Absorción de dos fotones usando un cristal tipo II

Francisco Calderón, Alejandro Niño, Mayerlin Núñez*

*Profesora asistente - Departamento de Física, Universidad de Los Andes

(Dated: 6 de diciembre de 2019)

El objetivo inicial de este experimento era medir la sección eficaz de absorción de dos fotones enredados en una muestra de rodamina B (RhB) suspendida en metanol usando una fuente de pares de fotones producidos por un cristal tipo II. Estos últimos fueron detectados por el método de coincidencias al acoplar haces divididos por un *beam splitter* a unas fibras ópticas y a unos detectores de fotones individuales. Esto requirió calibrar el montaje para tener un camino óptico bien definido y un haz bien colimado, dada la dificultad de que suficiente luz que sale del cristal entre a las fibras. Si bien no se logró medir la sección eficaz, se logró hacer una caracterización de una muestra de metanol y de dos muestras de RhB suspendidas en metanol (a 100μ M y 5mM) mediante el *z-scan* y la absorción de fotones enredados. Esto fue posible tras la calibración del montaje y el acople a los detectores. Optimizar este procedimiento permitiría entender caracterizar la absorción de mejor manera, así como medir la sección eficaz.

I. INTRODUCCIÓN

La absorción de dos fotones (TPA por sus siglas en inglés) fue descrita teóricamente por Göppert-Mayer en los años 30 [1] [2]. Unas de las ventajas en el uso de esta técnica es que hay un bajo riesgo de contaminación lumínica por dispersión de luz, penetración profunda, alta resolución tridimensional y baja probabilidad de destruir una muestra [1] [3]. La posibilidad de inducir TPA lo ha hecho un método muy utilizado para estudiar muestras biológicas. Se suele inducir TPA con láseres pulsados. Por otro lado, la ETPA (absorción de dos fotones enredados) es una técnica que surgió para estudiar propiedades no-lineales de moléculas orgánicas [3]. La ventaja sobre la TPA es que su dependencia de la señal no es cuadrática sino lineal, de modo que se necesita un flujo de fotones mucho menor. Como la intensidad en ETPA es sumamente baja se ha logrado mejorar el estudio de muestras biológicas, lo que posibilita una probabilidad de contaminación lumínica por dispersión de luz y de daño de la muestra muchísimo menores respecto a la TPA [3]. Por tanto, este método se ha usado frecuentemente en los últimos años para estudiar, por ejemplo, flavoproteínas [3] y colorantes como la misma rodamina [1]; esa es una de las motivaciones del experimento. Por otro lado, en ambos métodos se pueden acceder a diferentes estados excitados.

Este experimento buscaba, inicialmente, hacer la demostración experimental de la dependencia lineal de la ETPA respecto al flujo de fotones incidentes. Para ello, se buscaba medir la sección eficaz de absorción de dos fotones enredados (por un cristal tipo II) en una molécula de RhB (Rodamina B). Para esto se sigue el procedimiento de Villabona-Monsalve et al. [1]. El intentar replicarlo exigió aprender a manejar elementos ópticos y a detectar y procesar diferentes tipos de señales obtenidas en el laboratorio de Óptica Cuántica. En [1] se estudia el montaje que se utilizó en el experimento, incluyendo la producción de fotones enredados por generación paramétrica espontánea (SPDC por sus siglas en inglés, *spontaneous* parametric down conversion) con un cristal BBO (borato de bario β) tipo I. La diferencia con este experimento es que se utilizó un cristal tipo II, pero, en principio, se busca recrear los resultados obtenidos en ese artículo pero teniendo en cuenta el cambio en el cristal y las implicaciones experimentales que dicho cambio pueda conllevar. La diferencia con los cristales tipo I radica en la polarización que tienen los fotones producidos [4], pues en el tipo II sus polarizaciones son ortogonales. Para entender el método de SPDC como una manera de caracterizar una fuente de pares de fotones enredados se midió la función de correlación temporal de segundo orden de dichos pares de fotones enredados con el método de coincidencias.

