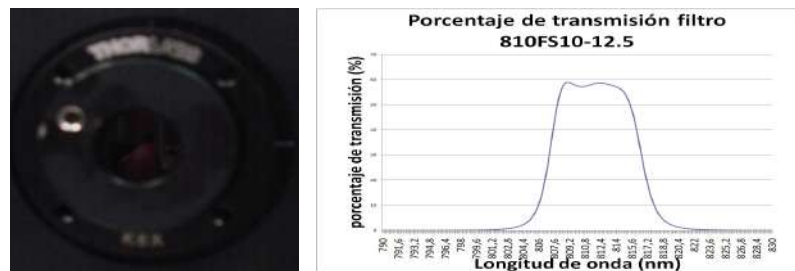


Figure 11: Izquierda: Filtro pasabanda. Derecha: Porcentaje de transmisión del filtro.

6. **Cámara CCD:** Se utiliza para verificar que sí se está generando el aro de fotones en el plano de la cámara. Para esto, se toman fotos del aro que se observan como círculos, estos varían su tamaño en función de la distancia entre el cristal y la cámara. Trabajamos con dos cámaras CCD de referencias ST 420 ME y ST 1603 ME. Fig 12. Es importante tener siempre presente el control de temperatura. Este control se maneja desde el programa CCDOPS con el cuál se maneja la cámara y se realiza la toma de fotos.

- **ST 402 ME:**
 Detector: KAF-01402MECCD
 Dimensión del detector: 765×510 pixeles.
 Eficiencia cuántica: 85%
 Velocidad de actualización: Hasta 2 imágenes por segundo.
 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
- **ST 1603 ME:**
 Detector: KAF-1603MECCD

Dimensión del detector: 1530×1020 pixeles.
Eficiencia cuántica: 85%
Velocidad de actualización: Actualiza más de 1 imágenes cada 2 segundos.
Software utilizado: CCDOPS Versión 5.
Sistema de refrigeración: Efectivo, normalmente trabajamos a -2°C .
Tamaño pixeles: $9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$.

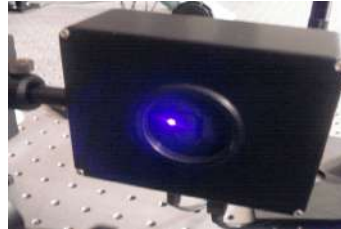


Figure 12: Cámara CCD con un haz de fotones de $\lambda=405\text{nm}$ incidiendo sobre ésta.

7. Fibras

Se usaron 2 fibras ópticas multimodo, cada una para detectar un fotón del par (anunciado y señal), Fig 13. La parte más delicada de las fibras son sus puntas, por lo que siempre se deben tener con los protectores adecuados colocados. Igualmente se debe evitar doblar la fibra para no dañar sus conexiones interiores.

Fabricante: THORLABS.
Referencia: M31L05.
Longitud: 5m.
Diámetro núcleo: $62.5\mu\text{m}$.
Conectores: FC/PC.
Atenuación: 2.7-3.2 dB/Km.
Apertura numérica: 0.275 ± 0.015



Figure 13: Fibras ópticas

8. FPGA

Dispositivo digital reprogramable (Fig 14), tiene una velocidad de procesamiento de 48MHz, David Guzmán y Nicolás Perdomo lo programaron para funcionar con una velocidad de 276MHz. El tiempo de retardo es de 1.8ns, es decir entre cada fotón detectado hay este tiempo muerto mínimo de espera entre cada detección. Ésto se debe a la electrónica del dispositivo y además sirve para compensar el camino que sigue el fotón.

La frecuencia a la que funciona la FPGA es una de las principales características por la que se escogió ésta sobre otros dispositivos electrónicos digitales, esta frecuencia define los conteos por segundo que el detector podrá ver.



Figure 14: Tarjeta FPGA.

9. Detectores

La fibra se conecta a estos detectores y cuando cada fotón llega 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 que aun así tienen ligeras diferencias en sus características. Fig 15. En el uso de los detectores, la mayor precaución se encuentra en el límite de conteos que admite cada uno, en promedio no pueden superar los 500000 conteos/seg.

Fabricante: Perkin Elmer Precisely.

Distribuidor: Pacer.

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

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

Serial N° 17561 Cuentas oscuras: Max: 181/seg. Promedio: 134/seg.

Pulso TTL: Ancho: 15.74ns. Amplitud: 2.91V Flanco de subida: 1.67ns.

Serial N° 17564 Cuentas oscuras: Max: 127/seg. Promedio: 93/seg.

Pulso TTL: Ancho: 15.8ns. Amplitud: 2.89V Flanco de subida: 1.48ns.



Figure 15: Detectores de alta sensibilidad.

10. **Acoples fibra óptica:** En la Fig16. se observan los acoples utilizados para las fibras ópticas multimodo. Tienen 5 tornillos de precisión que permiten ajustar inclinación tanto vertical como horizontal, distancia focal de la fibra y posición del lente que enfocara la luz en la fibra.



Figure 16: Acoples de la fibra óptica.

11. **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 antireflectica en el infrarrojo cercano. Fig 17.

Fabricante: Thorlabs.
Referencia: C220TME-B
Distancia focal: 11mm
Apertura numérica: 0.25.
Apertura: 5.50mm.



Figure 17: Lente del acople de la fibra óptica con un haz del láser de HeNe incidiendo durante la alineación de los acoples de las fibras ópticas.

2 Procedimiento experimental

Antes de dar detalles del proceso que se llevó a cabo durante el semestre en el desarrollo del proyecto, es muy importante tener en cuenta las razones principales para utilizar cada uno de los elementos mencionados en la sección 1. Hay 3 factores principales influyentes: eficiencia, venta comercial y costo. Combinando estos 3 factores se tiene que la longitud de onda óptima para trabajar es de 405nm. Escoger fotones de esta energía, implica que los fotones generados en el cristal no lineal por *SPDC* tipo I tendrán una longitud de onda cercana a 810nm, longitud de onda en la cual existe una variedad de dispositivos para la detección con una muy buena relación eficiencia - costo.

Las fibras utilizadas tienen una de sus ventanas de detección en 830nm, muy cerca a la longitud de onda trabajada, el cristal BBO tipo I, genera los fotones por *SPDC* en esta longitud de onda, los detectores tienen un porcentaje de detección alto y finalmente el azul es fácil de ver, implicando comodidad en la calibración del montaje. Ésta última razón, por ejemplo, puede dar cierta justificación al hecho de que a pesar de que para longitudes de onda en el rango del infrarrojo hay también muchos dispositivos eficientes, comerciales y de costos moderados, ésta no se utiliza, pues la imposibilidad de ver el rayo hace mucho más difícil la calibración del montaje.

Como fuente de fotones se utiliza un láser debido a que este genera luz monocromática y su potencia es bastante alta. Lo primero implica un menor grosor en la salida del aro de fotones generado, lo segundo se debe a la necesidad de tener una gran cantidad de fotones para obtener fotones correlacionados, se sabe que la probabilidad de conversión es de 10^{-12} fotones. Por último sabemos que el láser tiene una polarización fija que permite determinar la polarización de los fotones de salida y solo es necesario utilizar un único polarizador evitando la pérdida de fotones en las etapas iniciales.

2.1 Diseño y ensamble del montaje

Para la implementación del montaje adecuado para la fuente de fotones anunciados, se realizaron varias etapas:

1. **Diseño modelo:** El montaje propuesto se muestra en la Fig18, éste propone una fuente de fotones que utiliza diodos láser de longitud de onda 405nm y potencia entre 15-50mW y un cristal BBO tipo I. Con estas condiciones se generan pares degenerados que salen del cristal a $\pm 3^\circ$. En la Fig18

también se observan algunos interferómetros montados y como para su alineación se utiliza un láser de HeNe de 633nm.

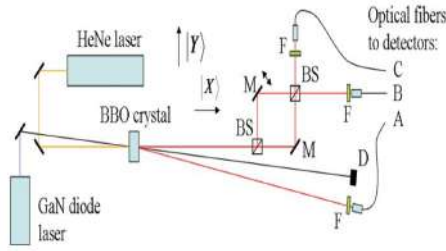


Figure 18: Montaje modelo para la construcción de la fuente de fotones anunciados. Tomado de Ref5

2. **Dirección láser:** Para dirigir adecuadamente el láser se utilizaron 2 espejos, el espejo 1 en la Fig.19. es el espejo 1 descrito en el marco teórico 1, el haz del láser incide sobre este a un ángulo de 45° y es desviado hacia un segundo espejo (espejo 2 en 1) que se encuentra a 43.94° en relación al eje por el cual viene el láser. La altura con la cual continúa el láser es de $11.6 \pm 0.1 \text{cm}$ aproximadamente, y se mantiene antes y después del cristal de tal forma que el aro generado se encuentren en el plano perpendicular a la mesa y los 2 fotones que se esperan detectar se encuentren en el plano horizontal la misma altura ($11.6 \pm 0.1 \text{cm}$) a la que va el láser incidente.

