

Medición de sección eficaz de absorción de pares de fotones  
correlacionados en moléculas de Rodamina B



Estudiante: Juan Camilo Daza - 201813296

Asesor: Mayerlin Nuñez Portela Ph.D.

Revisor: Dr. Alejandro García

Proyecto Experimental

Bogotá

20 de mayo de 2022

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>8</b>
1.1. Marco Teórico . . . . .	8
<b>2. Objetivos</b>	<b>13</b>
<b>3. Metodología</b>	<b>13</b>
3.1. Montaje experimental . . . . .	13
3.2. Análisis de datos . . . . .	15
<b>4. Medición</b>	<b>16</b>
4.1. Potencia del haz . . . . .	16
4.2. Detecciones individuales . . . . .	17
4.3. Coincidencias . . . . .	19
4.4. Rodamina B . . . . .	21
4.5. Sección Eficaz . . . . .	26
<b>5. Conclusiones</b>	<b>28</b>

## Índice de figuras

1.	Histograma que describe la forma que la correlación temporal debe seguir. Es posible observar un pico cercano a los 4 ns donde hay un mayor numero de conteos que representan los fotones correlacionados. . . . .	10
2.	Diagrama de los estados de energía durante los procesos de absorción de un y dos fotones. Es posible observar la presencia de un nuevo nivel de energía virtual para la absorción de dos fotones. Imagen modificada de [10]. . . . .	11
3.	Diagrama del montaje experimental que será utilizado para la toma de datos. . . . .	13
4.	Foto del montaje experimental que será utilizado para la toma de datos. . . . .	14
5.	Potencia del haz en función del filtro ND. . . . .	17
6.	Coincidencias y número de detecciones en cada uno de los detectores para el filtro ND = 0.2 antes del BBO. . . . .	18
7.	Coincidencias y número de detecciones en cada uno de los detectores para el filtro ND = 0.2 después del BBO. . . . .	18
8.	Coincidencias para el filtro ND = 0.2. . . . .	18
9.	Coincidencias en función de la diferencia en llegada a cada uno de los detectores con el filtro antes del BBO. . . . .	19
10.	Coincidencias en función de la diferencia en llegada a cada uno de los detectores con el filtro después del BBO. . . . .	19
11.	Puntos cercanos al pico, cuya sumatoria representara el número total de coincidencias. . . . .	20
12.	Coincidencias totales en función de las detecciones individuales en el detector 1 con el filtro antes del BBO. . . . .	20
13.	Coincidencias totales en función de las detecciones individuales en el detector 1 con el filtro después del BBO. . . . .	20
14.	Coincidencias totales en función de las detecciones individuales en el detector 1. . . . .	21
15.	Coincidencias y número de detecciones en cada uno de los detectores para filtro ND = 0.2 con el filtro antes del BBO. . . . .	22

16. Coincidencias y número de detecciones en cada uno de los detectores para filtro ND = 0.2 con el filtro después del BBO. . . . .	22
17. Coincidencias para el filtro ND = 0.2. . . . .	22
18. Coincidencias en función de la diferencia en llegada a cada uno de los detectores con el filtro antes del BBO. . . . .	23
19. Coincidencias en función de la diferencia en llegada a cada uno de los detectores con el filtro después del BBO. . . . .	23
20. Coincidencias totales en función de las detecciones individuales en el detector 1 con Rodamina B. . . . .	24
21. Coincidencias totales para las diferentes posiciones del filtro en función de las detecciones individuales en el detector para Rodamina B y Metanol. . . . .	25
22. Coincidencias totales para filtro antes de BBO en función de las detecciones individuales en el detector para Rodamina B y Metanol. . . . .	25
23. Coincidencias totales para filtro despues de BBO en función de las detecciones individuales en el detector para Rodamina B y Metanol. . . . .	26
24. Coincidencias totales en función de las detecciones individuales en el detector 1 con Rodamina B. . . . .	27

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a la profesora Mayerlin Nuñez y a los integrantes del grupo de Optica Cuantica de la Universidad de los Andes por el tiempo, herramientas y ayuda que todos me brindaron para llevar a cabo éste trabajo.

## Resumen

El uso de fotones correlacionados ha tomado gran relevancia en los últimos años en la espectroscopia y microscopía gracias a que la probabilidad de absorción de fotones depende linealmente de la intensidad del haz contrario a la dependencia cuadrática de fotones no correlacionados. Por lo tanto, es de sumo interés examinar estas relaciones experimentalmente. En esta investigación se hizo uso de un montaje en el cual se filtra un haz de fotones correlacionados y no correlacionados. Mediante mediciones de coincidencias y detecciones individuales en detectores de fotones, fue posible la corroboración de las dependencias cuadráticas y lineales y medición de la sección eficaz de absorción en una muestra de Rodamina B en una concentración de 50 mM. Al comparar estos valores con mediciones realizadas anteriormente en el mismo montaje, se encuentra que los valores son muy similares lo que indica una metodología experimental adecuada.

## **Abstract**

The use of correlated photons has gained great relevance in recent years in spectroscopy and microscopy because the probability of photon absorption depends linearly on the intensity of the beam, contrary to the quadratic dependence of uncorrelated photons. Therefore, it is of utmost interest to examine these relationships experimentally. In this investigation, we used a setup in which a beam of correlated and uncorrelated photons is filtered. By means of measurements of coincidences and individual detections in photon detectors, it was possible to corroborate the linear and quadratic dependencies and measure the absorption effective section in a sample of Rhodamine B at a concentration of 50 mM. When comparing these values with measurements made previously in the same set-up, it is found that the values are very similar, which indicates an adequate experimental methodology.

## 1. Introducción

El concepto de niveles de energía fue propuesto por primera vez en 1913 por el físico Niels Bohr en su modelo atómico. En este se describen niveles discretos de energía que corresponden a la energía necesaria para mover el electrón de su órbita inicial a otra con un nivel de energía asociado mayor. Posteriormente, el electrón volverá a su estado inicial de energía liberando un fotón [1]. En 1931 Maria Goeppert Mayer planteó la posibilidad de nuevos estados de energía, estados virtuales de energía, accesibles mediante la excitación de un electrón por medio de la absorción de dos fotones en un intervalo de tiempo muy corto. Sin embargo, las limitaciones tecnológicas no permitieron una verificación experimental hasta 30 años después. Las nuevas herramientas que permitieron esta corroboración hacen uso de novedosos principios físicos, como el enredamiento cuántico.

El enredamiento de dos partículas hace referencia a estados cuánticos de muchos cuerpos, que no pueden escribirse como los productos de las funciones de onda de los constituyentes y, por lo tanto, las partículas están altamente correlacionadas cuanticamente [2].

Adicionalmente, en el caso de fotones correlacionados, existe una propiedad que los hace de gran interés en la física y biología, específicamente en procesos de espectroscopia [2] y microscopía [3]. La sección eficaz de absorción de fotones correlacionados depende linealmente de la intensidad del haz incidente que, al comparar con la dependencia cuadrática de los fotones no correlacionados, permite mayores probabilidades de absorción con valores mas bajos de intensidad [4, 5]. Ahora bien, en este experimento nos enfocaremos en la molécula Rodamina B que, gracias a sus propiedades fluorescentes, es utilizada para distintas mediciones en la medicina.