II. MARCO TEÓRICO

Un sistema cuántico compuesto cuyo estado no se pueda factorizar en un producto de estados de una partícula se denomina enredado. La producción de los fotones enredados se logra con un cristal no-lineal birrefrigente. Es decir, los pares de fotones avanzan a distintas velocidades en el cristal y estas velocidades dependen de la polarización de los fotones [4], razón por la cual se terminan produciendo dos fotones con frecuencias distintas (denominados signal e idler en la literatura, y en este caso las frecuencias son las mismas) que están correlacionadas y, más aún, se emiten a destiempo. En el proceso de SPDC se conservan tanto la energía como el momento en la interacción con el cristal según las reglas de "coincidencia de fase" (*phase matching*), así que las frecuencias del signal y el idler están relacionadas con aquella del fotón original que incidió en el cristal, el *pump*, mediante esta ley de conservación. Gracias al cristal los fotones resultantes están correlacionados temporalmente y definimos el tiempo de enredamiento T_e como la diferencia de los tiempos en que fueron emitidos. Como se mencionó anteriormente, para que haya conservación tanto de la energía como del momento en la interacción del *pump* con el cristal (dada su geometría), se requiere que los fotones estén polarizados de cierta forma. En el tipo II el *idler* y el *signal* tienen un vector de onda paralelo al *pump* y sus polarizaciones son ortogonales [2]. Si bien en el tipo I y en el II cambian las polarizaciones siempre se conservan el momento y la energía [5]:

$$\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i \to \frac{n_p \omega_p}{c} = \frac{n_s \omega_s}{c} + \frac{n_i \omega_i}{c} , \qquad (1)$$

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \ . \tag{2}$$

Los *n* son los índices de refracción en los distintos medios, teniendo en cuenta que el mismo cristal tiene dos índices de refracción distintos. En la notación de esta ecuación, T_e está relacionado con $|\omega_s - \omega_i|$ vía transformada de Fourier. Este tiempo y $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ (vía conservación de energía) son los parámetros que definen el comportamiento del sistema. Los detalles de la descripción del estado enredado y del SPDC en el cristal tipo II se pueden encontrar en [2], [5] y [6]. En [4] se describe el SPDC en general.

Tras haber detallado la naturaleza del estado enredado, volvamos a la absorción de los pares de fotones. Con luz clásica las tasas de absorción y ionización de N fotones varían con la densidad del flujo de fotones ϕ como ϕ^N [2]. En el caso de dos fotones se tiene que la absorción en TPA va como el cuadrado de la intensidad luminosa de la fuente. Para estados con un enredamiento débil se ha probado que la tasa de absorción para ETPA es lineal. Más precisamente, la relación que se ha obtenido tanto teórica como experimentalmente es que la tasa de fotones absorbidos es proporcional a la sección eficaz de absorción mediante ETPA por el flujo de fotones que inciden sobre la muestra [3]. En TPA la tasa de absorción por molécula r_{TPA} está descrita por [1]:

$$r_{TPA} = \sigma_E \phi + \delta_R \phi^2 , \qquad (3)$$

donde δ_R es la sección eficaz de absorción aleatoria de TPA (aleatoria en tanto que la luz emitida sigue una distribución de Poisson). Para ETPA esto se reduce a:

$$r_{ETPA} = \sigma_E \phi \ . \tag{4}$$

En el experimento se cambió la intensidad incidente ϕ usando unos filtros.