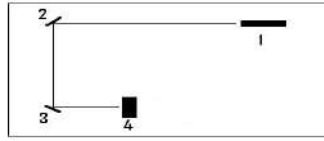


Figure 19: Montaje experimental esquemático. 1. Láser 405nm. 2. Espejo BK7, refleja 99.5% a un ángulo de 45° . 3. Espejo dinámico. 4. Cristal BBO tipo I.

Espejo 1	$\theta=45^\circ$
Espejo 2	$\theta=43.94^\circ$
Altura láser	$11.6 \pm 0.1 \text{cm}$

Table 1: Datos relevantes alineación láser.

3. **Producción del aro:** Cuando se logró direccionar el láser, y éste pasa a través del cristal BBO tipo I, se verificó que sí se estaba generando el aro de fotones esperado. Para realizar esto, colocamos primero el filtro pasa-altas lo más cercano posible al cristal, luego un polarizador y finalmente la cámara CCD como se muestra en el esquema de la Fig.20, de esta forma logramos ver el aro. La prueba de que no era algún tipo de reflexión de otra luz, fue el uso del polarizador; si este se giraba el aro desaparecía.
4. **Cálculos:** Una vez se tenía el aro, se debe tener en cuenta que tanto el espejo 2 como el cristal se encuentran en el ángulo adecuado, es decir el ángulo para que permite que entre el centro del aro (láser incidente) y un punto sobre el aro sea el deseado. Para calcular éste ángulo se realizó un programa en C (Ver anexo) el cual variaba diferentes parámetros y como resultado se obtienen las

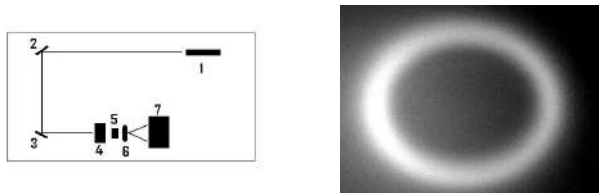


Figure 20: **Izquierda:** Montaje experimental esquemático. 1. Láser 405nm. 2. Espejo BK7, refleja 99.5% a un ángulo de 45°. 3. Espejo dinámico. 4. Cristal BBO tipo I. 5. Filtro pasa altas. 6. Polarizador. 7. Cámara CCD. **Derecha:** Aro fotones correlacionados producidos por SPDC tipo I.

posiciones en el plano del aro en las cuales éste debe encontrarse.

La estructura general del programa está dividida en 2 partes: una en donde se realiza la variación de los parámetros a partir de la implementación de ciclos, y la otra en la cual se implementan las funciones necesarias para realizar los cálculos adecuados:

- Temperatura: El ciclo más externo es de temperatura. Ésta no es constante en el laboratorio, cuando realizamos el programa, la base era que ésta se encontraba en un intervalo de 19°C a 21°C. El ciclo aumenta en pasos de 0.5°C, por lo tanto se obtiene 4 temperaturas diferentes. A través del semestre se observó que la temperatura promedio fue de 18°C, variando entre 17°C y 19°C. Sin embargo la relación entre variación del ángulo por temperatura y el ancho que este presenta, lleva a considerar casi despreciable ésta corrección.
- Ángulo del eje óptico del cristal: A partir de la ficha técnica del cristal $\theta = 29.2^\circ$; sin embargo se sabe que no siempre el ajuste tiene una precisión perfecta, por lo tanto se realizó una variación del ángulo entre 29.0° y 29.2° , con pasos de 0.1° , es decir analizaremos 3 ángulos diferentes.
- Longitud de onda del láser: Ésta longitud aunque se supone debe ser de 405nm no tiene su pico realmente en este valor y además varía dependiendo de la potencia con la cual se utilice el láser. El intervalo que se escogió para su variación es entre 404nm y 406nm.
- Longitud de onda del fotón señal: Los 2 fotones detectados (*signal - idler*), no llevan exactamente la misma longitud de onda, de tal forma que debemos dar la longitud de onda del foton señal (λ_1) y calcular a partir de ésta y la del láser, la del foton anunciado (λ_2) Ec. 2. Suponemos que los 2 fotones llevarán la misma longitud de onda, ésta sería el doble de la del láser (λ_p), por lo tanto asumimos éste valor como el valor central y barremos un intervalo de 10nm. Se tiene en cuenta acá que el máximo depende el valor de la longitud de onda del láser por lo tanto el máximo varía. Los subíndices 1, 2 y p, corresponden al fotón señal, al fotón anunciado y al láser respectivamente:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= 2\pi \frac{n_1}{\lambda_1}, & k_2 &= 2\pi \frac{n_2}{\lambda_2}, & k_p &= 2\pi \frac{n_3}{\lambda_3}, \\
 & & & & k_p &= k_1 + k_2, \\
 \lambda_2 &= \frac{\lambda_p * \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_p}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

- Posición en x y y : Los 2 últimos ciclos corresponden a las posiciones en x y y del aro dentro del cristal, se consideran 2 casos, fotones generados en el centro y al final del cristal; dependiendo de esto se realiza la variación de x y y basadas en las dimensiones del cristal.

Las funciones necesarias para la la obtencion de la posición del aro son:

- Cálculo de los índices de refracción: A partir de la ecuación de Sellmeier Ec.3 se calculan los índices de refracción (n). El rayo incidente es extraordinario por lo tanto su n depende del

ángulo (ángulo del eje óptico). Ésta relación está dada por la Ec.4, para los rayos resultantes se calcula un n de rayo ordinario el cual no depende del ángulo como se ve en la Ec.5.

$$n = \sqrt{A + \frac{B}{(\lambda - C) - D\lambda}}. \quad (3)$$

Los coeficientes de la ecuación de Sellmeier son:

Ordinario $A_o=2.7359$; $B_o=0.01878$; $C_o=0.01822$; $D_o=0.01354$;

Extraordinario $A_e=2.3753$; $B_e=0.01224$; $C_e=0.01667$; $D_e=0.01516$;

$$ne = \sqrt{Ae + \frac{Be}{(\lambda^2 - Ce) - De\lambda^2}},$$

$$ne(\theta) = no \sqrt{\frac{1 + \tan^2 \theta}{1 + no^2 \tan^2 \theta / ne^2}}. \quad (4)$$

$$no = \sqrt{Ao + \frac{Bo}{(\lambda^2 - Co) - Do\lambda^2}}, \quad (5)$$

- Cálculo del ángulo del par de fotones, anunciado y señal, depende de los índices de refracción y de las longitudes de onda.

$$\theta_1 = \arcsin \sqrt{\frac{x_1^2 + y_1^2}{x_1^2 + y_1^2 + z^2}}, \quad (6)$$

$$\theta_2 = \arcsin \frac{n_1 \sin \theta_1}{\sqrt{n_1^2 + \frac{n_3^2 \lambda_1^2}{\lambda_3^2} - \frac{2n_1 n_3 \lambda_1 \cos \theta_1}{\lambda_3}}}. \quad (7)$$

- Se utiliza una función para una corrección de los índices de refracción dependiendo la temperatura.

$$no = no - 9.3 * 10^{-6} (T - 20),$$

$$ne = ne - 16.6 * 10^{-6} * (T - 20). \quad (8)$$

$$(9)$$

- Se llama una función para calcular el ángulo final de detección al cambiar de medio, es decir, del cristal al aire aplicando ley de Snell. En la Ec 10 $n_a = 1.00029$.

$$\theta_f = \arcsin n \frac{\sin \theta}{n_a}. \quad (10)$$

Para calcular las posiciones finales se aplica la condición de conservación de momento, en esta se tiene k como vector de onda y $k_i = k_p$ debe ser igual a $k_f = k_1 + k_2$, las ecuaciones 11 muestran esto.

$$ky = k1 \sin \theta_1 - k2 \sin \theta_2,$$

$$kx = k1 \cos \theta_1 + k2 \cos \theta_2,$$

$$ktotal = \sqrt{ky^2 + kx^2},$$

$$\Delta k = ktotal - kp. \quad (11)$$

Luego de tener esto realizado, se calcularon los tamaños del aro a diferentes distancia y a diferentes ángulos como se observa en la Fig.21.