### 1.1. Marco Teórico

La técnica con la que se producirán los fotones correlacionados se conoce como Spontaneous Parametric Down-Conversion (SPDC) que describe el proceso de división de un fotón *pump* a un par de fotones, *signal* y *idler*, después de atravesar un medio óptico no lineal, un cristal Barium Borate (BBO). Así, podemos definir algunas leyes de conservación para garantizar la factibilidad del



procedimiento:

$$\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i, \quad (1)$$

$$\Delta\vec{k} = \vec{k}_p - \vec{k}_s - \vec{k}_i, \quad (2)$$

donde los subíndices  $p$  denotan el fotón pump y  $s, i$  los fotones producidos signal y idler respectivamente. Siendo así, la Ecuación (1) hace referencia a la conservación de energía, mientras que la Ecuación (2) describe la conservación de momento, donde se desea que  $\Delta\vec{k} = 0$  [6]. Ahora bien, si deseamos que ambas condiciones se satisfagan para la producción de fotones correlacionados, debemos hacer uso de las polarizaciones de los fotones involucrados, pues se pueden tener tres diferentes tipos de SPDC:

- **Tipo 0:** Los fotones pump, signal y idler tienen la misma polarización.
- **Tipo I:** Los fotones signal y idler tienen polarizaciones ortogonales al pump.
- **Tipo II:** Los fotones signal y idler tiene polarizaciones ortogonales.

Para este experimento solo nos enfocaremos en el Tipo I porque, gracias a las propiedades del cristal sobre el cual incide el fotón pump, es fácil satisfacer la condición de la Ecuación (2) y producir los fotones correlacionados [6]. Mas aún, esta selección de tipo de SPDC permite seleccionar los ángulos con los que los pares de fotones salen del cristal de forma tal que, dependiendo de las frecuencias  $\omega_s$  y  $\omega_i$ , los fotones signal y idler sean colineales y, por lo tanto, producir un haz de fotones correlacionados.

Por otro lado, para medir que efectivamente se estén produciendo los fotones correlacionados, es necesario hacer uso de la función de correlación temporal de segundo orden  $g^{(2)}(\tau)$ , que describe la correlación del intervalo de tiempo  $\tau$  entre la llegada de la señales a los detectores y el numero de pares de fotones detectados. En términos mas simples, dada una detección de un fotón en un tiempo  $t_1$  la función  $g^{(2)}(\tau)$  representa la probabilidad de una detección en un tiempo  $t_2$  para otro fotón, con  $\tau = t_2 - t_1$ . Adicionalmente, para conteos discretos  $n_1(t_1)$  y  $n_2(t_2)$ , se tiene que [7]

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle n_1(t_1) n_2(t_2) \rangle}{\langle n_1(t_1) \rangle \langle n_2(t_2) \rangle}, \quad (3)$$

donde  $\langle \rangle$  representa el promedio temporal. Ahora bien, la correlación temporal esperada para fotones correlacionados es mostrada en la figura 1.

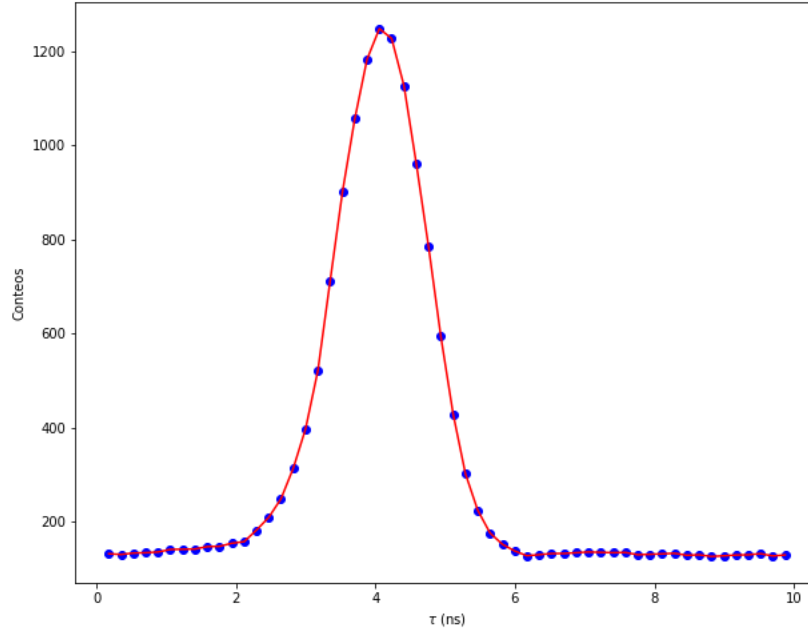


Figura 1: Histograma que describe la forma que la correlación temporal debe seguir. Es posible observar un pico cercano a los 4 ns donde hay un mayor numero de conteos que representan los fotones correlacionados.

El pico describe el intervalo de tiempo mas probable en el cual se espera recibir la segunda detección de un fotón dada una detección inicial. De esta manera, es posible definir la detección de una coincidencia en un intervalo de tiempo determinado.

Aunque hasta ahora solo hemos discutido sobre los fotones correlacionados, también nos interesa entender la importancia de estos en las secciones transversales de las moléculas. Para esto, recuerde el concepto de niveles de energía expuesto inicialmente. Se sabe que es posible excitar un electrón mediante la absorción de un fotón. Para esto se requiere que la energía del fotón  $E_p$  sea igual a la energía transición  $E_t$ ,

$$E_p = E_t. \quad (4)$$

Sin embargo, si inciden dos fotones con energías  $E_1$  y  $E_2$  tal que

$$E_1 + E_2 = E_t, \quad (5)$$

el procedimiento aun es posible energéticamente, pero se requiere que el intervalo de tiempo entre la llegada de los fotones sea lo suficientemente pequeño para que el electrón no vuelva a su nivel de energía inicial después de ser excitado a un nivel de energía virtual por el primer fotón. Una representación gráfica de esta proceso puede encontrarse en la figura 2.

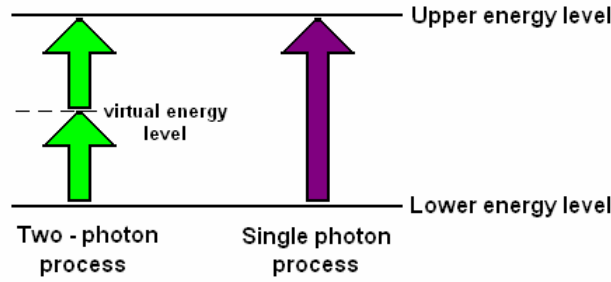


Figura 2: Diagrama de los estados de energía durante los procesos de absorción de un y dos fotones. Es posible observar la presencia de un nuevo nivel de energía virtual para la absorción de dos fotones. Imagen modificada de [10].

Siendo así, es fácil ver que los fotones correlacionados están estrechamente relacionados con los niveles de energía virtuales pues, gracias a los cortos intervalos entre fotones correlacionados, es posible excitar un fotón a un nivel de energía superior con dos fotones, al pasar por un nivel de energía intermedio virtual [9].