Si definimos a R_{abs} como la tasa de pares de fotones absorbidos por una molécula, a N como el número de moléculas en una muestra confinada a un volumen V y a c la concentración de moléculas en la muestra se tiene que [1]:

$$R_{abs} = cVN_A\sigma_E\phi' , \qquad (5)$$

donde N_A es el número de Avogadro y ϕ' la densidad del flujo de pares de fotones enredados incidentes. En este experimento se medirá la tasa de fotones absorbidos con un circuito de conteo de coincidencias. Para este caso $\phi' = \frac{R}{A}$ donde R es la tasa de pares de fotones detectados en coincidencias que han interactuado con las moléculas de la muestra en un área A. Así pues, se obtiene la siguiente relación lineal entre los fotones detectados y los absorbidos:

$$R_{abs} = \frac{cVN_A\sigma_E R}{A} , \qquad (6)$$

de donde se puede obtener la sección eficaz de absorción con la pendiente de la regresión lineal que se puede hacer a partir de los datos. R es una cantidad que se puede regular con los filtros mencionados anteriormente y R_{abs} es justamente lo que se midió. Si la molécula se encuentra en un solvente (como el metanol en este caso), el solvente también absorbe fotones, así que se debe tener en cuenta que $R_{abs} = R_{solvente} - R_{muestra=RhB+metanol}$.

III. MARCO EXPERIMENTAL

En la siguiente figura se muestra un esquema del montaje experimental y una descripción del mismo:



Figura 1: El montaje consiste en un láser de diodo de 405nm que se enfoca con un lente biconvexo de $f=40{\rm cm}$ (ubicada entre 35 y 37 cm [7]) para generar pares de fotones enredados con un material no lineal (un cristal tipo II de BBO, borato de bario β) correlacionados temporalmente. Tras esto, se filtra el haz (usando los mismos filtros de la CCD, teniendo en cuenta la sensibilidad de los SPCs) y se colima con un lente plano-convexo de f = 4cm (para preservar el tamaño de los anillos). El rayo se concentra con un lente plano-convexo de f = 1,1cm (del lado convexo) para que incida en la muestra y el haz de fotones que no fueron absorbidos se "re-ensancha" al tamaño del haz original con otro lente de la misma distancia focal. El objetivo del uso de estos lentes para enfocar el haz es aumentar la probabilidad de que los pares de fotones enredados sea dispersada por la misma molécula de la muestra. Los fotones dispersados pasan por un divisor de haz polarizador (PBS para que los fotones *idler* vayan por un lado y los *signal* por el otro) y por unas fibras ópticas. Los fotones se cuentan con single photon counters (SPCs), los cuales permiten medir con ciertos equipos electrónicos y el software $qu\tau ools$ permite medir el número de fotones que no fueron absorbidos y el tiempo de llegada para observar su correlación temporal.

Para familiarizarnos con los equipos del laboratorio y con el montaje empezamos por ver cómo son los fotones enredados que salen del cristal tipo II, los cuales impactan la muestra tras colimar el haz y enfocarlo con un lente. La manera de hacer esto es tomando unas fotos de unos anillos que se observan debidos a la interacción de los pares enredados, permitiendo a su vez entender el método SPDC. En el montaje se utiliza un láser azul de 405nm y los fotones que salen del cristal, por conservación de energía, son ambos de 810nm, así que se salen del rango de luz visible. Para observarlos se utilizó una cámara CCD. Como se producen pares de fotones en el cristal birrefrigente, hay dos focos de fotones con polarizaciones distintas que se originan simétricamente en dos conos. Cuando estos se proyectan sobre algún tipo de pantalla, se ven como unos anillos, como se ve en la siguiente figura.



Figura 2: Generación de pares de fotones enredados con un cristal tipo II junto con su diagrama de Feynman y condiciones de *phase matching*. Tomado directamente de [5]. La subfigura b) a su vez explica por qué los pares de fotones permiten llegar a estados excitados a los que los fotones individuales no pueden axceder cuando interactúan con la materia.

El primer paso del experimento fue registrar los anillos con una cámara CCD. Este procedimiento exige encontrar el ángulo del cristal apropiado para el *phase matching* en conjunción con la incidencia apropiada del láser, así que exige una calibración delicada que tomó un tiempo mayor al esperado. Después de varias horas en el laboratorio, se pasó de obtener los anillos de la figura 3 a los de la figura 4:



Figura 3: Anillos de los fotones *signal* e *idler*. En el centro de la imagen se ven los fotones de bombeo y los anillos no están muy bien definidos, lo cual motiva haber cambiado el filtro de la cámara.