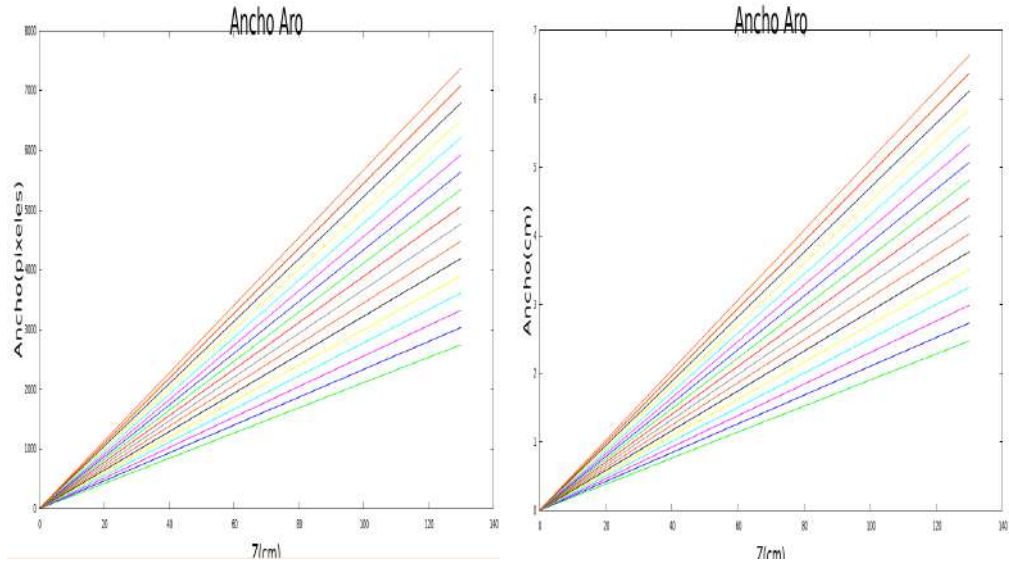


Figure 21: Gráfica de tamaño del aro. Izquierda: en pixeles. Derecha: en cm. El tamaño está medido para ángulos entre 1° y 3° de apertura del cono de fotones generado. El ancho total sería el dato que se tiene por 2.

2.1.1 Simulaciones

Las simulaciones obtenidas para los diferentes casos son:

Ángulo salida	Parámetros
$\theta=1.77^\circ$	$\theta=29.2^\circ$ Precisión: 0.001 x1 : Pasos de 0.001 y1 : Pasos de 0.001 $l_p = 0.405$ $z = 0.5$

Table 2: Parámetros círculo 1.

Ángulo salida	Parámetros
$\theta=0.69^\circ$	$\theta=28.9^\circ$ Precisión: 0.0001 x1 : Pasos de 0.001 y1 : Pasos de 0.001 $l_p = 0.405$ $z = 0.5$

Table 3: Parámetros círculo 2.

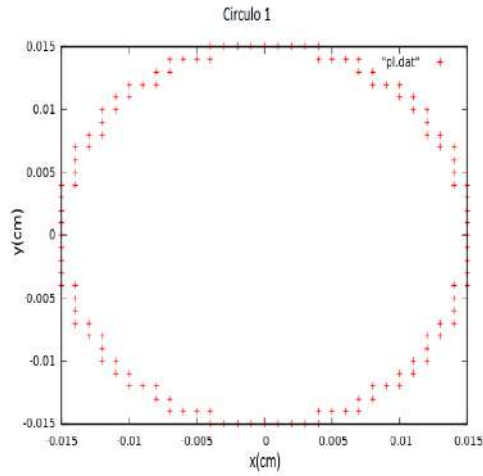


Figure 22: Simulaciones de los círculos que deberían observarse en la cámara según los parámetros de la Tabla2.1.1.

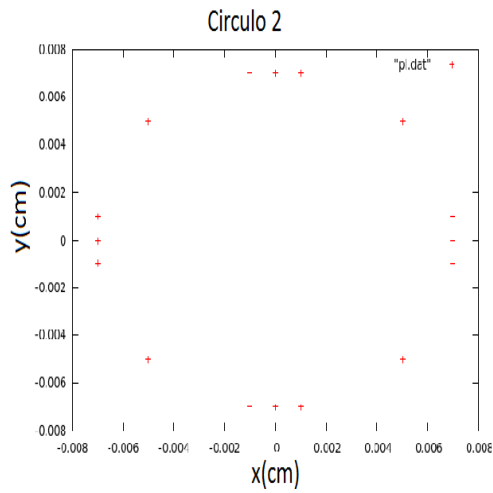


Figure 23: Simulaciones de los círculos que deberían observarse en la cámara según los parámetros de la Tabla2.1.1.

Ángulo salida	Parámetros
$\theta=2.79^\circ$	$\theta=30.5^\circ$ Precisión: 0.0001 x1 : Pasos de 0.001 y1 : Pasos de 0.001 $l_p = 0.405$ $z = 0.5$

Table 4: Parámetros círculo 3.

En los 3 primeros círculos se observa la dependencia del ángulo de salida de los fotones generados en el cristal por *SPDC* tipo I, y el ángulo del eje óptico del cristal.

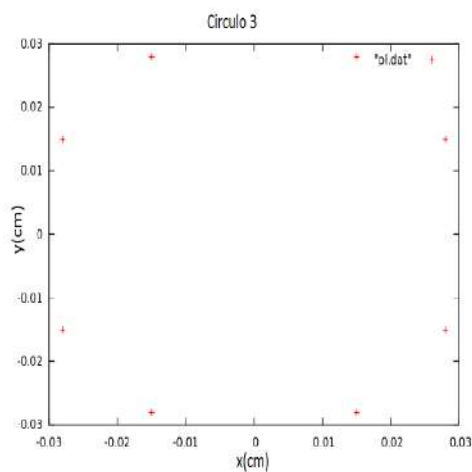


Figure 24: Simulaciones de los círculos que deberían observarse en la cámara según los parámetros de la Tabla2.1.1.

Valores iniciales	Pasos
$\theta=29^\circ$	0.1
Precisión: 0.0001	0
$x1 = -2.5$	$x1$: Pasos de 0.001
$y1 = -2.5$	$y1$: Pasos de 0.001
$l_p = 0.404$	0.001
l_{1min}	0.003
$z = 0.5$	0

Table 5: Parámetros círculo 4. En este se varían todos los parámetros. El círculo interno corresponde a 807nm y el externo a 809nm.

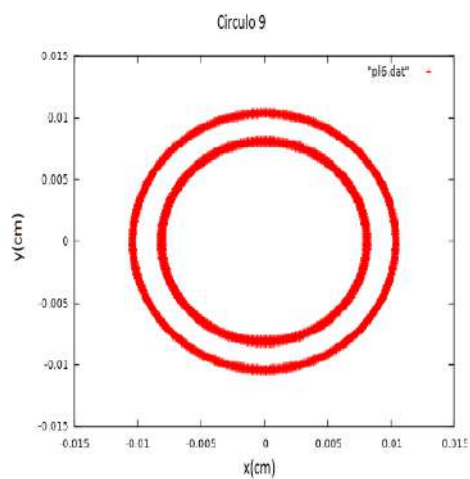


Figure 25: Simulaciones de los círculos que deberían observarse en la cámara según los parámetros de la Tabla2.1.1.

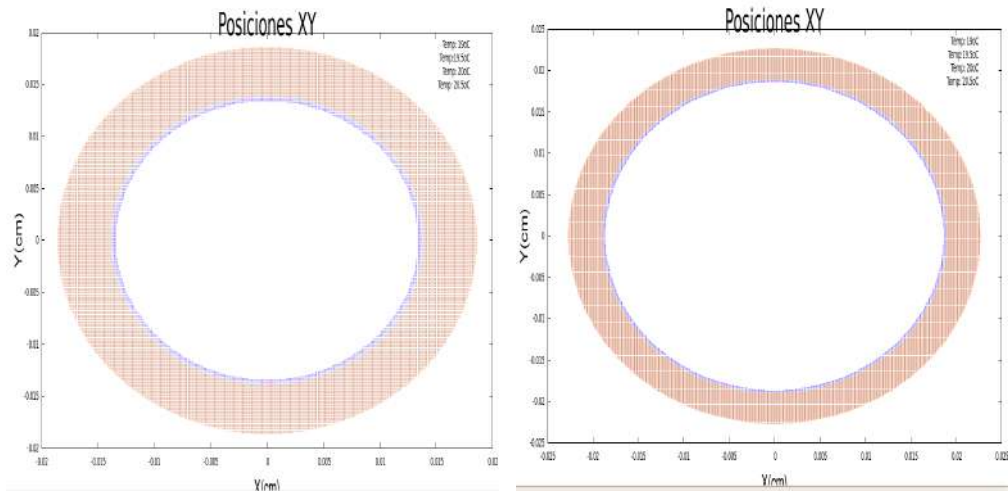


Figure 26: Simulaciones para: $z=1\text{cm}$, Temperatura entre 19°C y 21°C en pasos de 0.5, ángulo eje óptico cristal entre 29° y 29.2° en pasos de 0.1, longitud de onda láser entre 404nm y 407nm en pasos de 1. Derecha: Longitud de onda fotón señal 807nm . Izquierda: Longitud de onda fotón señal 809nm . Pasos entre x y y de 0.0001