Finalmente, si deseamos comparar la efectividad del uso de fotones correlacionados a comparación de los no correlacionados, debemos enfocarnos en las tasas de absorción para ambos casos. La tasa de absorción de dos fotones no correlacionados es el producto de dos tasas independientes de absorción de un solo fotón, lo que se refleja como una dependencia cuadrática del flujo de fotones  $\phi$  [4]

$$r_n = \delta_r \phi^2, \quad (6)$$

donde  $\delta_r$  es la sección eficaz de absorción para dos fotones no correlacionados. Por el contrario, si los fotones están correlacionados su tasa de absorción esta dada por [4]

$$r_c = \sigma\phi, \quad (7)$$

donde  $\sigma$  es la sección eficaz de absorción para fotones correlacionados. Ahora bien, la tasa de absorción  $r_c$  puede entenderse como la tasa de absorción  $R_c$  de pares de fotones en una muestra con  $N$  moléculas

$$r_c = \sigma\phi = \frac{2R_c}{N}.$$

Por lo tanto, haciendo uso del número de Avogadro  $N_A$ , la concentración  $c$  y volumen  $V$  de la muestra se llega a que

$$R_c = \frac{1}{2} (cVN_A) \sigma\phi = cVN_A\sigma\varphi, \quad (8)$$

donde  $\varphi$  es el flujo de pares de fotones. Este nuevo flujo puede relacionarse con la tasa  $R$  de pares de fotones que inciden en un área  $A$  de la muestra. Por lo tanto,

$$\varphi = \frac{R}{A}, \quad (9)$$

y

$$R_c = \frac{cVN_A\sigma R}{A}. \quad (10)$$

De esta manera, se llega a una ecuación que relaciona la sección eficaz con variables medibles experimentalmente [9, 11].

Ahora, la forma de observar estos comportamientos cuadráticos y lineales es mediante la filtración del haz de fotones correlacionados. De esta manera, se produce la pérdida de fotones individuales, eliminando algunos pares de fotones correlacionados y permitiendo la comparación con el caso en que se filtra el haz no colacionado.

## 2. Objetivos

**Objetivo principal:** Entender la importancia de los estados virtuales mediante la investigación de la absorción de fotones correlacionados en moléculas orgánicas.

**Objetivos Específicos:**

- Calcular la sección eficaz de absorción de pares de fotones correlacionados al interactuar con moléculas de Rodamina B.
- Observar el proceso de perdidas de un fotón al filtrar el haz fotones correlacionados.
- Corroborar la dependencia lineal y cuadrática de pares de fotones transmitidos debido a perdidas de un fotón.

## 3. Metodología

### 3.1. Montaje experimental

Este proyecto es una continuación de la monografía de pregrado realizada por Ana Maria Torres en 2021, [9]. Siendo así, se hará uso del mismo montaje que ella utilizó salvo algunas modificaciones para investigar otros aspectos en la Rodamina B. El montaje puede verse a continuación:

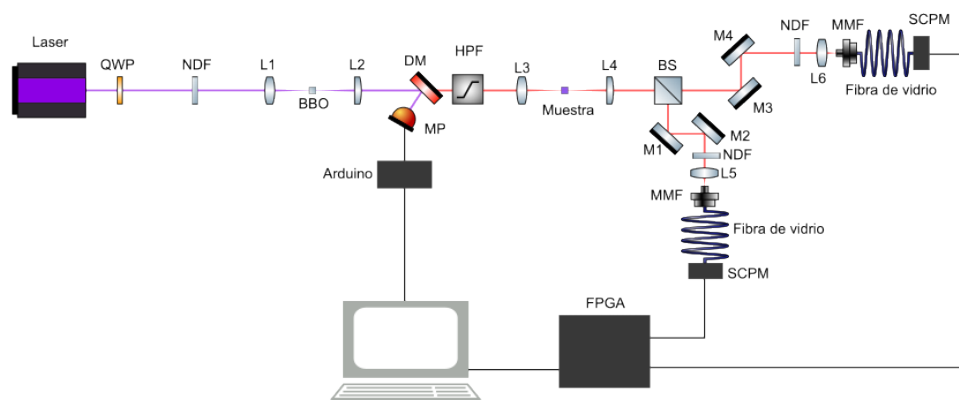


Figura 3: Diagrama del montaje experimental que será utilizado para la toma de datos.

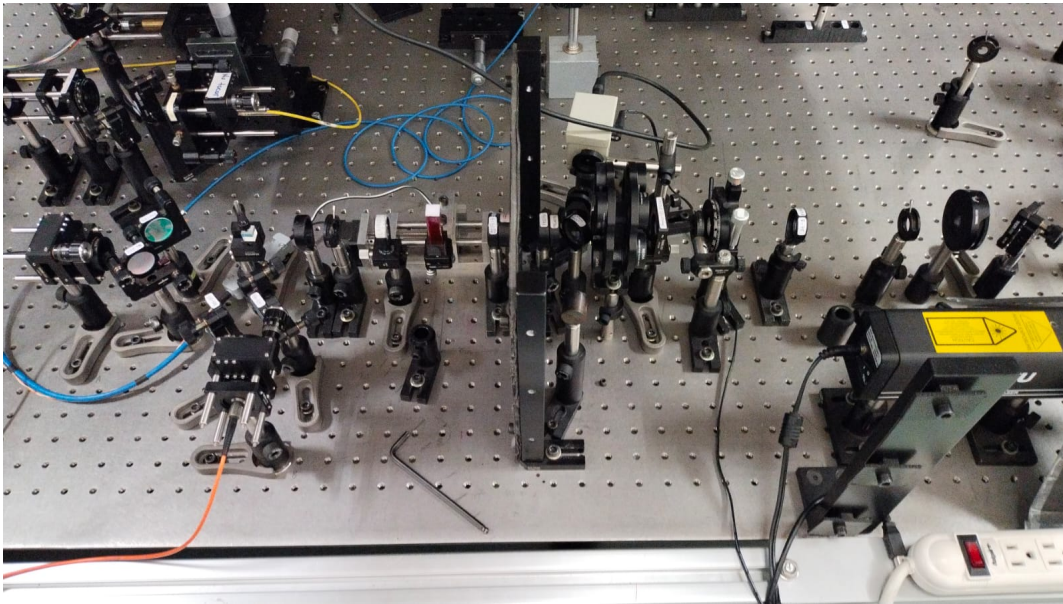


Figura 4: Foto del montaje experimental que será utilizado para la toma de datos.

El montaje utilizado durante el experimento puede dividirse en tres partes, donde cada una cuenta con su sección en el montaje.

La primera parte es la producción de los fotones correlacionados. Esta sección está compuesta por el láser ( $\lambda = 407 \text{ nm}$ ) que actúa como la fuente de fotones no correlacionados (pump), una lámina de onda de  $\lambda/4$  “Quarter-wave plate”(QWP) que modifica la polarización de la onda para obtener una polarización horizontal, un filtro de densidad neutra “Neutral density filter”(NDF) que será modificado a lo largo del experimento para modificar la potencia del haz, un lente L1 para enfocar sobre el cristal “Barium borate”(BBO) que, mediante SPDC, producirá los fotones correlacionados, otro lente L2 para colimar el láser antes de llegar a un medidor de potencia y un filtro pasa alta “High pass filter”(HPF) que tienen como propósito eliminar los fotones del pump que, después de pasar por el cristal BBO, no están correlacionados.