Además de alinear el láser con los espejos que se muestran en la figura 1 para que incida directamente sobre el cristal (a un ángulo apropiado para el *phase matching*) y además de mover el cristal en el montaje, se ve de la figura 3 que la cámara no estaba captando toda la intensidad del borde de los conos de los fotones signal e idler, y que estaba capturando los pump del centro de la figura más de lo deseado. Por tanto, para obtener la imagen 4 se cambió el filtro de la CCD: a un pasaaltas de 750nm se agregó un pasabandas de (810±10)nm. Este proceso se realizó sin el filtro, el lente colimador, la RhB, etc., es decir, esta primera calibración sólo usó el láser, los espejos, el BBO y la CCD. Todas las calibraciones aquí descritas han tomado más tiempo del necesario, pero en proceso se ha aprendido a usar y montar los distintos aparatos ópticos, a respetar las precauciones de seguridad del laboratorio y a ver cómo distintas configuraciones del montaje (que se pueden ver con los cambios en los anillos) encarnan la descripción teórica realizada en la sección anterior.



Figura 4: Anillos de los fotones *signal* e *idler*. Los fotones de bombeo pasan por su centro. En las dos intersecciones de los anillos se pueden detectar las coincidencias de los fotones enredados. Para aumentar el conteo de coincidencias y para que este dé cuenta de manera apropiada del enredamiento temporal, se busca que sólo haya una región de intersección.

Tras esto, continuaron los ajustes del ángulo en el que el láser incide en el cristal. En este caso, como el cristal tiene unos ejes a lo largo de los cuales se da la diferencia de velocidades mencionada anteriormente, hay una configuración óptima para la cual los dos anillos son tangenciales entre sí. Esta configuración se denomina *colineal*, y es deseable porque en las intersecciones de los anillos hay coincidencias de fotones enredados. En estas regiones los fotones son indistinguibles en polarización. Al asegurarse que sólo se encuentren los fotones *signal* e *idler* en la intersección, se garantiza su correlación espacial y temporal. La configuración colineal se muestra en la siguiente figura:



Figura 5: Anillos de los fotones *signal* e *idler* colineales. Por conservación del momento, los pares de fotones enredados en la intersección salen en la dirección de los de bombeo.

Para acoplar las fibras ópticas y que se logren contar coincidencias con dispositivos electrónicos, es necesario que la intersección de los anillos llegue exactamente a cada una de las fibras. El divisor de haz polarizador hace que sólo quede un anillo propagándose hacia arriba y hacia la derecha (respectivamente) de la figura 1 pero, como los pares de fotones enredados en la intersección salen en la dirección de los de bombeo, hay que alinear el rayo de bombeo para que incida exactamente sobre las fibras ópticas. Para ello, se emite luz láser roja desde el otro extremo de las fibras ópticas. Si el láser azul y el rojo inciden en exactamente el mismo punto de cada uno de los espejos y en el divisor de haz, se sabe que ambos láseres recorren el mismo camino óptico, así que el láser azul en efecto entra a la fibra. Este proceso de calibración es delicado y requiere que la altura, la orientación angular y el desplazamiento transversal del láser azul sean los indicados; de lo contrario no se observarán coincidencias.

Tras haber logrado esto, hay que poner un lente colimador para que los anillos no disminuyan de tamaño a medida que nos alejamos del cristal. Para ello, se montó un lente colimador plano-convexo de f = 40mm y, tras el lente, se montó un espejo para reflejar la luz que atraviesa el lente y revisar con la CCD que los anillos no se hacen más grandes ni más pequeños a medida que la distancia entre el cristal y la cámara aumenta. La motivación detrás de esta calibración era mantener el tamaño de la intersección de los anillos para que esta incidiera exactamente en la muestra de RhB. Estos anillos se pueden ver en la siguiente figura.



Figura 6: Anillos colimados a distintas distancias. Como el tamaño de estos es prácticamente el mismo a medida que se aleja la cámara, se logró colimar el haz. En otras palabras, el lente quedó a la distancia focal indicada y el láser incide perpendicularmente sobre la cara plana del lente, pues alejando la CCD se ve que los anillos no se distorsionan de ninguna forma.

