



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA  
MEDIR CORRELACIONES EN PARES DE FOTONES

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**FÍSICO**

PRESENTA:  
**LUIS YVES VILLEGAS AGUILAR**

DIRECTOR DEL TRABAJO:  
**DR. DANIEL SAHAGÚN SÁNCHEZ**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



**TESIS**

---

*A Joaquín Eduardo Aceves Rodríguez,  
no he olvidado mi promesa.*

## Agradecimientos

Se agradece también al proyecto PAPIIT con clave IN116914, “*Estudio y fabricación de chips ópticos para transferencia de información cuántica*” con el cual se adquirió parte del equipo utilizado en este trabajo. De la misma manera al proyecto PAPIME PE104814, “*Fortalecimiento de la Enseñanza en los Laboratorios de Física Contemporánea I y II*”, gracias al cual llegué al laboratorio de óptica avanzada.

## **Resumen**

En el presente informe se detallan las actividades realizadas de acuerdo con el proyecto de titulación por

## Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>8</b>
<b>2. Correlaciones</b>	<b>9</b>
2.1. Teoría . . . . .	9
2.2. Motivación . . . . .	9
2.2.1. Caracterización de los haces . . . . .	10
2.3. Sistemas . . . . .	10
2.4. Resultados . . . . .	10
<b>3. Conclusiones</b>	<b>11</b>

## Índice de figuras

## **Índice de tablas**

## 1. Introducción

Consideremos un sistema de dos niveles, por ejemplo la polarización de un fotón que puede estar polarizado horizontal ( $H$ ) o verticalmente ( $V$ ). Este estado puede ser representado como la siguiente función de onda

$$|\varphi\rangle = c_1 |H\rangle + c_2 |V\rangle, \quad (1)$$

en donde  $|c_1|^2$  y  $|c_2|^2$  son las probabilidades de obtener  $H$  y  $V$  respectivamente al llevar a cabo una medición y por lo tanto  $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$ .

## 2. Correlaciones

### 2.1. Teoría

### 2.2. Motivación

El Laboratorio de Átomos Fríos y Óptica Cuántica del Instituto de Física de la UNAM - parte del Laboratorio Nacional de Materia Cuántica - tiene como propósito hacer investigación en metrología e información cuántica, por medio del estudio de sistemas cuánticos ópticos y materiales.

El experimento principal del Laboratorio es el de generación de pares de fotones (o *bifotones*) por medio de un proceso no lineal llamado *mezclado de cuatro ondas* (o FWM por sus siglas en inglés).

La técnica más estándar para generar bifotones es la de procesos de conversión espontánea paramétrica descendiente [1] (o SPDC por sus siglas en inglés) en cristales no lineales, como BBO. Sin embargo, el tiempo de coherencia de los fotones generados en SPDC es muy corto (del orden de ps) gracias a que poseen un amplio ancho de banda. Esto impide ciertos experimentos interesantes: incluso sistemas de detección de fotones con tecnología de punta tienen una resolución temporal de al menos decenas de ps [2]. Además, la corta longitud de coherencia los hace poco viables para interacciones átomo-fotón, haciéndolos poco deseables para estudios de información cuántica [3].

Por esto, en años recientes ha aumentado mucho el interés en generar pares de fotones con un ancho de banda angosto. Una solución simple es colocar el cristal para SPDC en una cavidad óptica [4]. Sin embargo, el desarrollo de técnicas de enfriamiento de átomos ha permitido estudiar la generación de bifotones en gases atómicos fríos por medio de procesos de FWM espontáneo. Utilizar este proceso trae varios beneficios: bifotones con un ancho de banda muy angosto, mayor eficiencia de producción y varios parámetros experimentales para poder controlar la función de onda resultante [5].

En 1986, Grangier et al [6] generaron haces de fotones individuales utilizando decaimientos atómicos en cesio para demostrar algunas propiedades cuánticas de la luz.

### 2.2.1. Caracterización de los haces

## 2.3. Sistemas

Casi 30 años después John S. Bell publicaría un artículo que pondría en duda si la paradoja EPR era de hecho una paradoja o si el análisis de Einstein, Podolsky y Rosen había pasado por alto algo importante.

## 2.4. Resultados

Consideremos un sistema de dos niveles, por ejemplo la polarización de un fotón que puede estar polarizado horizontal ( $H$ ) o verticalmente ( $V$ ). Este estado puede ser representado como la siguiente función de onda

$$|\varphi\rangle = c_1 |H\rangle + c_2 |V\rangle, \quad (2)$$

en donde  $|c_1|^2$  y  $|c_2|^2$  son las probabilidades de obtener  $H$  y  $V$  respectivamente al llevar a cabo una medición y por lo tanto  $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$ .

### 3. Conclusiones

Al final de todo, se logra pues, publicar un artículo en una revista arbitrada como resultado del trabajo detallado en este informe. El artículo pierde en un sentido y gana en otro con respecto a la idea original. Durante el primer arbitraje y las respectivas correcciones se pierde la discusión histórica y filosófica de las desigualdades de Bell y los estados entrelazados, además de algunos ejemplos que se creía esclarecerían la idea tras las desigualdades de Bell. Sin embargo, al deshacerse de esa parte, fue necesario ampliar el contenido acerca del experimento, se agrega una parte explicando cómo puede obtenerse cualquiera de los 4 estados de Bell a partir de la disposición original del experimento y el uso de placas retardadoras de fase.

El artículo en su estado final puede fácilmente cumplir con su labor de manual para llevar a cabo el experimento. Además de citar fuentes útiles tanto para la discusión teórica de las desigualdades como para su discusión filosófica. En el artículo se hace una clara distinción entre los resultados que predice cualquier teoría de variables ocultas locales en este experimento y las predicciones de la mecánica cuántica. Y por último se obtiene un parámetro de Bell que claramente viola la desigualdad de CHSH, probando así experimentalmente una vez más el teorema de Bell.

## Referencias

- [1] D. C. Burnham and D. L. Weinberg, “Observation of simultaneity in parametric production of optical photon pairs,” *Physical Review Letters*, vol. 25, no. 2, p. 84–87, 1970.
- [2] J. M. Lukens, O. D. Odele, D. E. Leaird, and A. M. Weiner, “Electro-optic modulation for high-speed characterization of entangled photon pairs,” *Opt. Lett.*, vol. 40, pp. 5331–5334, Nov 2015.
- [3] A. André, L.-M. Duan, and M. D. Lukin, “Coherent atom interactions mediated by dark-state polaritons,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 88, p. 243602, May 2002.
- [4] X.-H. Bao, Y. Qian, J. Yang, H. Zhang, Z.-B. Chen, T. Yang, and J.-W. Pan, “Generation of narrow-band polarization-entangled photon pairs for atomic quantum memories,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, p. 190501, Nov 2008.
- [5] S. Du, J. Wen, and M. H. Rubin, “Narrowband biphoton generation near atomic resonance,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 25, pp. C98–C108, Dec 2008.
- [6] P. Grangier, G. Roger, and A. Aspect, “Experimental evidence for a photon anti-correlation effect on a beam splitter: A new light on single-photon interferences,” *Europhysics Letters (EPL)*, vol. 1, no. 4, p. 173–179, 1986.