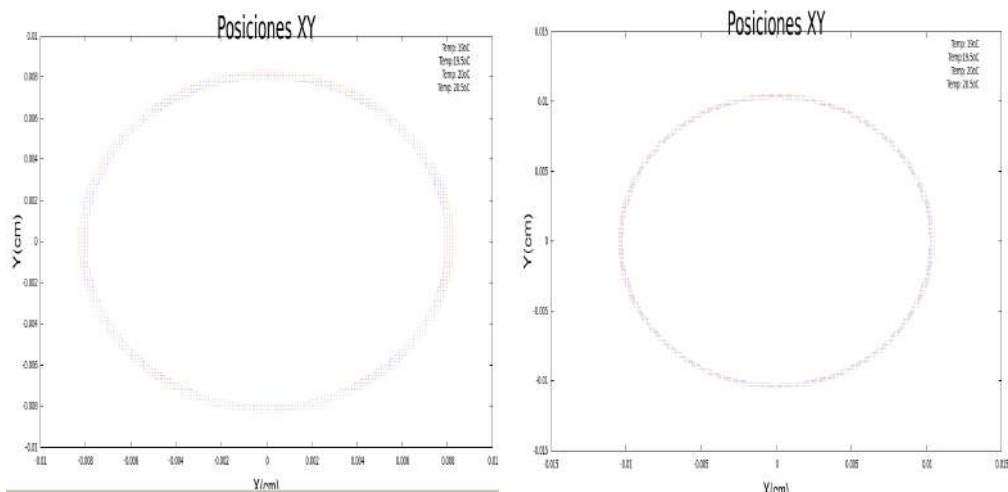


Figure 27: Simulaciones para: $z=1\text{cm}$, Temperatura entre 19°C y 21°C en pasos de 0.5, ángulo eje óptico cristal entre 29° y 29.2° en pasos de 0.1, longitud de onda láser entre 404nm y 407nm en pasos de 1. Derecha: Longitud de onda fotón señal 807nm . Izquierda: Longitud de onda fotón señal 809nm . Pasos entre x y y de 0.001

2.2 Alineación aro

Con los cálculos realizados, se encuentra que el ángulo en el cual salen los fotones producidos en el cristal esta en 2.106° aproximadamente. Se ubica el espejo 2 y el cristal en los ángulos deseados para que el láser salga del cristal a 2.106° y la cola interna del aro quede sobre el eje de la mesa en el cual se encuentra el espejo.

Se reajustan las posiciones del espejo y el cristal y se comienza de nuevo con un barrido de distancias utilizando la cámara CCD, sin embargo ya no solo debe observarse el aro, existen ahora 2 variables importantes que tienen que ser controladas: el tamaño del aro y la alineación de la cola interna del mismo con

el eje de la mesa. Se tiene que a medida que la cámara se aleja del cristal, el aro se agrandaba y su cola se corre del eje. Para controlar estos factores se tiene la gráfica (Fig21) en donde se observa la relación entre el tamaño y z (distancia entre la cámara y el cristal). Esta relación se encuentra también en función del ángulo. Modificación la posición del espejo 2, se deben ir tomando fotos y en cada una observar la variación en tamaño y alineación para realizar los ajustes respectivos. La Tabla 2.2 muestra el tamaño que se obtuvo para diferentes distancias y el real. La diferencia entre el tamaño experimental y el teórico se debe principalmente a la dificultad de encontrar el centro exacto de cada rama del aro debido a su grosor. Una muestra de los aros medidos se encuentra en la Fig28, se observa que para distancias mayores a 21cm ya no es posible medir el tamaño del aro debido a las limitaciones en dimensiones de la cámara.

Distancia en z (cm)	Tamaño experimental (pixeles)	Tamaño teórico (pixeles)
6	385	373.43
8	873	497.9
13	938	809.1
17	914	1058.05
17.5	978	1089.17
15.5	1147	964.6
20.5	1274	1244.77

Table 6: Tmaño del aro en pixeles medidos para diferentes distancias entre la cámara y el cristal.

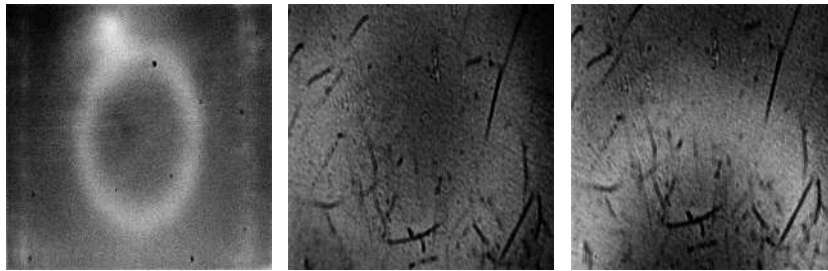


Figure 28: **Izquierda:** Cámara a 6cm del cristal. **Centro:** Cámara a 17.5cm del cristal. **Derecha:** Cámara a 20.5cm del cristal.

Una vez el aro se encuentra alineado se coloca el filtro de 810nm con el fin de obtener un aro mucho más fino en grosor, los resultados obtenidos se muestran en la Fig??. Al realizar la comparación con el aro que se obtiene con el filtro de 710nm se observa que el aro no disminuye su grosor, solo su intensidad.

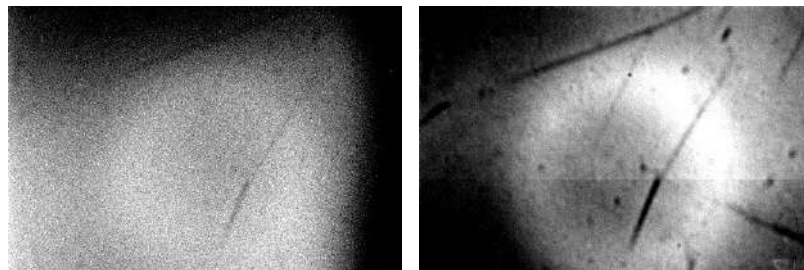


Figure 29: **Izquierda:** Foto tomada con filtro pasabandas de 810nm a 8cm del cristal. **Centro:** Cámara a 17.5cm del cristal. **Derecha:** Foto tomada con filtro pasa-altas de 710nm a 8cm del cristal.

Con el aro alineado (Fig30), se colocan dos iris, unos entre el espejo 2 y el cristal y otro al final de la línea a 2.106° del eje z como se muestra en el esquema de la Fig. 31. Esto con el fin de que cada vez que se retome el experimento se pueda verificar primero la alineación del láser y así asegurarse que esta sea la adecuada.

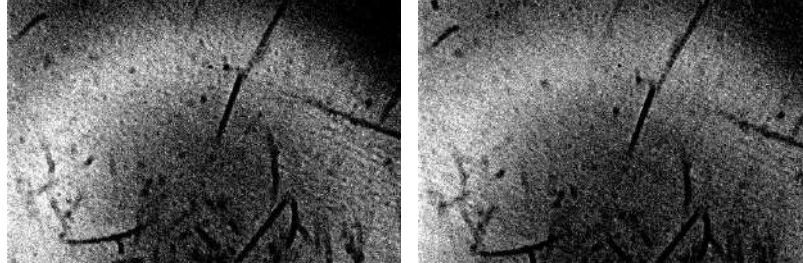


Figure 30: Aro fotones correlacionados producidos por SPDC tipo I, parte lateral izquierda del aro. Izquierda: Distancia de 18.5cm entre la cámara y el cristal. Derecha: Distancia de 22.5cm entre la cámara y el cristal. Las fotos se tomaron en baja resolución.

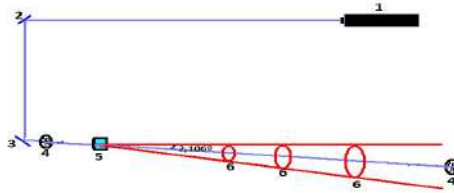


Figure 31: Montaje experimental esquemático 3. 1. Láser 405nm. 2. Espejo BK7, refleja 99.5% a un ángulo de 45° . 3. Espejo dinámico. 4. Iris, como marcadores de trayectoria. 5. Cristal BBO tipo I.

