

Construcción de una fuente de luz pseudo-térmica y medición de la función de correlación temporal de segundo orden

Sofía Garzón Mora,^{*} Lina María Ortíz,^{**} and Santiago Salazar^{***}*Departamento de Física**Universidad de Los Andes*

(Dated: 8 de diciembre de 2017)

En este proyecto se generó una fuente de luz pseudo-térmica que sigue una distribución de Bose-Einstein, a partir de la incidencia de luz proveniente de un láser Helio-Neón en un disco granulado en rotación. Se obtuvo una mejor distribución de la luz para un tiempo menor al tiempo de correlación, de $500\mu s$, con una tendencia de la distribución de centrarse en cero para tiempos menores. Se buscó medir la función de correlación temporal de segundo orden, pero debido a falta de precisión de un programa computacional y algunos instrumentos, no se obtuvo la distribución gaussiana esperada.

I. INTRODUCCIÓN

En 1956, Robert Hanbury Brown y Richard Q. Twiss publican su investigación acerca de un nuevo interferómetro, desarrollado por ellos mismos[1]. En su investigación, Hanbury Brown y Twiss evidencian el vínculo entre la correlación de los fotones y las fluctuaciones de intensidad, cuantificado en la función de correlación de segundo orden. Originalmente, esta técnica fue desarrollada para obtener mejores mediciones de los diámetros de estrellas lejanas pero se ha vuelto muy relevante en la óptica cuántica.

Las técnicas desarrolladas por Hanbury Brown y Twiss son de gran importancia en la medición del tiempo de correlación y la función de correlación temporal de segundo orden. Durante esta investigación, se buscó aplicar los anteriores conceptos para caracterizar una fuente de luz pseudo térmica. Con el fin de lograr esto se fijaron los siguientes objetivos:

- Construir una fuente de luz pseudo-térmica.
- Comprobar que el tiempo de correlación depende de la velocidad angular del disco.
- Medir la función de correlación temporal de segundo orden y verificar que esta sigue una distribución gaussiana.

Para comprender la relevancia del procedimiento experimental seguido, cabe mencionar que a pesar de que se había realizado un procedimiento similar en años anteriores[2], no habían sido tomadas estas mediciones de la forma mencionada previamente en los laboratorios de la universidad. Por lo tanto surge la motivación de realizarlo, con el fin de obtener nuevos resultados que

permitan una mejor comprensión sobre el comportamiento de este tipo de fuentes de luz.

Se seguirá entonces el procedimiento descrito en [3] y [4], realizando las modificaciones adecuadas según el espacio y los instrumentos disponibles en el laboratorio, para así lograr los objetivos de forma satisfactoria.

II. MARCO TEÓRICO

Algunos de los conceptos claves empleados durante el análisis del proyecto se presentan a continuación.

La *función de correlación* es una función que cuantifica la relación entre variables aleatorias separadas en un intervalo espacial o temporal[1]. La *función de correlación temporal de segundo orden*, la cual representa las fluctuaciones de intensidad, está dada por

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I(t)I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle \langle I(t+\tau) \rangle}.$$

Se midió entonces $g^{(2)}(\tau)$ contando las coincidencias de fotones entre dos detectores para varios tiempos de retraso entre ellos.

El *tiempo de correlación* (τ) es el intervalo de tiempo dentro del cual la fase de una onda puede ser predicha por las condiciones al inicio del intervalo[1]. La *luz coherente* es aquella que tiene un tiempo de correlación infinito, como por ejemplo un láser. Este tipo de luz sigue una distribución de Poisson y cumple que

$$g^{(2)}(\tau) = 1.$$

Por su parte, la *luz térmica*, presenta la característica de que $g^{(2)}(\tau)$ para esta fuente tiene la forma gaussiana, con un tiempo de correlación $\tau \propto \frac{1}{\Delta\omega_f}$ en donde $\Delta\omega_f$ es el rango de frecuencias de la onda. Sigue

^{*} s.garzon10@uniandes.edu.co

^{**} lm.ortiz11@uniandes.edu.co

^{***} s.salazar12@uniandes.edu.co

además una estadística de Bose-Einstein, donde un ejemplo de este tipo de fuente es la radiación de cuerpo negro.

Ahora, la *luz pseudo-térmica* sigue una estadística entre una luz coherente y una térmica. Las fuentes pseudo-térmicas tienen tiempos de correlación que son varios órdenes de magnitud mayores que las fuentes térmicas [3].