La segunda parte es la absorción de los fotones correlacionados por parte de la muestra. En este punto se espera que el haz de luz este compuesto principalmente por fotones correlacionados. Así, el lente L3 enfocará los fotones correlacionados sobre la muestra y, finalmente, el lente L4 colima el

haz para acabar la segunda parte del experimento.

La ultima parte consiste en la detección de los pares de fotones correlacionados. Una vez el haz sale de la sección anterior, se desea conocer el número de pares de fotones absorbidos por la muestra. Para esto, después del lente L4, se ubica un separador de haz “Beam-splitter”(BS) que divide los fotones correlacionados en dos caminos para que, con el uso de los espejos M1 - M4, sean dirigidos a un lente (L5 y L6) que enfocarían el haz antes de llegar a la fibra multimodo “Multimode fiber”(MMF). Antes de ambos lentes se ubicará el filtro de 0.5ND. Esta fibra llevará la luz a los contadores de fotones individuales “Single-photon counter module”(SPCM) que transmite la información, mediante pulsos eléctricos, al FPGA que envía la información al computador para ser analizada.

### 3.2. Análisis de datos

Existen varios métodos posibles para realizar una medición de la sección eficaz de absorción de fotones correlacionados. Entre estos se encuentran las mediciones directas sobre la atenuación del haz de fotones correlacionados transmitido o las mediciones indirectas, en las cuales se estudian procesos secundarios como la fluorescencia producida por la absorción de fotones correlacionados. Sin embargo, estos métodos no diferencian entre las absorciones de fotones correlacionados y no correlacionados. Para solucionar esto, la medición de la sección eficaz se realizara mediante la detección de coincidencias de pares de fotones, para hallar la correlación temporal. La ventaja de este método es la eliminación de conteos debido a fenómenos ópticos diferentes a la absorción de pares correlacionados.

Antes de trabajar sobre la muestra, es importante conocer el comportamiento de los fotones cuando no hay una muestra. Así, primero se trabajará con metanol en el contenedor de la muestra, para recrear la difracción que el haz experimentara cuando se ubique la Rodamina B.

Durante el experimento se variaran los valores del filtro NDF, el cual tomara valores en el intervalo 0.2ND - 2.7ND. Cada uno de estos afectara la intensidad del haz y, por lo tanto, producirá una correlación  $g^{(2)}(\tau)$  diferente. Mas aún, este cambio en la intensidad se verá reflejado directamente en el número de detecciones individuales que cada detector registra y el número de coincidencias

para fotones correlacionados.

Ahora, para observar el comportamiento cuadrático y lineal se tomaran dos conjuntos de datos en donde cada uno corresponde a una posición diferente del filtro NDF:

- **Antes de BBO:** La primera posición es antes del lente L1. En este caso se realiza un filtrado del haz de fotones no correlacionados, con lo que se espera observar la dependencia lineal de las coincidencias en función de detecciones individuales.
- **Despues de BBO:** La segunda posición es después del lente L2. En este caso se realiza un filtrado del haz de fotones correlacionados, con lo que se espera observar la dependencia cuadrática de las coincidencias en función de detecciones individuales.

Una vez se realizan las medidas con el metanol, se reemplaza el contenido del contenedor por Rodamina B a una concentración de 50mM, lo que significa 50 millimoles por litro. Luego, se realizan las mediciones nuevamente para comparar con los resultados obtenidos con el metanol en el contenedor. Finalmente, usando la Ecuación (10) se llega a un valor para la sección eficaz.

## 4. Medición

Antes de realizar cualquier medición se realizó una calibración del montaje para intentar obtener el mismo número de detecciones en cada uno de los detectores.

Como se menciona anteriormente, las primeras mediciones que se realizaron fueron con metanol en lugar de la Rodamina B. Una vez realizada la toma de datos para un filtro se obtiene un conjunto de datos que relaciona las detecciones individuales en cada uno de los detectores en función del tiempo, otro que relaciona las coincidencias en función del intervalo de llegada a los detectores  $\tau$  y una medición de la potencia del haz después de pasar por el cristal BBO. Los datos y el código utilizado para su análisis, se encuentran en el siguiente [repositorio de Github](#).

### 4.1. Potencia del haz

Lo primero que se analizó fue el comportamiento de la potencia del haz después de pasar por el cristal BBO. Los voltajes encontrados para ocho de los filtros utilizados se encuentran en la figura



5.

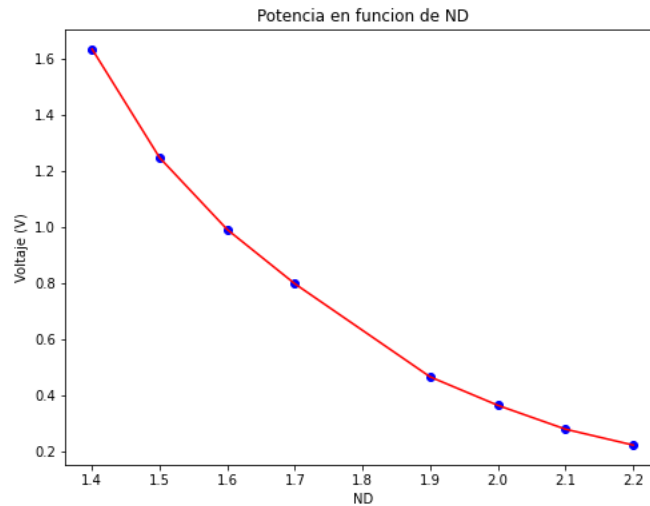


Figura 5: Potencia del haz en función del filtro ND.

De aquí es posible observar una relación inversamente proporcional entre el valor del filtro NDF y la potencia del haz. Esto tiene sentido ya que los filtros de densidad neutra reducen la intensidad del haz.

## 4.2. Detecciones individuales

Aunque vamos a medir las coincidencias de fotones, también podemos observar el comportamiento de las detecciones individuales en cada uno de los detectores. Si se toma el caso para el filtro ND = 0.2 se obtienen las siguientes gráficas que describen el número de detecciones para cada detector en las dos ubicaciones del filtro NDF.

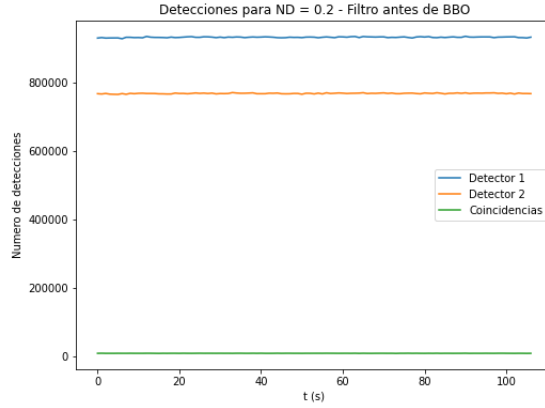


Figura 6: Coincidencias y número de detecciones en cada uno de los detectores para el filtro  $ND = 0.2$  antes del BBO.

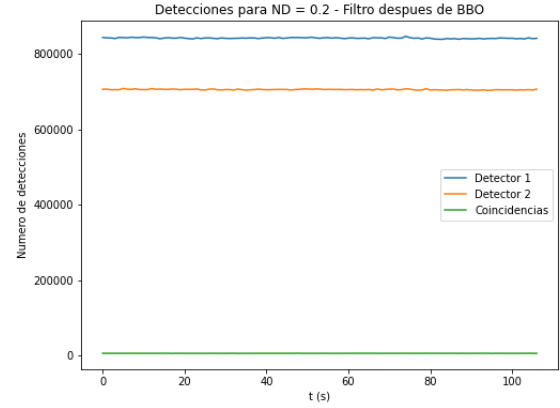


Figura 7: Coincidencias y número de detecciones en cada uno de los detectores para el filtro  $ND = 0.2$  después del BBO.