Una vez el aro está alineado, se toma la foto de la cola opuesta para asegurarse de que todo esta correcto Fig.32, es decir la cola debe encontrarse en la posición calculada teóricamente (1.65cm a una distancia de 22.5cm del cristal.)

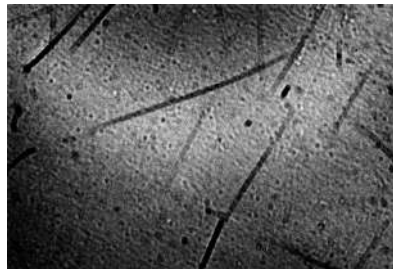


Figure 32: Cola externa del aro con una distancia entre la cámara y el cristal de 22.5cm

2.3 Detección

Una vez alineado el aro, el siguiente paso es la detección, este proceso se divide en 3 partes fundamentales alineación de acopladores con láser de prueba, alineación de acopladores con fotones correlacionados y maximización de coincidencias.

2.3.1 Alineación acoples con láser de prueba

Se montan 2 acoples para fibra óptica en bases xy que tienen ajuste micrométrico. Se colocan los soportes xy en la mesa en las posiciones indicadas en la Tabla 7.

Fibra	z(cm)	x(cm)
Fibra 1 (fotón anunciado)	86	± 0.3
Fibra 2 (fotón señal)	108	7.94

Table 7: Ubicación fibras.

Luego con el láser de 633nm se realiza una alineación previa de los acoples de la fibra óptica. Para esto se coloca un espejo extra en la línea del láser y otro entre el espejo 2 y el cristal y se da la dirección y altura correcta (11.6 ± 0.1 cm) al láser de prueba. Éste incide en el lente del acople y usando los tornillos de ajuste micrométrico del soporte xy se ajusta el acople hasta maximizar la potencia del láser transmitida a través del lente, esta potencia es medida con el medidor de potencia óptica.

Una vez la potencia se encuentra maximizada, se coloca la fibra al acople y se verifica que la luz del láser llegue al otro extremo. Si esto ocurre, entonces con el medidor de potencia óptica se miden intensidades hasta llegar a una potencia máxima, por lo menos el 60% de la que se mide sin fibra, En este ajuste de precisión influyen también los ajustes que se realizan en la distancia focal, la inclinación y la ubicación del lente del acople.

Sin fibra	
Acople 1	Acople 2
810mW	750mW
Con fibra	
Fibra 1	Fibra 2
500mW	500mW

Table 8: Ubicación fibras.

2.3.2 Alineación fibra con fotones correlacionados (SPDC tipo I)

Una vez la potencia del láser de 633nm que está incidiendo en la fibra, se acoplan los detectores con las fibras ópticas, Se conecta la fibra cercana al detector de referencia 17561 y la lejana al detector de referencia 17564 (es muy importante no intercambiar detectores y fibras debido a sus características específicas). Con todas las luces apagadas para evitar que los detectores se dañen, se conecta cada detector y se empiezan a mirar los conteos, estos son registrados por la FPGA a la que se encuentran conectados los detectores (Ver Fig33). esta tarjeta fue programada para entregar el número de conteos y coincidencias entre los 2 detectores en un determinado intervalo de tiempo.

En este caso trabajamos con detecciones cada segundo y retardos (diferencia en tiempo de llegada entre el fotón señal y el anunciado a los detectores) entre 1 y 10, donde cada retardo equivale a 1.8ns.

La Tabla 9 registra los resultados obtenidos en las 2 primeras tomas de datos. Se registran conteos/seg en cada canal.

El canal 0 pertenece a la fibra cercana (fotón anunciado) y el canal 1 a la fibra lejana (fotón señal). Los datos de la primera toma muestran claramente que el detector estaba mal ubicado y solo era luz de otras fuentes, la segunda toma permite ver como la alineación de las fibras llevó a buenos resultados como se observa en las Fig34., Fig35. y Fig36.

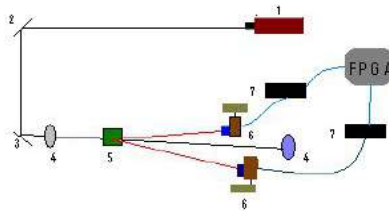


Figure 33: Esquemático alineación fibras ópticas con láser de 405nm. 1.Láser 405nm. 2.Espejo 1. 3. Espejo 2. 4. Iris. 5. Cristal. 6. Acoples fibra óptica. 7. Detectores.

Table 9: Conteos/Seg. Registro de datos con la pantalla del computador prendida.

Toma No	Canal 0	Canal 1
1	847	1151
2	10000	8500

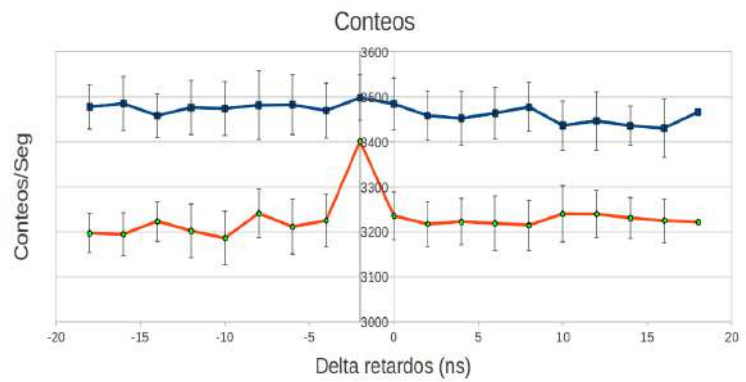


Figure 34: Barrido en diferencia de retardos entre los canales, cada canal variando de 1 a 10 retardos, cada retardo equivale a 1.8ns. Se tomaron 10 muestras por cada delta de retardo.

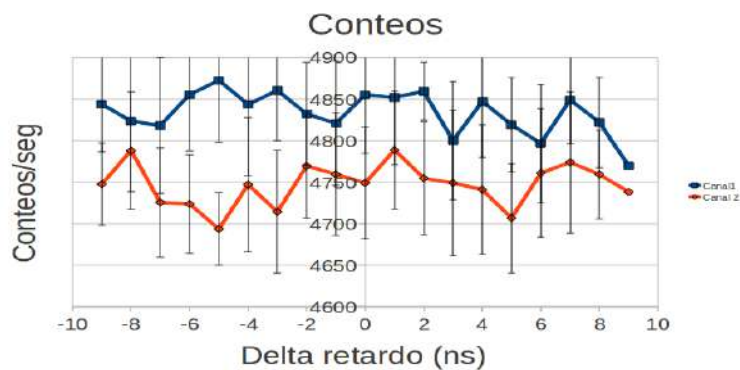


Figure 35: Barrido en diferencia de retardos entre los canales, cada uno variando de 1 a 10 retardos, cada retardo equivale a 1.8ns. Se tomaron 10 muestras por cada delta de retardo.

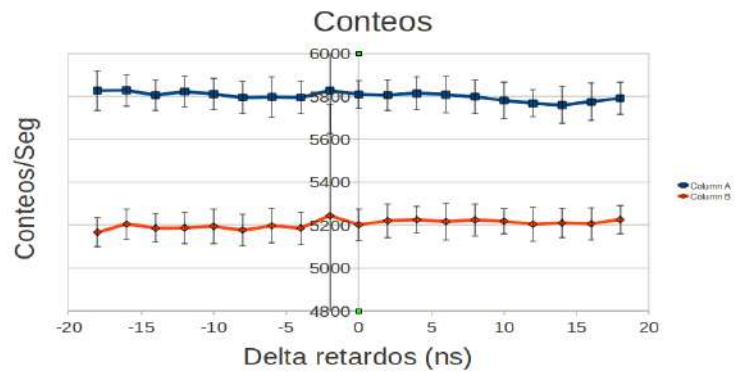


Figure 36: Barrido en diferencia de retardos entre los canales, cada uno variando de 1 a 10 retardos, cada retardo equivale a 1.8nsns. Se tomaron 50 muestras por cada delta de retardo.

2.3.3 Maximización coincidencias

A medida que los conteos aumentan, las coincidencias también lo hacen. En la Tabla 10 se observan las diferentes tomas de datos con la pantalla apagado (fuente principal de ruido).