Para lograr colimar bien el rayo también hizo falta poner una apertura que cortara parte del haz, pues el diodo del láser no produce una fuente puntual de luz coherente. Como se ve en la siguiente figura, la apertura permitió tener un solo haz de luz. Esta fue una de las razones por las que al principio se pensaba que el rayo no estaba bien colimado. Para esta calibración se utilizó un perfilador de haz (*beam profiler*).

5



(a) Perfil del rayo en la posición del cristal BBO antes de poner la apertura.



(b) Perfil del rayo en la posición del cristal BBO después de poner la apertura. Se ve un único haz bien concentrado donde está la mayor intensidad de la luz y, por tanto, se logra una mejor SPDC.

Figura 7

Tras esto, se usó el montaje que se muestra en la figura 1 sin los lentes y sin la muestra para detectar coincidencias al acoplar las fibras ópticas (con el camino óptico establecido con los láseres azul y rojo) a los contadores de fotones individuales. La detección de estas coincidencias -que en efecto estén enredadas- se hace mediante la medición de la función de correlación temporal de segundo orden, la cual muestra que el tiempo de llegada de los fotones signal e idler que salen enredados del BBO a las fibras ópticas respectivas está correlacionado. Este proceso permitió aprender cómo se detectan y procesan las mismas señales que serían obtenidas usando la muestra. Para ello se usó el software $qu\tau ools$, como se ve en la siguiente figura:



(a) Primera imagen de coincidencias obtenida. En el histograma se ven los canales que salen de cada fibra óptica de 1, a las cuales entran los fotones *signal* e *idler*. Asimismo, se observan 18834 coincidencias, las cuales corresponden a fotones que llegan a los detectores desfasados en un intervalo temporal específico (del orden de ns).



(b) Función de correlación temporal de segundo orden en función de la diferencia temporal de llegada de los pares de fotones asociadas a las coincidencias de la subfigura 8a.

Figura 8

IV. RESULTADOS

Después de haber cumplido con los objetivos preliminares se empezó a estudiar la ETPA. En primer lugar se debe hacer sólo con el metanol, como fue argumentado en el marco teórico. Para caracterizar las muestras se llevó a cabo el denominado *z-scan*. Este consiste en mover la muestra entre los dos lentes para ver cómo se comporta la interacción entre los pares de fotones enredados y la muestra cuando esta se encuentra en el foco y en las regiones en la que el rayo de luz diverge [8]. Los resultados del primer *z-scan* llevado a cabo para metanol puro y para una concentración de RhB diluida en metanol de 100μ M se ven en la siguiente figura (había cerca de 8300 coincidencias en ausencia de las muestras):



Figura 9: *z-scan* para metanol puro y para una concentración de RhB diluida en metanol de 100μ M. La distancia 0 es aquella para la cual la cubeta con la muestra se encuentra pegada al lente más cercano al cristal. La cubeta se encontraba en una ranura impresa en 3D y esta, a su vez, en una base móvil DT12. Contando el número de revoluciones asociadas al tornillo micrométrico de la base (0.35mm por revolución, [9]) se puede medir la distancia en que se traslada la muestra. En el eje y se ve el número de coincidencias registradas con $qu\tau ools$.

La absorción del metanol es relativamente constante y la de la RhB decrece a medida que uno se aleja del lente de la izquierda en la figura 1. Sin embargo, en la figura 9 se barre todo el espacio entre los lentes y, si bien se esperaba un decrecimiento asociado a la ETPA cerca del foco [8] (pues es donde más se concentran los fotones de la SPDC sobre la muestra, así que hay la mayor tasa de absorción), debería haber empezado a crecer el número de coincidencias a medida que nos acercábamos al lente de la derecha. Asimismo, se esperaba una absorción mucho mayor por parte de la muestra de RhB en comparación a la del metanol, pero hay una diferencia de más de 3000 coincidencias. Lo que estaba sucediendo era que, como la cubeta era mucho más alta que la ranura, esta se inclinaba ligeramente hacia adelante o hacia atrás (hacia el haz o alejándose del haz). Al no tener incidencia normal en ambas series de datos se consideró necesario repetir las medidas estabilizando la cubeta.