Es fácil ver que existe una diferencia en el número de detecciones en cada uno de los detectores. Esto se considera como un problema ya que al separar el haz de luz en el divisor de haz (BS), se espera que cada nuevo haz producido tenga la misma cantidad de fotones. Esto puede deberse a una mala calibración de alguno de los componentes ópticos que dirigen el haz de fotones correlacionados o problemas en el separador de haz. Aunque las gráficas también describen las coincidencias debido a fotones correlacionados, podemos hacer otra gráfica para observar la diferencia mas claramente.

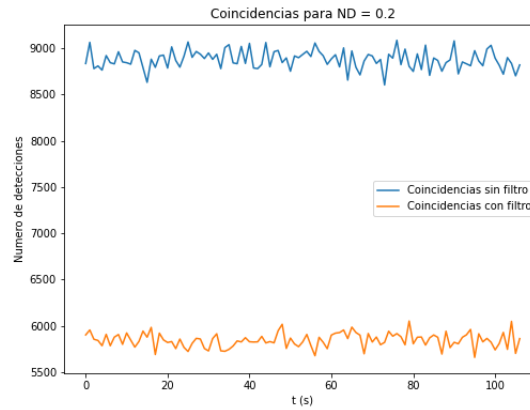


Figura 8: Coincidencias para el filtro  $ND = 0.2$ .

En esta gráfica es mas evidente la diferencia en coincidencias debido a la ubicación del filtro. Esta

diferencia se debe a la eliminación de algunos de los fotones correlacionados antes de su detección debido a la presencia de los filtros después del BBO y, por lo tanto, impidiendo una coincidencia.

### 4.3. Coincidencias

Ahora bien, el comportamiento de las coincidencias puede investigarse con mas profundidad si graficamos un histograma del número de eventos por segundo para los diferentes intervalos de llegada de los fotones.

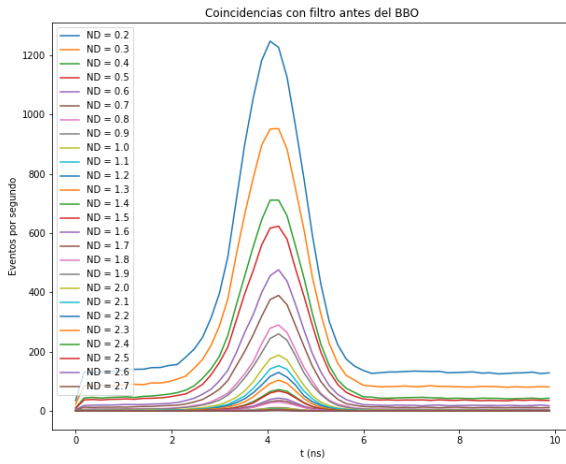


Figura 9: Coincidencias en función de la diferencia en llegada a cada uno de los detectores con el filtro antes del BBO.

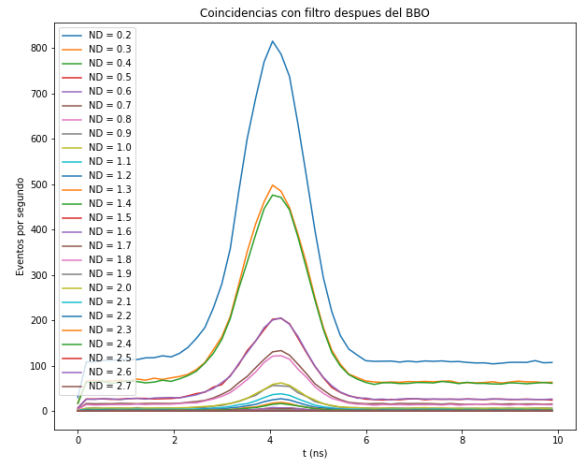


Figura 10: Coincidencias en función de la diferencia en llegada a cada uno de los detectores con el filtro después del BBO.

Para cada uno de los valores de los filtros se describe una distribución como la que se ve en la figura 1. Adicionalmente, en estas gráficas también es posible notar una disminución en el número de coincidencias debido a la ubicación del filtro NDF. Sin embargo, es ideal investigar esta diferencia con más detalle. Para esto, se va a buscar la relación entre el número de coincidencias totales y el número de detecciones individuales que se describen en las gráficas 6 y 7. No obstante, es importante resaltar que los histogramas 9 y 10 también toman valores en los extremos alejados del pico. Estas regiones se conocen como colas y representan un ruido debido a fotones que no hacen parte del montaje, pero afectan los resultados. Para ignorar estos conteos, el número total de coincidencias sera la sumatoria de 10 puntos cercanos al pico menos 10 puntos en las colas. En el caso del filtro

ND = 0.2 los puntos de medición pueden encontrarse en la figura 11.

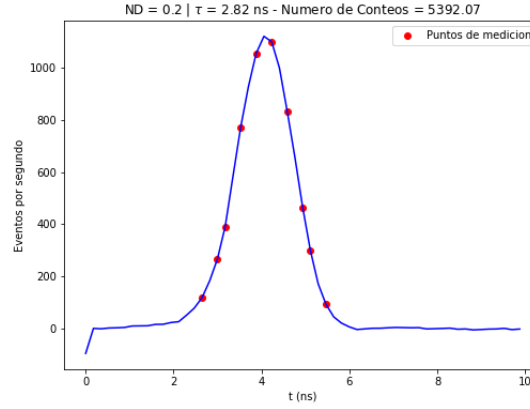


Figura 11: Puntos cercanos al pico, cuya sumatoria representara el número total de coincidencias.

El intervalo de selección de los puntos fue decidido asumiendo una distribución Gaussiana, por lo que tomando dos desviaciones estándar, se tiene un intervalo de 2.82 ns centrado en el pico.

Después de repetir el procedimiento para cada uno de los valores de los filtros ND en las posibles ubicaciones, se obtienen las gráficas 12 y 13.

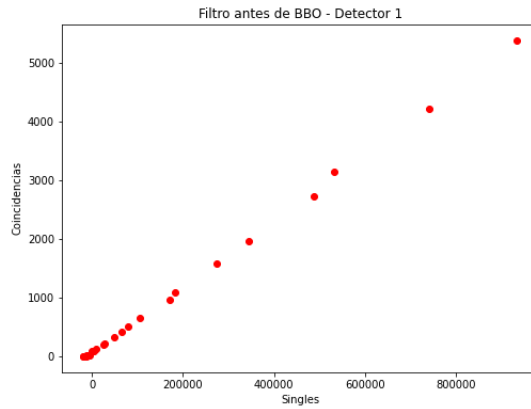


Figura 12: Coincidencias totales en función de las detecciones individuales en el detector 1 con el filtro antes del BBO.