Archivos	Canal 1	Canal 2	Coincidencias	Descripción
l . txt	3466.10	3228.83	1	Se toma un barrido de retardos entre 1 y 10 para cada canal, se obtienen 19 archivos en total. 10 datos por archivo
l4 . txt	4833.77	4746.99	13.7	Se toma un barrido de retardos entre 1 y 10 para cada canal, se obtienen 19 archivos en total. 10 datos por archivo
s . txt	5800.32	5204.54	307	Se toma un barrido de retardos entre 1 y 10 para cada canal, se obtienen 19 archivos en total. 50 datos por archivo
j . txt	8895.96	6299.76	482.31	Toma de 300 datos con una diferencia de retardos de -1. Ch0 = 1 Ch1 = 2

Table 10: Serie de archivos tomados con sus respectivas especificaciones.

A medida que se maximizaron las coincidencias, se buscó la diferencia en retardos de los 2 canales óptima para cada canal, los resultados obtenidos se encuentran en las gráficas de las figuras Fig37., Fig38 y Fig39.

3 Doble rendija

El montaje de doble rendija planteado inicialmente se muestra en la figura 40, con éste montaje se supone que al realizar el barrido en posiciones, debe observarse el patrón de interferencia mostrado en la Fig4. que se encuentra en la sección marco teórico 1.

Una vez implementado se realizaron 2 observaciones:

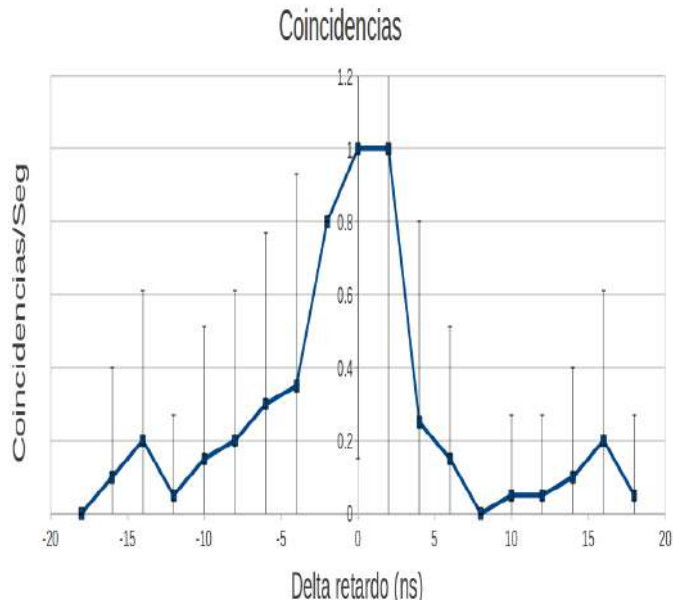


Figure 37: Coincidencias/seg vs Delta retardo (ns). Se observa como para un delta de retardo de 0 (Canal 0 en 1 y canal 1 en 1) tenemos el máximo de coincidencias.

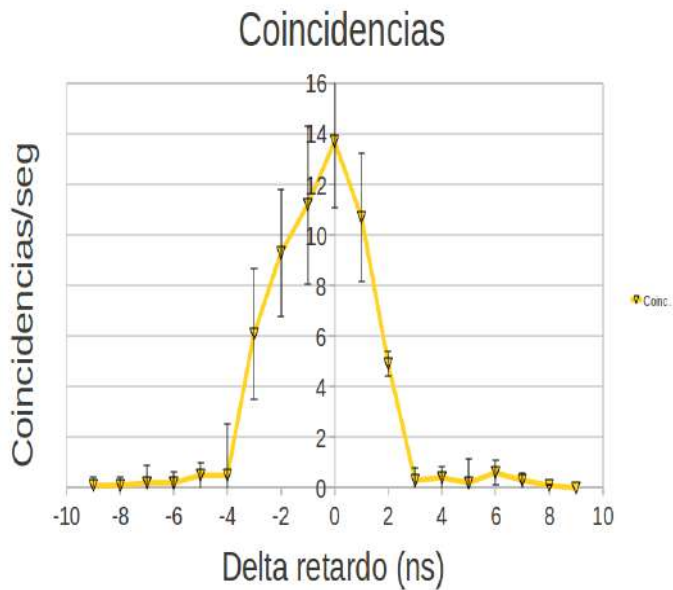


Figure 38: Coincidencias/seg vs Delta retardo (ns). Se observa como para un delta de retardo de 0 (Canal 0 en 1 y canal 1 en 1) tenemos el máximo de coincidencias.

1. Si se usa el láser de HeNe de 633nm para tratar de alinear el máximo central del patrón de interferencia, se observa que este patrón es muy delgado respecto a la apertura del lente y por lo tanto solo se esperaría observar un gran máximo resultante de la suma de todos los máximos que entran en la fibra y el resto del patrón casi en ceros al realizar el barrido de posiciones mencionado.
2. Se realizan los cálculos teóricos con lo datos de la Tabla11 y se obtiene una separación entre máximos

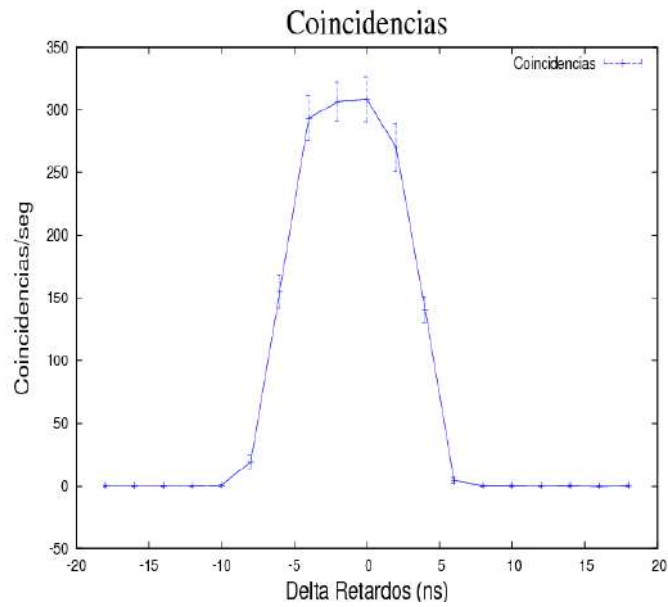


Figure 39: Coincidencias/seg vs Delta retardo (ns). Se observa como para un delta de retardo entre 0 y -1 (Canal 0 en 1 y canal 1 en 1 y canal 0 en 1 y canal 1 en -1 respectivamente) tenemos el máximo de coincidencias.

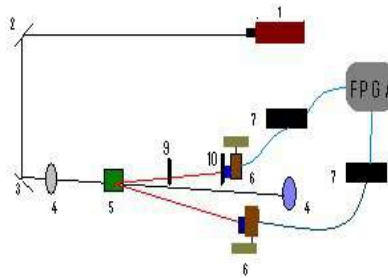


Figure 40: Esquema montaje doble rendija. 1. Láser 405nm. 2. Espejo 1. 3. Espejo 2. 4. Iris. 5. Cristal. 6. Acoples fibra óptica. 7. Detectores. 9. Doble rendija. 10. Rendija sencilla

del patrón de interferencia de 1.024mm.

Distancia entre la fibra cercana y la doble rendija	45cm
Separación entre las rendijas	0.356mm
Longitu de onda	810nm

Table 11: Datos rendijas.

Teniendo en cuenta las 2 observaciones anteriores, se plantea una posible solución: colocar una rendija sencilla de ancho 0.085mm pegada al filtro que se encuentra en el acople de la fibra cercana.

Se implementa la solución tentativa pero se encuentra un segundo inconveniente: el número de conteos y coincidencias en la fibra cercana cae notablemente, esto se muestra en la Fig41. El número de

coincidencia es mínimo, para observar el patrón se necesitan mas de 10 coincidencias por lo menos, se quita entonces la rendija y se intenta optimizar de nuevo conteos y coincidencias logrando casi 500 coincidencias. Se toman los datos con y sin rendija sencilla y lo que se obtiene esta en las Fig42 y Fig43 muestra los datos que se tomaron para un barrido de distancia de 5mm.

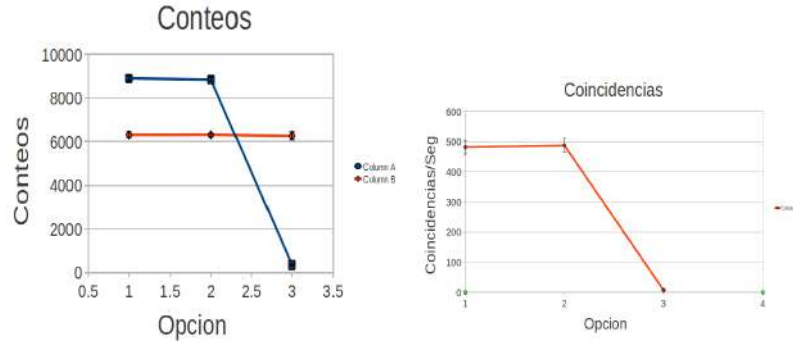


Figure 41: Temos 3 puntos en x: 1 corresponde a retrasos de 1 en cada canal y el detector sin rejilla, el 2 corresponde a un retardo de 1 en el canal 0 y de 2 en el canal 1 sin rejilla, y el 3 corresponde a los mismos retardos de 2 pero con rejilla. Se hace notorio el decrecimiento tanto en conteos como en coincidencias por cada segundo cuando se coloca la rejilla. Se toman 300 datos en total para cada punto.