Una vez explicados brevemente los principales conceptos, es posible pasar a discutir el modelo usado para entender el fenómeno de las fuentes pseudo-térmicas.

Durante el desarrollo del experimento se utilizó un acercamiento semi-clásico. Esto significa que durante la trayectoria de la luz desde el láser, pasando por el disco y hasta antes de entrar al detector, esta se entiende como una onda electromagnética. Sólo en el momento de detección se trata con fotones y la naturaleza cuántica de la luz. Este acercamiento es suficiente ya que la distribución de la luz y los tiempos de correlación pueden ser derivados clásicamente [1].

La ventaja de un acercamiento semi-clásico es que se simplifica la interpretación de los resultados y cálculos. De esta manera se pudo derivar la siguiente ecuación para el tiempo de correlación τ_C para una fuente pseudo-térmica generada por un disco en rotación:

$$\tau_C = \frac{\omega_0}{2\sqrt{\pi r \nu}} \quad (1)$$

en donde ω_0 es el radio del haz incidente sobre el disco, r es la distancia del punto de incidencia al eje de rotación y ν es la frecuencia de rotación del disco. (Una derivación de esta ecuación se encuentra en el apéndice B).

Por otro lado, la forma de la función de correlación solo puede ser explicada cuánticamente. Para una luz pseudo térmica, $g^{(2)}(\tau)$ tiene una forma gaussiana centrada en $\tau = 0$ debido al efecto llamado *photon bunching*, en el cual los fotones tienden a viajar en grupos separados. Lo anterior implica que es más probable que se midan 2 fotones al mismo tiempo (coincidencias) cuando el retraso entre dos detectores es cero.

Durante el experimento, se generó la aleatoriedad del photon bunching por medio de la distribución aleatoria de las imperfecciones del disco rotacional [5]. Entre más desordenada sea la distribución de estos centros de dispersión, la luz tiende a ser más térmica. De esta manera también se explica la dependencia de la frecuencia de rotación en (1). El sistema del disco se puede entender como una manera de replicar la naturaleza estocástica de la emisión atómica, que es característica de la luz térmica.

III. MARCO EXPERIMENTAL

Durante la toma de datos se usó un láser de Helio-Neón (He-Ne) con una longitud de onda de $633nm$. Este láser incide sobre un disco de vidrio granulado, el cual se encuentra en un soporte que permite su rotación a una velocidad dependiente del voltaje aplicado por medio de una fuente. Se ubicaron dos espejos para dirigir la luz proveniente de la fuente, se utilizaron filtros e iris para regular la intensidad de la luz y ajustar la apertura. Luego se utilizaron los acopladores para concentrar la luz en una Fibra Óptica Multimode por medio de un proceso que se llama acoplamiento. Se hizo el conteo de número de fotones que están incidiendo por medio del Single Photon Counter, el cual tiene una ventana de medición de $7ns$ y un valor de conteos en oscuro de 250 conteos por segundo. Esta información la recibe la FPGA (Field Programmable Gate Array), que es un circuito programado para los propósitos del laboratorio y la envía al computador, en donde se guardan los datos. Se empleó un Beam Splitter para separar el rayo de luz en dos haces con la misma intensidad y dirigirlo a los detectores. Para reducir el diámetro del haz del láser se usó un lente biconvexo LB1471-B de distancia focal $f = 50mm$ y LA1229-A $f = 175mm$.

Antes de comenzar la toma de datos, se usaron varios iris para asegurarse de que el haz proveniente del láser estuviera alineado, es decir, tuviera la misma altura a lo largo de todo el montaje que se puede observar en la figura 1. Los espejos se añadieron con el propósito de usar el espacio disponible de manera más eficiente.

La primera parte de la toma de datos tuvo como objetivo confirmar que se obtenía una fuente de luz pseudo-térmica con un montaje similar al propuesto por Martiensen[3]. Para comprobar esto, se conectó la fibra óptica a un solo detector y usando el programa "Medición de correlación 2 detectores" (Desarrollado por la Universidad de los Andes) se tomaron datos con un tiempo de medición fijo. Luego el proceso se repitió para varios tiempos de medición sin modificar la velocidad de rotación del disco.

Una vez obtenidos estos primeros datos, se pasó a medir la frecuencia angular del disco en función del voltaje proporcionado por la fuente. Se utilizó un programa computacional (desarrollado por la Universidad de los Andes) que cuenta con un cronómetro, el cuál comienza cada vez que el camino de un láser es interrumpido y se detiene cuando vuelve a registrarse una interrupción. Para bloquear el camino del láser se pegó un trozo de cinta al borde del disco.