No obstante, como el espacio entre los lentes de 11mm era tan pequeño (pues los 11mm se miden desde el centro de la lente, así que en vez de los 22mm asociados a ambas lentes se contaba con unos 15mm por el montaje), tras estabilizar la cubeta hizo falta volver a hacer la calibración del montaje posterior a la colimación de los anillos colineales para volver a observar coincidencias. En este proceso se intentó optimizar el número de coincidencias para mejorar la ETPA pero de los datos tampoco se obtenían los resultados deseados. Inicialmente se variaba la intensidad del láser con la corriente que circulaba por el diodo. Para intentar mejorar los resultados respecto a los de 9 se aumentó la potencia del pump haciendo que fluyera la máxima corriente del láser (50.46mA) pero, como la ETPA funciona mejor a bajas intensidades, se usó un filtro de densidad neutra ND 0.5 para hacer menos intensa la SPDC. Usando estos filtros se podía dar cuenta de la variación en la intensidad mejor que con los cambios en la corriente. Además, como se presentó en el marco teórico, la tasa de fotones absorbidos es proporcional a la concentración de la muestra por la ecuación 6, así que se aumentó la concentración de RhB para ver si mejoraba el *z-scan.* Los resultados se muestran en la siguiente figura:



Figura 10: *z-scan* para metanol puro y para una concentración de RhB diluida en metanol de 5mM. Se usó la misma metodología que en la figura 9. Sin embargo, se aumentó el tiempo de integración de *qutools* para obtener un número de coincidencias que fluctuara menos que en el caso anterior.

Estos resultados son menos representativos que los que fueron recogidos en la figura 9 porque la absorción decrece (el número de coincidencias aumenta, así que hay más pares de fotones enredados que pasan derecho sin interactuar con la muestra) a medida que se aleja la muestra del lente de la izquierda. Lo que se debería haber obtenido, como se mencionó anteriormente, es una línea horizontal para el metanol y un valle cerca del foco en la RhB aún más pronunciado que en la figura 9 al usar una concentración mayor. La fuente de error más probable es la re-calibración anteriormente mencionada. Sin embargo, lograron obtenerse más coincidencias que antes (que también estaban correlacionadas, como se pudo comprobar generando la función de correlación temporal de segundo orden), así que los haces de los fotones signal e idler sí estaban entrando a las fibras ópticas tras el PBS. Ligeras modificaciones de la distancia focal entre los lentes de 11mm tampoco permitieron mejorar estos datos.

V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este experimento se alineó una fuente de fotones correlacionados temporalmente con un cristal BBO tipo II. Se logró observar con una cámara CCD la emisión de los pares de fotones en el cristal tras calibrar algunos lentes y espejos y, tras entender la SPDC y el phase matching en el cristal, se lograron manipular los instrumentos ópticos para obtener una configuración colineal en los anillos de dichos fotones. Asimismo, se logró colimar el haz ubicando un lente separado del cristal a su distancia focal, y se comprobó que la colimación fue efectiva alejando la cámara CCD del lente y viendo que los anillos no cambiaban de tamaño (de donde se dedujo que el haz no estaba divergiendo). Por otro lado, se logró la alineación de los haces que salían del PBS para que entraran a las fibras ópticas viendo que tanto el conteo de fotones individuales como el de coincidencias aumentan. Esto requirió entender el funcionamiento de los detectores y del software que procesa estas señales, así como una calibración adicional que permitiera obtener fotones correlacionados temporalmente y no sólo ruido que llegaba aleatoriamente al detector. Para esto último se utilizó la función de correlación de segundo orden como señal de la mejora en la calibración del montaje.