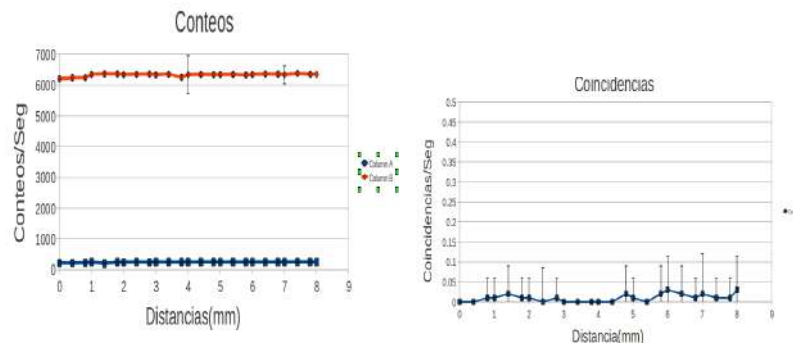


Figure 42: Datos obtenidos para el experimento de doble rendija. La separación entre la doble rendija y la primera fibra es de 45cm. Se toman 100 datos para cada punto en x el barrido se realiza entre 3mm y 8mm en pasos de 0.2mm. Se utiliza rendija sencilla

4 Análisis

1. **Fotones anunciados** Respecto al montaje de la fuente de fotones anunciados se tienen varios resultados:

- (a) Observación del aro: En la Fig44. se observa claramente el aro producido por *SPDC* al incidir el láser de 405nm sobre el cristal BBo tipo I como se espera teóricamente. Se observa no solo todo el aro, sino también la variación en la curvatura del mismo debido al aumento en su tamaño al alejar la cámara.
- (b) Programa para simulaciones: Luego de observar el aro, fue muy importante la implementación del programa en C que permitió el cálculo del ángulo de salida de los fotones correlacionados. A partir de esto se logra una correcta alineación del cristal.

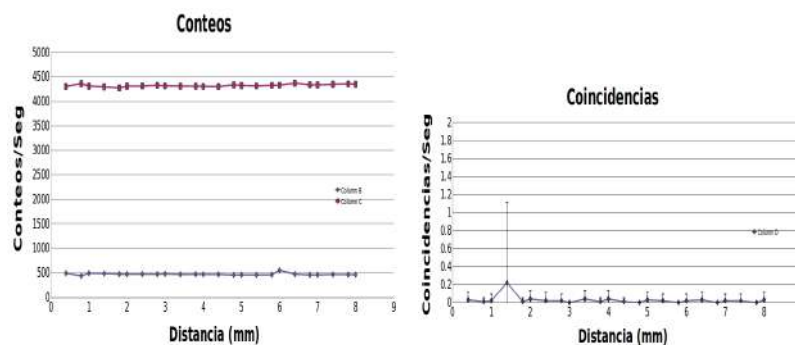


Figure 43: Datos obtenidos para el experimento de doble rendija. La separación entre la doble rendija y la primera fibra es de 45cm. Se toman 100 datos para cada punto en x el barrido se realiza entre 3mm y 8mm en pasos de 0.2mm. No se utiliza rendija sencilla

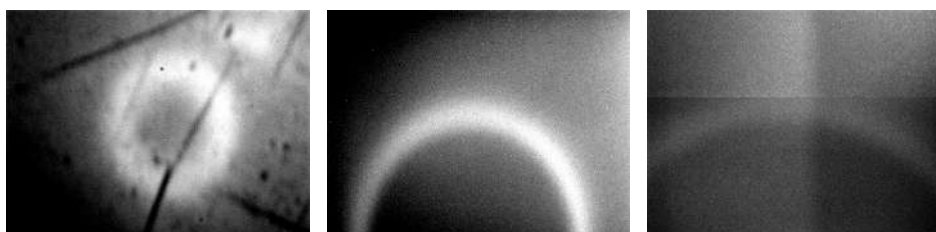


Figure 44: Izquierda: Aro fotones correlacionados producidos por SPDC tipo I distancia entre el cristal y la cámara de 8cm, baja resolución en la imagen. Centro: Parte lateral izquierda del aro. Derecha: Se observa como al alejar la cámara la curvatura del aro varía, esta es una imagen a 7cm del cristal.

- (c) Alineación del aro: Este es uno de los logros más importantes del proyecto, el cual requirió de la mayor parte del semestre. Con el ángulo estimado de simulación, se ajustó el montaje y luego realizando pequeñas variaciones se logró que la cola interna del aro (fotón anunciado) no se desviara a lo largo del trayecto. La Fig30 muestra la comparación entre 2 aros tomados a distancias diferentes y como no se desvía la cola del aro.
- (d) Detección: Dentro de esta etapa se obtuvieron diferentes resultados.
 - i. Se vió una clara dependencia entre Conteos/seg y la producción de fotones anunciados. Esto, se observó al analizar los cambios notorios en conteos y coincidencias entre los datos con el láser encendido y apagado. El factor clave que indica que son los fotones correlacionados que se esperaban observar, es que las coincidencias inmediatamente se van a cero con el láser apagado.
 - ii. Maximización de conteos: Luego de corregir la ubicación de los acoples de fibra óptica como se menciona en la sección de procedimiento experimental 2 se logra un máximo de conteos/seg de 5800. Esto se muestra en la Tabla10.
 - iii. Maximización de coincidencias: La Tebla10 muestra el promedio de coincidencias/seg más alto alcanzado, este se encuentra en 482.31 para 8895.96 conteos/seg en la fibra cercana y 6299.76 conteos/seg en la fibra lejana. La Tabla12 muestra los porcentajes alcanzados.

2. Doble rendija

8895.96	5.48%	Utilizando los conteos del canal 1.
6299.76	7.74%	Utilizando los conteos del canal 2.
7597.86	6.34%	Utilizando el promedio de conteos.

Table 12: Porcentajes

Aunque resulta muy difícil concluir sobre este experimento debido al bajo número de coincidencias que se tenían, hay 2 resultados que vale la pena resaltar:

- (a) Montaje con rendija sencilla y rendija doble. El patrón de interferencia obtenido se ve en la Fig4 las Tablas 13 y 14. que contiene los 6 máximos y 4 ceros aparentes respectivamente. También tienen la separación entre máximos o mínimos. Teniendo en que la separación entre máximos teóricamente se calculó y debe ser de 1.024mm, se halla el error relativo y como se observa, se encuentra alrededor del 20% en la mayoría de los casos de los máximos y del 40% en los mínimos.

No. Dato	Distancia (mm)	Δ distancia (mm)	Error relativo
5	1.4	1.4	36.71%
9	2.8	2	95.31%
15	4.8	1.2	17.18%
19	6	0.8	21.87%
22	6.8	1.2	17.18%
26	8		

Table 13: Porcentajes Máximos

No. Dato	Distancia (mm)	Δ distancia (mm)	Error relativo
2	0.4	2	95.31%
8	2.4	1.4	36.71%
12	3.8	1.6	56.25%
18	5.4		

Table 14: Porcentajes Mínimos

Este error se debe a 2 factores: bajo número de coincidencias y pocos datos. Entonces, se pueden mejorar las coincidencias (situación bastante probable como se ve a medida del informe) y tomar un mayor número de dato. De esta forma, la estadística del experimento mejorará considerablemente permitiendo establecer de manera más confiable la ubicación de los máximos y los mínimos.

- (b) Montaje sin rendija sencilla.

En la Tabla15. se tiene el registro de 7 máximos observados, la distancia entre ellos y el error relativo. De la misma forma, en la Tabla16 se tiene el registro de los ceros observados (mínimos), la distancia entre ellos y el error relativo. Al igual que para el montaje con rendija sencilla, resulta difícil concluir algo concreto, lo único claro es que se observa un pico bastante pronunciado en 1.4mm, el resto parece tender a cero. Además de tener 6 ceros bastante definidos y un porcentaje de error entre 4 de ellos de el 2.34%, se podría pensar que es un indicio de que si es posible mejorar el experimento enfocándose al incremento en conteos y coincidencias para lograr observar el patrón deseado.