Después de medir la frecuencia angular para varios voltajes, se pasó a caracterizar el cambio de la distribución de la luz en función de la velocidad angular del disco. Con un tiempo de medición constante y sin modificar

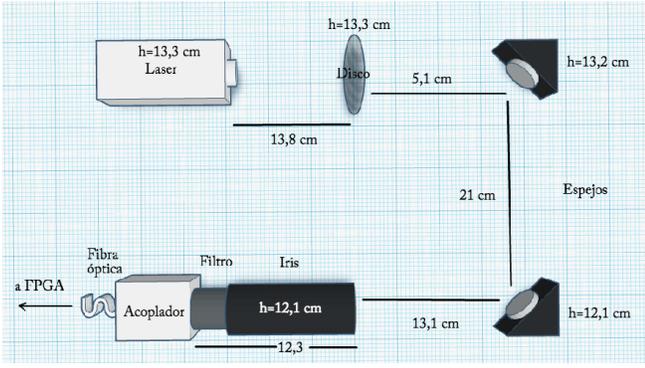


Figura 1. Montaje Experimental

el montaje, se tomaron las distribuciones para cada una de las frecuencias angulares presentadas en la tabla I.

Finalmente se pasó a medir la función de correlación temporal a segundo orden. Se conectó la fibra óptica a un beam splitter por fibra, el cual se acopló a 2 detectores y se usó la función de 2 detectores del programa. Para cada toma de datos, el programa usado realizó un barrido sobre varios tiempos de retraso. Estos tiempos de retraso modifican la forma en que el programa cuenta coincidencias. Por ejemplo: Para un retraso de $0s$ se cuenta una coincidencia si 2 fotones inciden sobre cada detector en el intervalo de la ventana de medición ($7ns$). Por otro lado, para un retraso de $10\mu s$ hay una coincidencia cuando el segundo fotón llega 10μ después del primero (teniendo en cuenta la ventana de medición $\pm 7ns$).

En un primer momento se tuvieron dificultades para observar la forma esperada de $g^{(2)}(\tau)$ y por ello se incluyeron dos lentes, con tal de reducir el diámetro del haz y mejorar la distribución según la ecuación (1). Para medir el diámetro del haz con y sin lentes, se utilizó el perfilador de haces junto su respectivo programa de computador. Se realizaron mediciones a intervalos de medición de $100\mu s$, $500\mu s$ y $1ms$ con tal de observar el comportamiento de $g^{(2)}(\tau)$ para la fuente de luz pseudo-térmica.

IV. RESULTADOS

A. Caracterización de la Distribución de la Luz

En la figura 2 se pueden observar las distribuciones obtenidas a $1,618 \pm 0,002 rad/s$ para tiempos de medición de $500\mu s$, $1ms$, $2ms$ y $10ms$. Junto al histograma de número de repeticiones contra conteos de fotones, se incluye la curva de la distribución de Poisson correspondiente a los datos. Esta curva ilustra la forma que el histograma debería tener si siguiera la estadística de un láser.

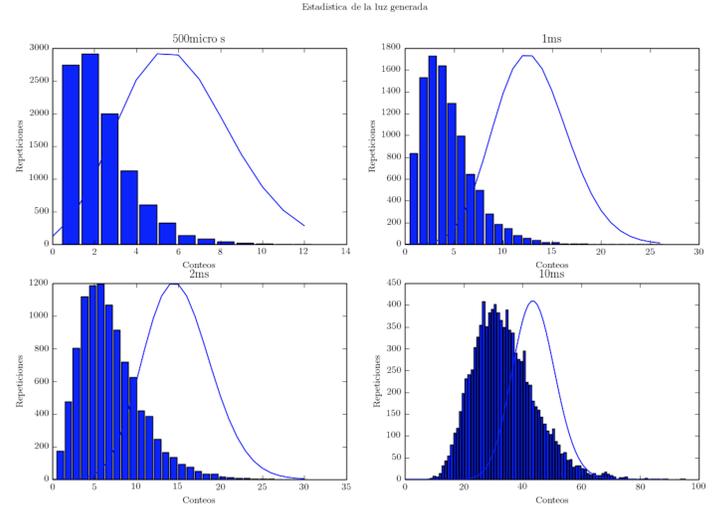


Figura 2. Datos obtenidos para varios tiempos de medición

En las gráficas se observa que a medida que el tiempo de medición decrece, la distribución tiende a centrarse en el cero, mientras que al aumentar el tiempo, se acerca a la curva de la distribución de Poisson. Esto se debe a que al aumentar el tiempo de medición, no se alcanzan a registrar las fluctuaciones de intensidad características de la luz no coherente. Usando estos datos, se concluyó que a $500\mu s$ se puede apreciar de mejor manera la tendencia a la distribución Bose-Einstein y por ello se escogió este valor como referencia para las mediciones con velocidad variable.