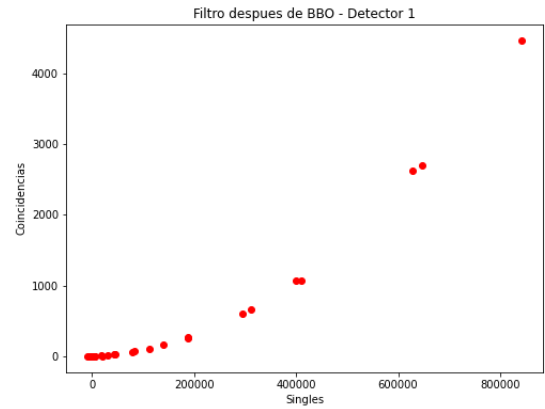


Figura 13: Coincidencias totales en función de las detecciones individuales en el detector 1 con el filtro después del BBO.

Ahora bien, la unificación de estas gráficas en la figura 14 permite ver mas claramente la impor-

tancia en la ubicación de filtro.

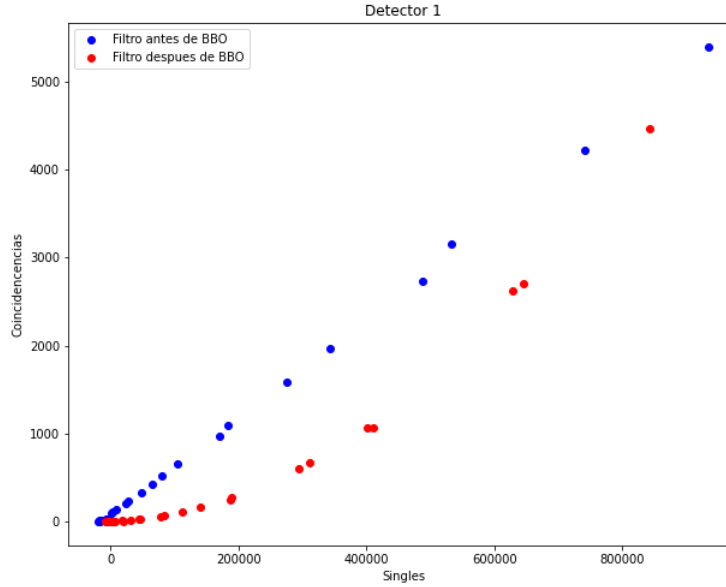


Figura 14: Coincidencias totales en función de las detecciones individuales en el detector 1.

Es posible notar que la ubicación del filtro afecta drásticamente el comportamiento de las coincidencias en función de las detecciones individuales. Es claro que para el caso donde se filtra el haz de fotones no correlacionados, antes del BBO, el comportamiento es lineal. Así, es posible atribuir esta dependencia lineal a los fotones correlaciones que no están presentes cuando se filtra el haz correlacionado, después del BBO. Mas aún, se puede observar que la intersección de estas gráficas esta por encima de las  $800 \times 10^3$  detecciones. Sin embargo, para evitar la saturación y un posible deterioro de los detectores, no se realizaron mediciones con filtros de menor valor. Aun así, es de esperar que existan valores de detecciones individuales para los cuales hallan mas coincidencias al filtrar el haz correlacionado.

#### 4.4. Rodamina B

La segunda parte del experimento consiste en reemplazar el metanol por Rodamina B a una concentración de 50mM. El cambio en el contenido del recipiente se vera reflejado en diferentes

mediciones para detecciones individuales y coincidencias. Las gráficas de estos resultados se muestran en las figuras 15 a 19.

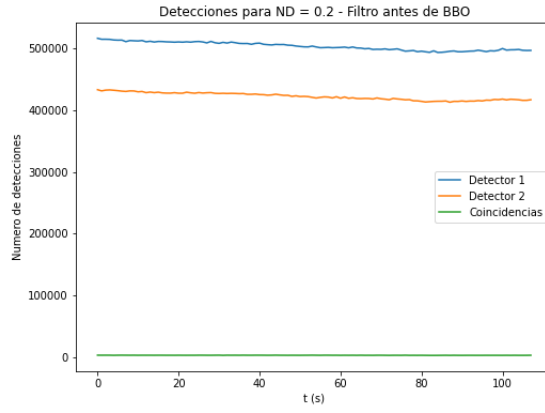


Figura 15: Coincidencias y número de detecciones en cada uno de los detectores para filtro ND = 0.2 con el filtro antes del BBO.

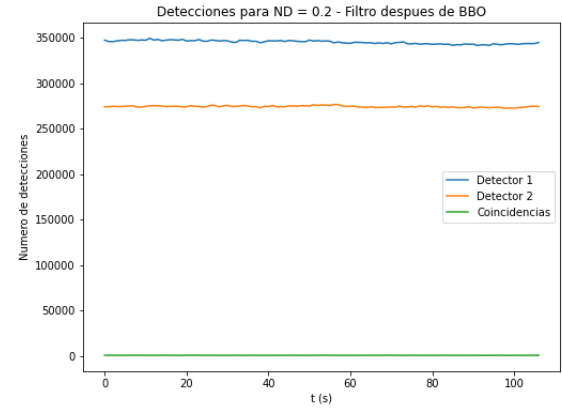


Figura 16: Coincidencias y número de detecciones en cada uno de los detectores para filtro ND = 0.2 con el filtro después del BBO.

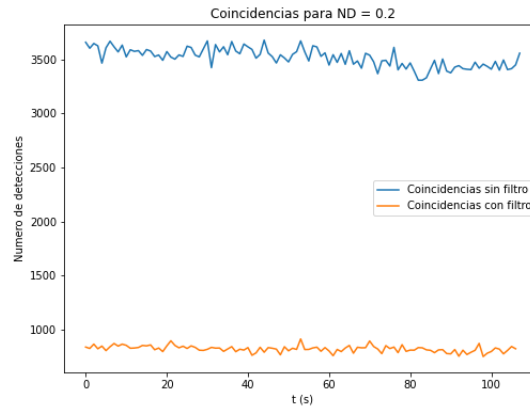


Figura 17: Coincidencias para el filtro ND = 0.2.

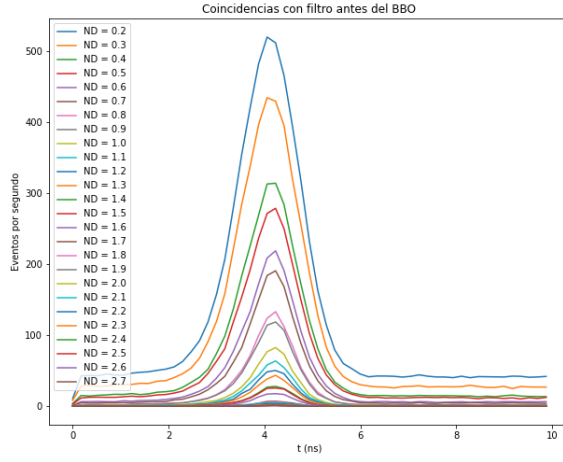


Figura 18: Coincidencias en función de la diferencia en llegada a cada uno de los detectores con el filtro antes del BBO.