- (c) **Línea del tiempo:**

- Semana 1 a 3: Documentación y primera implementación del montaje.
- Semana 4 a 6: Barrido en distancias y programación en C.
- Semana 7 a 8: Programa en C.

No. Dato	Distancia (mm)	Δ distancia (mm)	Error relativo
4	1.4	0.6	41.40%
6	2	1.4	36.71%
10	3.4	0.6	41.40%
12	4	1	2.34%
15	5	1.4	36.71%
19	6.4	1.6	56.25%
25	8		

Table 15: Porcentajes Máximos

No. Dato	Distancia (mm)	Δ distancia (mm)	Error relativo
5	1.8	1.2	17.18%
9	3	1.8	75.78 %
14	4.8	1	3.34%
17	5.8	1	2.34
20	6.8	1	2.34%
23	7.8		

Table 16: Porcentajes Mínimos

- Semana 9 a 11: Alineaci3n aro.
- Semana 12 a 13: Alineaci3n acopladores y fibras.
- Semana 13 a 15: Detecci3n. Informe Final.

5 Perspectivas

La fuente de fotones anunciados correlacionados que se implement3, arroj3 muy buenos resultados, sin embargo las perspectivas que existen para su mejoramiento son bastante buenas, el mayor enfoque que se debe dar es mejorar el número de coincidencias y conteos en cada segundo, es muy probable que si se le dedica un poco más de tiempo se logren muy buenos resultados.

Una vez mejorado el porcentaje de coincidencias que se tiene y de nuevo con mucho más tiempo para poder aumentar el número de datos que se pueden tomar, se puede hacer más fina la divisi3n en posici3n, se pueden realizar algunos experimentos de interferometría utilizando los fotones anunciados producidos.

Dentro de los posibles experimentos de interferencia encontramos, a parte del de doble rendija que esta sujeto a mejoras notables, se encuentra el borrador cuántico y el interfer3metro de Mach Zehnder.

El borrador cuántico, tiene como objetivo principal demostrar como un fot3n interferir con el mismo s3lo si los caminos por los cuales puede atravesar son indistinguibles, de lo contrario, si hay algún mecanismo de detecci3n justo detrás de la rendija que indique que camino toma el fot3n este no interferir con el mismo. El experimento este consiste en un interfer3metro de doble rendija sobre el cual se haran incidir los fotones de 810nm generados con la fuente y tratar de identificarse por cual de las dos ranuras pas3 el fot3n; sin embargo el experimento no demuestra que si se logra identificar el camino el fot3n incidente no interferir con 3l mismo. Para marcar los caminos utilizamos polarizadores, de tal forma que definimos la polarizaci3n de salida de cada ranura, polarizaci3n horizontal o vertical únicamente, quedando los dos caminos posibles para que tiene el fot3n distinguibles.

El experimento de Mach Zehnder tiene como objetivo principal medir el corrimiento en la fase entre dos rayos de luz coherente colimados. El montaje se muestra en la figura 45, la idea básica del experimento es alterar la fase de uno de los caminos por algún múltiplo entero de la longitud de onda y al final

detectar que llega a cada detector y en que tiempos.

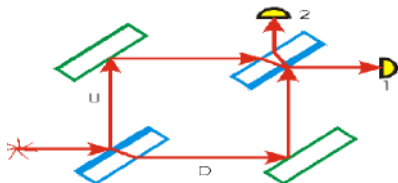


Figure 45: Montaje del interferómetro de Mach Zehnder. Cuadro verde espejo, cuadro azul espejo que refleja solo las mitad de la luz incidente, el amarillo es el detector.

6 Conclusiones

A partir del procedimiento experimental que se llevó a cabo durante el semestre y las explicaciones de el asesor, se logró la construcción de la fuente de fotones anunciada, se alcanza entonces el objetivo principal y se realizan algunas de las aplicaciones propuestas.

Una de las partes esenciales del proyecto se encuentra en la familiarización que se logró alcanzar con lo elementos de laboratorio, desde su ficha técnica, su elección para este proyecto y su funcionamiento. Ésto, permitió dos procesos claves en el proyecto: primero se mejoró a través del semestre la eficiencia en la implementación del montaje, su calibración y la toma de cada uno de los datos. Segundo, permitió un análisis más real y con mejores argumentos de cada uno de los resultados obtenidos, esto principalmente porque un buen conocimiento del montaje y sus elementos hace más claro que posibles errores experimentales se están induciendo.

En la parte teórica, quedan claras las razones técnicas y teóricas por las cuales se utilizaron los elementos asignados, cada uno con especificaciones especiales. Igualmente, se entendió la teórica básica acerca de birrefringencia y cada uno de los conceptos teóricos que fueron necesarios para la construcción y análisis de la fuente de fotones.

Se implementa un programa en C que permite realizar diversas simulaciones de aros producidos con diferentes parámetros, estas simulaciones son parte clave en el proyecto, a través de estas, se realiza una comparación entre la parte teórica y la parte experimental, lo que permite entender que tan acertados fueron los resultados obtenidos.

Aplicando la teoría, los resultados de las simulaciones y con los elementos de laboratorio adecuados, durante la construcción de la fuente se alcanzan varias metas importantes. Lo primero que se logra es la observación clara del aro de fotones esperado con la ayuda de la cámara CCD. Se comprueba también experimentalmente la teoría de *SPDC*, esto observando diferentes factores: la polarización de los fotones producidos es efectivamente ortogonal a la de los fotones incidentes, para *SPDC* tipo I específicamente, los fotones salen con la misma polarización, como sucedió en nuestro montaje. Igualmente se comprueba la correlación que existe entre los fotones producidos, esta se hace clara ya que si el aro tiene las características que se calcularon con el programa en C entonces, debe cumplir con todo cada una de los postulados utilizados en las simulaciones, postulados que provienen de asumir la correlación de los fotones.

Se comprueba luego de la alineación correcta que el ángulo obtenido de simulaciones y el ángulo final con el cual se generan los datos es el mismo, 2.106° , un resultado más que soporta la comprobación experimental de la teoría de *SPDC* tipo I.

Comparando simulaciones y resultados obtenidos, se hace clara la dependencia casi nula que existe entre el ángulo de salida de los fotones producidos por *SPDC* con la temperatura, aunque si existe cierta

variación, para las temperaturas que se trabajan en el laboratorio, todas cercanas a 20°C, la corrección que debe hacerse es prácticamente despreciable. Por el contrario, si se observa una clara dependencia en la posición del cristal, esto aumenta o disminuye el ángulo de salida de los fotones anunciados, justo como se esperaba después de observar las simulaciones.

Se alcanza un máximo de conteos/seg de 895.96 en la fibra que detecta el fotón anunciado, y de 6299.76 en la fibra que detecta el fotón señal. El número de coincidencias logrado es de 482.31 cada segundo, esto, para un retardo de 1 en la fibra del fotón anunciado y 2 en la fibra del fotón señal. Con estos datos el porcentaje de coincidencias en el pico es de más del 7.5%, por lo que se ha superado considerablemente el valor mínimo que teníamos como meta de 4%.

Finalmente en el experimento de doble rendija, los resultados que se obtienen no son totalmente claros. La identificación del patrón de interferencia no se hace obvia en ninguno de los 2 montajes planteados, sin embargo, analizando los resultados, se puede concluir que el problema está en mejorar la estadística y precisión del procedimiento, para esto es necesario tomar una mayor cantidad de datos para cada posición, incrementar las coincidencias y hacer más finos los pasos dados entre cada posición registrada. Es debido a la baja estadística que se tuvo que no es posible ubicar claramente máximos y mínimos, sin embargo si tratamos de realizar esto, los porcentajes de error que se encuentran entre la posición real donde debería verse cada máximo (mínimo), en su mayoría, no superan el 40%, porcentaje que no resulta tan alto teniendo en cuenta la incertidumbre propia del experimento

7 Bibliografía

1. Galvez, J. 2010, AJP. vol.78, 5.
2. Down conversion. Tomado de <http://departments.colgate.edu/physics/research/PhotonrootApparatusspdc.htm>. Agosto de 2010.
3. Simulaciones de David Guzmán.
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. Galvez, J, et. al., 2010, AJP. vol.73, 127.
7. Manual de mineralogía By Cornelis Klein, Cornelius S. Hurlbut pag 327.
8. <http://www.upscale.utoronto.ca/PVB/Harrison/MachZehnder/MachZehnder.html>
9. Optics and photonics : an introduction Graham-Smith, Francis, Sir, 1923-