Los resultados del barrido sobre la velocidad angular del disco se observan en las figuras 3 y 4. La figura 3 presenta los datos para todas las velocidades. En esta se puede observar que la distribución no cambia de manera drástica en el intervalo de velocidades y se asemeja a una banda continua. Por otro lado, en la figura 4 se muestra la posición del máximo para cada velocidad.

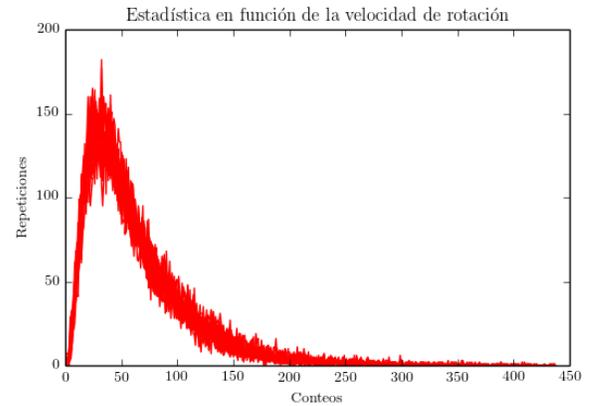


Figura 3. Comportamiento de la distribución al variar la velocidad angular.

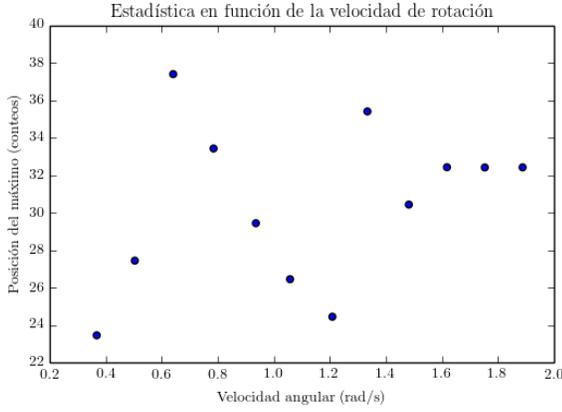


Figura 4. Posición de la distribución en función de la frecuencia de rotación.

A pesar de que, como se ve figura 4, no se pueden sacar conclusiones acerca de la posición del máximo en función de la velocidad de rotación, si se observa en la figura 3 que la distribución cambia ligeramente para distintas velocidades.

B. Medición de la Función de Correlación Temporal de Segundo Orden

Las mediciones se realizaron asegurándose de que se recibieran cerca de 60000 fotones entre ambos detectores a $1,888 \pm 0,002 \frac{rad}{s}$ o $1,753 \pm 0,002 \frac{rad}{s}$. Y las tomas de datos se hicieron durante un periodo de entre 8 y 9 horas, dependiendo de la cantidad de datos tomados por cada retraso. Para $100\mu s$ se tomaron aproximadamente 100×10^3 datos por retraso, mientras que para $500\mu s$ y $1ms$ se tomaron 398×10^3 y 200×10^3 datos por barrido, respectivamente. Se buscó obtener la mayor cantidad de datos posible debido a la baja probabilidad de observar coincidencias.

Todas las mediciones dieron una cantidad de coincidencias aproximadamente constante para todos los retrasos, lo cual es el comportamiento de una fuente de luz coherente y difiere de lo esperado. Por lo anterior, se buscó modificar el tiempo de correlación al cambiar algunas de las variables de las que este depende, ya que para un mayor tiempo de correlación hay mayor probabilidad de obtener coincidencias y se debería obtener la curva de la función de correlación temporal de segundo orden más fácilmente. Al intentar ubicar los lentes con el fin de disminuir el diámetro del haz incidente, el resultado fue similar a pesar de que el diámetro del haz medido fue de $177,1 \pm 0,1\mu m$ y disminuyó considerablemente comparado con $526,5 \pm 0,1\mu m$. Ambos diámetros dan un tiempo de correlación del orden de $0,1ms$ para un punto de incidencia sobre el disco $r = 11,2 \pm 0,1cm$ con respecto al eje de rotación.