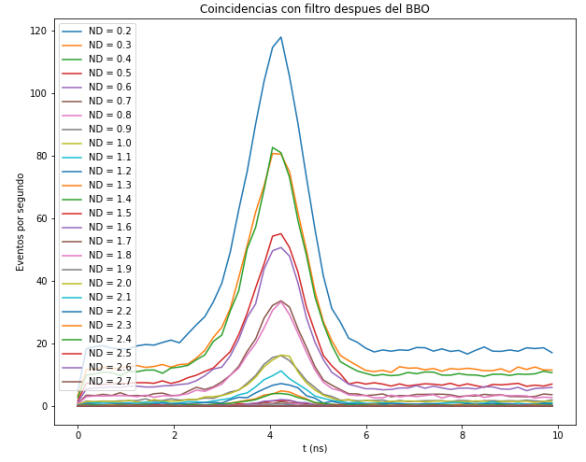


Figura 19: Coincidencias en función de la diferencia en llegada a cada uno de los detectores con el filtro después del BBO.

Se ve claramente que hay una reducción en el número de detección individuales y coincidencias. Esto se debe a que va a haber una absorción fotones en pares e individuales al atravesar la muestra de Rodamina B. Aun así, igual que antes, se puede observar que la ubicación del filtro afecta estas mediciones. Ahora bien, respecto al comportamiento cuadrático y lineal es fácil ver que nuestros resultados satisfacen lo esperado tal como se ve en la figura 20.

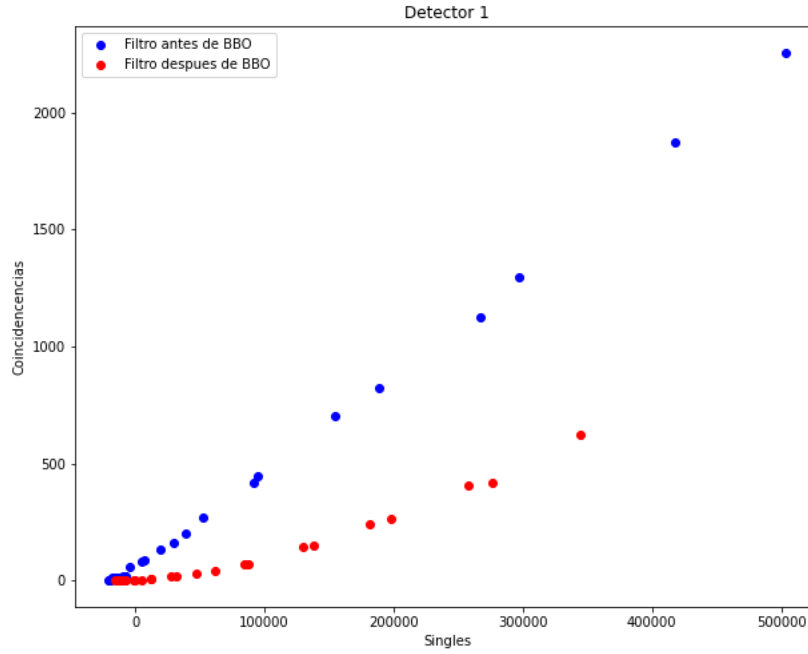


Figura 20: Coincidencias totales en función de las detecciones individuales en el detector 1 con Rodamina B.

Igual que antes, se tiene un comportamiento lineal cuando se filtra el haz de fotones no correlacionados y cuadrático de lo contrario. Sin embargo, debido a que hay algunas absorciones de fotones individuales y correlacionados, no es posible llegar a un punto de intersección de las dos líneas.

Ahora, con respecto a las diferencias en resultados para metanol y Rodamina B, las figuras 21 - 23 muestran una diferencia tanto en coincidencias como en detecciones individuales. Esto se debe a que algunos fotones fueron absorbidos al atravesar la muestra. De hecho, para calcular la sección transversal se hará uso de estas diferencias en coincidencias.



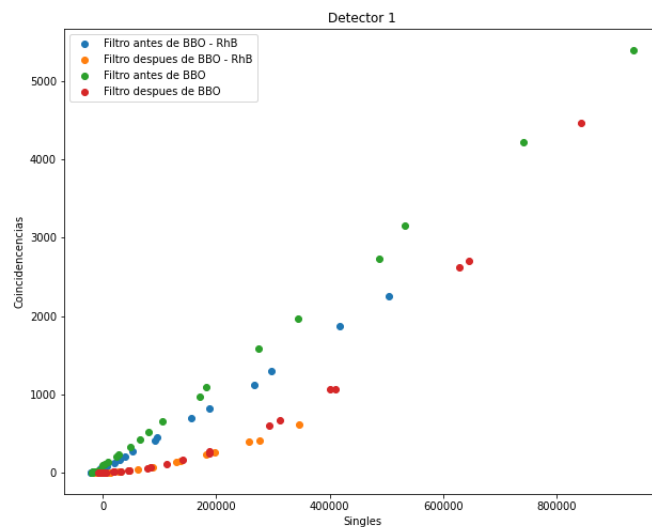


Figura 21: Coincidencias totales para las diferentes posiciones del filtro en función de las detecciones individuales en el detector para Rodamina B y Metanol.

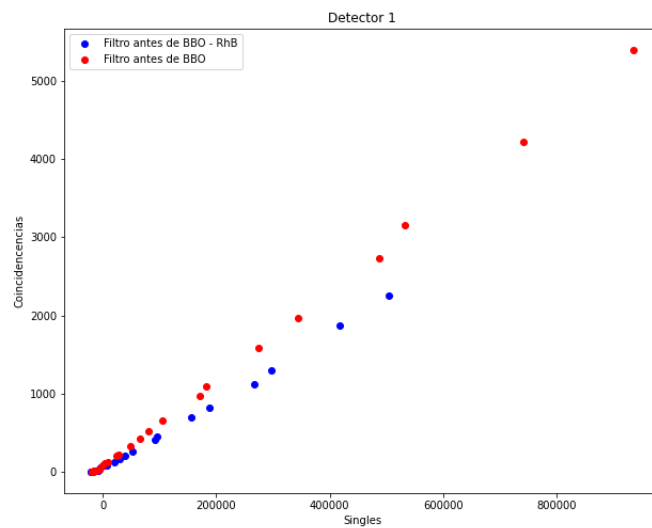


Figura 22: Coincidencias totales para filtro antes de BBO en función de las detecciones individuales en el detector para Rodamina B y Metanol.

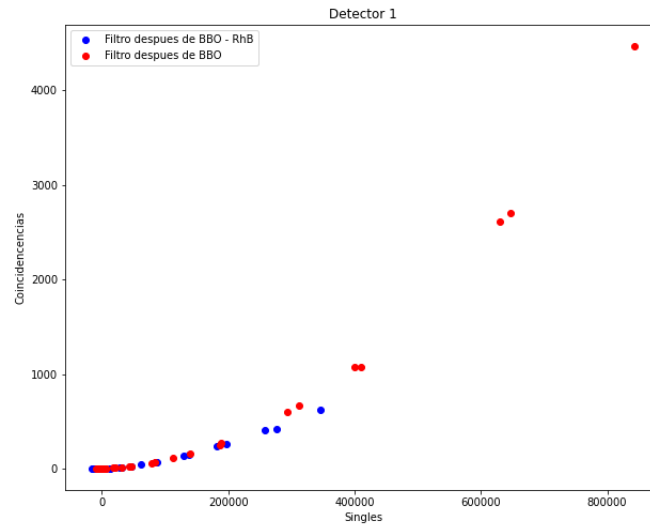


Figura 23: Coincidencias totales para filtro despues de BBO en función de las detecciones individuales en el detector para Rodamina B y Metanol.