A lo largo del experimento se presentaron dificultades concernientes a la adecuada calibración de los equipos. El grueso del tiempo destinado al experimento consistió en fijar algún instrumento o en moverlo con la precisión requerida para poder observar lo que se estuviera buscando en esa ocasión, desde los anillos hasta las coincidencias. Así pues, no sobra enfatizar

- J. P. Villabona-Monsalve, O. Calderón-Losada, M. Nuñez Portela, and A. Valencia, "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*, vol. 121, pp. 7869–7875, Oct. 2017.
- [2] H.-B. Fei, B. M. Jost, S. Popescu, B. E. A. Saleh, and M. C. Teich, "Entanglement-Induced Two-Photon Transparency," *Physical Review Letters*, vol. 78, pp. 1679–1682, Mar. 1997.
- [3] J. P. Villabona-Monsalve, O. Varnavski, B. A. Palfey, and T. Goodson, "Two-Photon Excitation of Flavins and Flavoproteins with Classical and Quantum Light," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 140, pp. 14562–14566, Nov. 2018.
- [4] R. W. Boyd, "Chapter 2 Wave-Equation Description of Nonlinear Optical Interactions," in *Nonlinear Optics* (*Third Edition*) (R. W. Boyd, ed.), pp. 69–133, Burlington: Academic Press, Jan. 2008.

la sensibilidad de los instrumentos ópticos para lograr obtener resultados. Esta es la razón por la que no se alcanzó a obtener la relación lineal presentada en el marco teórico sino solamente el z-scan; la calibración de los instrumentos y del montaje tomó la mayor parte del semestre. Además, en este z-scan se obtuvieron resultados diferentes a los esperados salvo en el caso del metanol en la figura 9 y, hasta cierto punto, en el de la RhB para esta misma parte del experimento. La fuente de error más probable es la re-calibración para estabilizar la cubeta. Se pudo concluir que la alineación del foco para la ETPA depende de si se hacía sin la muestra o no. Si bien la absorción constante en el metanol y el aumento de la absorción por parte de la RhB cerca al foco eran de esperarse, los resultados no pudieron mejorarse ni replicarse a pesar de que el que la muestra se moviera exigía buscar una mayor sistematicidad en las mediciones. Aunque no se logró el objetivo final del experimento, a saber, cuantificar la sección eficaz de absorción por ETPA en la RhB, fue posible hacer una caracterización de las muestras por ETPA y se logró hacer el montaje para que se produjeran y detectaran los fotones enredados. Optimizar el proceso de calibración y acople posibilitaría y facilitaría encontrarla.

VI. AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a la profesora Mayerlin Núñez por su orientación a lo largo del semestre. Gracias al Dr. Matthieu Pellaton por su ayuda con el montaje y su disposición a resolver nuestras dudas. Finalmente, gracias Johnny Tenorio por la asesoría en el laboratorio y en el uso adecuado de todos los instrumentos.

- [5] C. Couteau, "Spontaneous parametric down-conversion," Contemporary Physics, vol. 59, pp. 291–304, July 2018.
- [6] N. Boeuf, D. A. Branning, I. Chaperot, E. Dauler, S. Guerin, G. Jaeger, A. Muller, and A. L. Migdall, "Calculating Characteristics of Noncollinear Phase Matching in Uniaxial and Biaxial Crystals," vol. 39, pp. 1016–1024, Jan. 2000.
- [7] J. P. González-Aguilera, C.-G. J. F., and M. Nuñez-Portela, "Informe final laboratorio intermedio - caracterización de retrasos temporales de luz en pares de fotones correlacionados," 2019.
- [8] J. Wang, B. Gu, X.-W. Ni, and H.-T. Wang, "Z-scan theory with simultaneous two- and three-photon absorption saturation," *Optics & Laser Technology*, vol. 44, pp. 390–393, Mar. 2012.
- DT12 Series 0.5" Dovetail Stages. Disponible en https://www.thorlabs.com/drawings/ 26a53ccee1611c3a-6FD61FE6-EAB9-2F53-2DD8FA22D8A7167F/ DT12-Manual.pdf.