V. CONCLUSIONES

A pesar de que no fue posible medir la función de correlación temporal de segundo orden y la dependencia del tiempo de correlación con la velocidad del disco, se obtuvieron resultados acerca del comportamiento de la fuente usada. Esto debido a que al variar algunos parámetros que determinan esta función y realizar la toma de datos, se obtuvieron los mismos resultados que para una fuente de luz coherente.

En primer lugar, se encontró que efectivamente es posible generar una fuente de luz con una distribución térmica usando la incidencia de un haz de luz coherente sobre un disco granulado, por medio de un proceso realizado siguiendo la literatura y los experimentos previos que en ella se discuten[4]. Se encontró además que la forma de esta distribución depende fuertemente del tiempo de medición en el que se tomen los datos. Esto ya que si el tiempo es muy grande, los datos obtenidos tienden hacia los de una fuente de luz coherente, por lo que es necesario encontrar una ventana de tiempo adecuada que permita obtener la distribución deseada, es decir, la más cercana a una distribución térmica posible.

Además, se demostró que la dependencia de la distribución térmica en la velocidad de rotación del disco es mucho menor a la esperada. Por lo cual se puede recomendar usar un motor que permita rotaciones más rápidas en el futuro, para así obtener una distribución mucho más cercana a la térmica. Sin embargo, la distribución obtenida con el disco empleado permite clasificar la fuente generada como una pseudo-térmica, logrando así uno de los objetivos propuestos inicialmente para el proyecto.

Por otro lado, una vez se tuvo la relación entre el voltaje aplicado al circuito del disco en rotación y su velocidad angular, se logró caracterizar de forma más precisa el orden de magnitud del tiempo de correlación para la fuente de luz generada. A partir de estos datos, tomando mediciones de la estadística de la luz, se observó que el máximo de conteos de fotones varía según esta velocidad de rotación y no hay un patrón claro de esta variación. No obstante se puede destacar el hecho de que hay un máximo de conteos para cierta velocidad angular que resulta óptima en la toma de datos.

Del estudio de la función $g^{(2)}(\tau)$ se puede concluir que la probabilidad de que dos fotones lleguen al tiempo en 2 detectores es muy baja y que la cantidad de datos necesaria para obtener esta curva, es un factor importante a tener en cuenta para futuras reproducciones. Es por esto que se realizaron medidas en tiempos grandes de forma que se aumentara considerablemente la probabilidad de obtener las coincidencias requeridas. A pesar de esto, no se obtuvieron resultados que permitieran observar

la distribución gaussiana esperada de la función ya que se obtuvo una distribución uniforme correspondiente a la de un haz de luz coherente. Para solucionar este problema y maximizar la cantidad de fotones observados se propone utilizar fuentes de mayor potencia, o un disco granulado que alcance mayores velocidades angular. Aunque se propuso implementar un programa computacional diferente de mayor precisión para la medición de coincidencias, este es de uso muy reciente en el laboratorio y requiere un mayor análisis de datos que no se ha estandarizado ni desarrollado en su totalidad. De esta forma, como trabajo futuro podría considerarse la implementación de este nuevo disco que permita variar en un mayor rango el tiempo de correlación, o el uso de otro software, entre otros métodos, con el fin de obtener la distribución gaussiana de la función de correlación temporal de segundo orden predicha teóricamente.

Apéndice A: Datos suplementarios

Cuadro I. Velocidad de rotación del disco para diferentes valores del voltaje aplicado.

$V (\pm 0, 1V)$	$\omega_1 (\pm 0, 001rad/s)$	$\omega_2 (\pm 0, 001rad/s)$
1,5	0,360	0,376
2,0	0,496	0,511
2,5	0,643	0,639
3,0	0,778	0,792
3,5	0,935	0,936
4,0	1,058	1,057
4,5	1,209	1,209
5,0	1,333	1,334
5,5	1,482	1,482
6,0	1,612	1,623
6,5	1,753	1,752
7,0	1,888	1,887

Apéndice B: Cálculo del tiempo de correlación

Debido a los tiempos de coherencia muy cortos que presentan las fuentes reales de luz térmica, resulta mejor emplear fuentes pseudo-térmicas.

Si la luz coherente se dispersa en una superficie áspera, se generan muchas fuentes independientes cada una con su propia fase. Las fases resultan de caminos ópticos diferentes que debe pasar la luz inicialmente coherente. La superposición de estas ondas conduce a una distribución de intensidad espacial que varía y genera un patrón de centros de dispersión. Este patrón puede describirse con el modelo de una marcha aleatoria de un campo eléctrico. La distribución espacial se modela entonces por medio de la estadística de Boltzmann,

$$p(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} e^{-\frac{I}{\langle I \rangle}}.$$

Donde $\langle I \rangle$ representa la intensidad I promedio.