## 4.5. Sección Eficaz

Como se dijo antes, usaremos la Ecuación (10) para calcular la sección transversal de absorción de fotones correlacionados. Para esto, es necesario observar la diferencia en coincidencias con y sin la muestra de Rodamina en el contenedor. Esto se debe a que las diferencias en coincidencias se le atribuyen a absorciones de pares de fotones. Así, se obtiene la gráfica que se muestra en la figura 24.

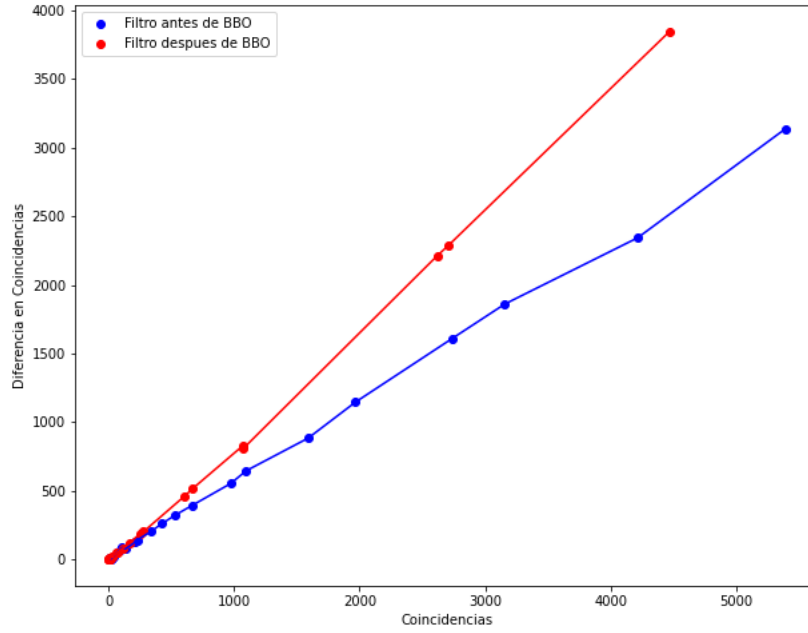


Figura 24: Coincidencias totales en función de las detecciones individuales en el detector 1 con Rodamina B.

Ahora bien, la pendiente de esta gráfica tiene el significado físico

$$\text{slope} = \frac{R_c}{R} = \frac{cVN_A\sigma}{A}, \quad (11)$$

entonces

$$\sigma = \frac{A \cdot \text{slope}}{cVN_A}. \quad (12)$$

Por último, podemos asumir que el volumen  $V$  tiene la forma de un cilindro por el cual atraviesa el haz de fotones. Así,

$$V = Al \quad (13)$$

donde  $A$  es el área del círculo sobre el cual inciden los fotones y  $l$  el largo del cilindro. Por lo tanto,

es posible reescribir la Ecuación (12) como

$$\sigma = \frac{\text{slope}}{clN_A}. \quad (14)$$

El contenedor sobre el cual se realizaron las muestras tenia una longitud de  $l = 10$  mm. Entonces, se logran registrar dos posibles valores  $\sigma$  para cada una de las posiciones del filtro, estas se muestran en cuadro 1.

Ubicación del Filtro	$\sigma \times 10^{-20} \text{ (cm}^2\text{/molécula)}$
Antes del BBO	$0.19 \pm 0.003$
Después del BBO	$0.28 \pm 0.005$

Cuadro 1: Valores encontrados para las secciones eficaces de la Rodamina en las diferentes posiciones del filtro NDF.

Al comparar nuestros resultados en [9], es fácil observar que se obtienen valores semejantes para filtro antes del BBO y una concentración similar. Estas diferencias pueden deberse a errores experimentales como un divisor de haz que no separa los fotones como se espera o una calibración inadecuada.

## 5. Conclusiones

Teniendo en cuenta estos es resultados, es fácil ver que se cumplieron todos los objetivos de la investigación. Se uso un montaje en el cual se aplica un filtrado al haz de fotones correlacionados para generar perdidas de fotones individuales y medir las coincidencias y detecciones individuales. De esta manera, fue posible verificar el comportamiento cuadrático y lineal que se esperaba para los fotones no correlacionados y correlacionados respectivamente.

En la siguiente parte del experimento se utilizo el mismo conjunto de datos para calcular la sección eficaz de absorción mediante el uso de variables medibles experimentalmente. Usando la diferencia en coincidencias entre el metanol y Rodamina B, fue posible encontrar las tasas de fotones absorbidos y fotones que inciden sobre la muestra. Así, se llegaron a dos valores diferentes de sección eficaz, uno para cada posición del filtro NDF. Los valores encontrados son muy similares a los encontrados

anteriormente en [9], lo que indica una metodología experimental adecuada. Siendo así, se logra observar la existencia de los niveles de energía virtuales que hacen posible la absorción de los fotones correlacionados.

Cabe resaltar que, aunque fue posible cumplir todos los objetivos del proyecto, aún existen posibles mejoras para futuras investigaciones. Como pudo observarse en las mediciones de detecciones individuales, los detectores no registran el mismo número de detecciones. Esto puede deberse a una mala calibración de los espejos que guían el haz a la fibra de vidrio, problemas en los detectores o un divisor de haz que no separa los fotones 50:50. Adicionalmente, también es posible el uso del mismo método de producción de fotones correlacionados para investigar su absorción en otras moléculas o más concentraciones de Rodamina B.

## Referencias

- [1] Serway, R. A., Moses, C. J., & Moyer, C. A. (2005). Modern physics (3rd ed.). Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole.
- [2] Schlawin, F., Dorfman, K. E. & Mukamel, S. Entangled two-photon absorption spectroscopy. *Accounts of Chemical Research* **51**, 2207–2214.
- [3] Das, D. K. et al. Two photon spectroscopy can serve as a marker of protein denaturation pathway. *Journal of Fluorescence*: 28, 855–862 (2018).
- [4] Tabakaev, D. et al. Energy-time entangled two-photon molecular absorption. 1910.07346 (2020).
- [5] Javanainen, J. & Gould, P. L. Linear intensity dependence of a two-photon transition rate. *Phys. Rev. A*: 41, 5088–5091 (1990).
- [6] Couteau, C. Spontaneous parametric down-conversion. *Contemporary Physics*: 59, 291–304 (2018).
- [7] Fox, M. Quantum optics: an introduction. Oxford master series in atomic, optical, and laser physics (1st ed., Oxford Univ. Press, Oxford, 2006).
- [8] Shih, Y. An Introduction to Quantum Optics: Photon and Biphoton Physics (CRC Press, 2011).
- [9] Torres, A. Sección eficaz de absorción de pares de fotones correlacionados en moléculas. Tesis de Pregrado, Universidad de los Andes, Colombia (2021).
- [10] Gabriel Moagar-Poladian. Sub-wavelength resolution laser lithography in the field of MEMS (2008).
- [11] Villabona-Monsalve, J. P., Calderón-Losada, O., Nuñez Portela, M. & Valencia, A. Entangled two photon absorption cross section on the 808 nm region for the common dyes zinc tetraphenylporphyrin and rhodamine b. *The Journal of Physical Chemistry A* 121, 7869–7875 (2017).