Con el fin de generar radiación pseudo-térmica, se hace incidir luz coherente de láser en un disco (GGD). Al rotar el disco, la posición del punto en el vidrio se cambia y resulta en el patrón deseado que cambia constantemente. Las fluctuaciones de intensidad resultantes ocurren en un régimen temporal y pueden medirse con los instrumentos usuales, que es la razón por la que se busca usar este tipo de fuente.

Ahora, si λ es la longitud de onda de la luz del láser, y se ubica una pantalla para observar el patrón generado a una distancia z de la fuente, se tiene que el diámetro promedio de una de las regiones generadas en el patrón será,

$$d = \frac{\lambda z}{2\omega_0},$$

donde ω_0 es el radio del haz incidente en el disco.

Restringiéndose a cada región del patrón, la luz es espacialmente coherente, luego cada una de estas puede denominarse una celda de coherencia. Sin embargo, dos o más celdas no están correlacionadas. Al alterar la velocidad de rotación del GGD, la velocidad con la cuál el patrón de celdas varía puede ajustarse. El tiempo de coherencia τ_C correspondiente es mucho mayor y puede regularse por esta velocidad de rotación en un rango de $1\mu s - 1ms$. Este se calcula de la forma,

$$\tau_C = \sqrt{\pi} \frac{\omega_0}{v} = \frac{\omega_0}{2\sqrt{\pi r v}}.$$

En donde v es la velocidad tangencial del disco en el punto donde la luz del láser incide y se determina a partir de la frecuencia de rotación del disco ν y la distancia de la punta del láser al eje rotacional del disco, r [4].

Apéndice C: Problemas encontrados

La mayor cantidad de problemas se presentaron durante la toma de datos para medir la función $g^{(2)}(\tau)$. El primer hecho que quedó en evidencia fue que las coincidencias entre fotones son un evento bastante improbable y por lo tanto su detección debe realizarse contando con instrumentos y software bastante precisos. Al analizar los eventos para un retraso de 0 fijo y un tiempo de medición de $500\mu s$, se obtenía una coincidencia aproximadamente cada 5 segundos. Se intentó solucionar esta situación, modificando las aperturas de los iris, pero solo se logró

a máximos de 15 coincidencias en un intervalo similar, lo que no es un aumento lo suficientemente significativo como para obtener el resultado esperado.

Luego de varias semanas en las que se realizaron mediciones de estas coincidencias por medio de una fibra óptica single-mode sin obtener resultados, decidió modificarse esta fibra por una multi-mode. Esto ya que la primera solo recibe fotones en una dirección de polarización, lo que reduce en gran medida los fotones que se miden, y hace aún más complicada la medición de la función de correlación temporal de segundo orden. Por la naturaleza de la luz dispersada por el disco, fue necesario cambiar esta fibra por una multi-mode que posiblemente pudiera aumentar las coincidencias, para lo cual fue necesario realizar el acople y calibración del camino óptico del haz del láser nuevamente en el montaje. Sin embargo, incluso con esta fibra no se lograron obtener las mediciones requeridas.

Adicionalmente, la medición de la velocidad angular del disco en función del voltaje aplicado debió realizarse desmontando el disco del experimento y solicitando cola-

boración a laboratorios externos. La medición del diámetro del haz de luz proveniente del láser debió realizarse por medio de un método de análisis de imágenes para obtener una gran precisión.

REFERENCIAS

- [1] M. Fox. *Quantum Optics. An Introduction*. Ed. por Oxford University Press. Department of Physics y Astronomy. University of Sheffield., 2006.
- [2] Bin Bai y col. “Two-photon superbunching of pseudothermal light in a Hanbury Brown-Twiss interferometer.” En: *arXiv preprint arXiv:1705.03621*. (2017).
- [3] E. Spiller. W. Martienssen. “Coherence and Fluctuation in Light Beams.” En: *Am.J.Phys* 32 919 (1964).
- [4] *Photon Statistics*. Experiment 45. Advanced Lab Course (F-Praktikum). Universität Erlangen-Nürnberg. 2017.
- [5] F. T. Arecchi. “Measurement of the Statistical Distribution of Gaussian and Laser Sources.” En: *Physc. Rev. Lett*(15). 912 (1965).