

Medición de operaciones de 1-qubit en fotones individuales.

Daniel F. Urrego and Víctor J. Mahecha.

Departamento de Física, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

(Dated: 28 de mayo de 2012)

I. INTRODUCCIÓN

Qubits

Análogamente al sistema clásico del código binario basado en 0 y 1, se encuentra en la mecánica cuántica un código basado en estados puros de un sistema. Estos estados deben cumplir con el principio de superposición generando un estado mixto, i. e.

$$|\Psi\rangle = \alpha|\Psi_1\rangle + \beta|\Psi_2\rangle \quad (1)$$

Donde $|\Psi_1\rangle$ y $|\Psi_2\rangle$ forman una base, siendo ortonormales entre si.

Para el caso de óptica cuántica los estados de interés están relacionados con el vector de Jones o vector de polarización en los fotones, el cual está ligado al campo magnético autoinducido del fotón¹. El estado de polarización puede encontrarse en diferentes formas dependiendo si el plano de polarización no es constante en el tiempo, es decir, el plano sufre rotaciones respecto al vector de translación de la onda electromagnética.

$$\vec{J} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix}$$
$$\vec{A} = A_x + A_y \quad (2)$$

Donde \vec{A} es la amplitud de la onda electromagnética.

$$\vec{E}(z, t) = Re[\vec{A}e^{i2\pi\nu(t - \frac{z}{c})}] \quad (3)$$

Los valores que acompañan los estados cuánticos de la ecuación (1) deben cumplir la condición de normalización y probabilidad, es decir.

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (4)$$

Cumpliendo estas propiedades es como se establece la unidad básica de información cuántica², es decir, un qubit. Comparando los qubit con los bits del sistema clásico se evidencia que mientras no se mida el qubit se tiene una incertidumbre en su valor, que a diferencia del sistema clásico sus valores siempre son conocidos.

Operaciones

Para pasar de un estado $|\Psi_{in}\rangle \rightarrow |\Psi_{out}\rangle$ se debe realizar una transformación sin que se pierdan las propiedades

de los estados cuánticos. Estas poseen una propiedad las cual es que son matrices Hermíticas, es decir, $A = A^\dagger$.

$$|\Psi_{out}\rangle = \hat{A}|\Psi_{in}\rangle \quad (5)$$

Bases

Se denota como horizontal / vertical a

$$|\uparrow\rangle = |H\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad |\downarrow\rangle = |V\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

La base diagonal se puede escribir en función de la anterior base de la siguiente forma:

$$|\nearrow\rangle = \frac{|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle}{\sqrt{2}} \quad \text{y} \quad |\searrow\rangle = \frac{|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

Por último la base circular la cual también se puede escribir en función de la base horizontal vertical:

$$|\circlearrowleft\rangle = \frac{|\uparrow\rangle + i|\downarrow\rangle}{\sqrt{2}} \quad \text{y} \quad |\circlearrowright\rangle = \frac{|\uparrow\rangle - i|\downarrow\rangle}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

Medición

Los qubits se mantienen en un estado probabilístico hasta llegar a ser medido, es decir, se encuentran en un estado de incertidumbre hasta el momento que se miden haciendo que la función colapse a uno de los posibles estados. Se mide la probabilidad de cada suceso de la siguiente forma:

$$|\langle\Psi_1|\Psi\rangle|^2 + |\langle\Psi_2|\Psi\rangle|^2 = 1 \quad (9)$$

$$|\alpha\langle\Psi_1|\Psi_1\rangle|^2 + |\beta\langle\Psi_2|\Psi_2\rangle|^2 = 1 \quad (10)$$

Lo que conlleva a que los valores que acompañan a los estados cuánticos son las amplitudes y el valor de $|\alpha|^2$ y $|\beta|^2$ son los valores de probabilidad de que el qubit se encuentre en uno de los dos estados. Las mediciones entonces nos dan información de los parámetros α y β .

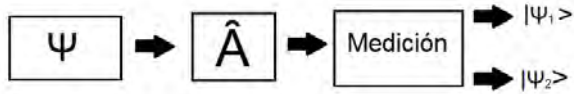


Figura 1. Operación y medición

El proceso de tener un qubit con un estado cuántico $|\Psi_{in}\rangle$, generar una transformación que lo lleva a un nuevo estado desconocido hasta llegar a la medición en la que ocurre el colapso de la superposición obteniendo un solo estado final.

En el momento que se realiza una operación en un estado inicial ecuación (5) se puede calcular el valor esperado de la operación por medio de la multiplicación $\langle \Psi_{out} |$ obteniendo:

$$\langle \Psi_{out} | \hat{A} | \Psi_{in} \rangle \quad (11)$$

Y recordando que $|\Psi_{out}\rangle$ es la superposición de los estados ortogonales

$$\langle \Psi_{out} | \hat{A} | \Psi_{in} \rangle = \underbrace{\langle \Psi_1 | \hat{A} | \Psi_{in} \rangle}_{\text{Valor esperado } |\Psi_1\rangle} + \underbrace{\langle \Psi_2 | \hat{A} | \Psi_{in} \rangle}_{\text{valor esperado } |\Psi_2\rangle} \quad (12)$$

Obteniendo así dos valores esperados relacionados con la base que se está midiendo los qubit. Se puede realizar la siguiente relación entre los valores esperados y la probabilidad de los estados.

$$|\langle \Psi_1 | \hat{A} | \Psi_{in} \rangle|^2 = |\alpha|^2 \quad \text{y} \quad |\langle \Psi_2 | \hat{A} | \Psi_{in} \rangle|^2 = |\beta|^2 \quad (13)$$

En otras palabras los valores esperados son aquellos coeficientes que acompañan la combinación lineal de los estados cuánticos del qubit.

II. MONTAJE EXPERIMENTAL

En la primera etapa del experimento el haz de fotones emitido por el láser (fotones “pump”) con $\lambda_{pump} = 405 \text{ nm}$ pasa a través del cristal no lineal, este es dividido en dos nuevos fotones cada uno con una longitud de onda de $\lambda = 810 \text{ nm}$. Para este proceso el haz que lleva los fotones que se van a operar se etiquetan con el nombre “idler” y el haz sobrante el cual será usado para medir las coincidencias de llegada de los fotones se etiqueta con el nombre “signal”, como se puede ver en la figura 2.

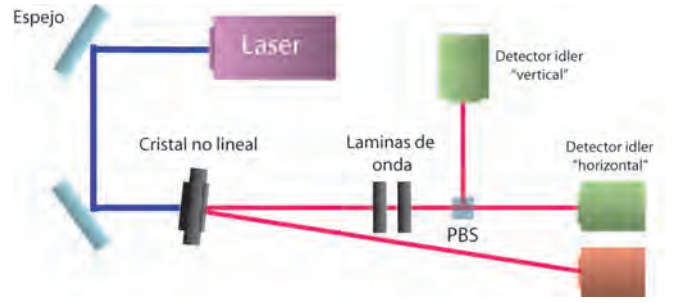


Figura 2. Montaje experimental

Diseño del montaje con la ubicación de los respectivos componentes necesarios para realizar las diferentes operaciones con los fotones idler.

La segunda etapa del experimento consisten en el desarrollo de diferentes operaciones con un 1-qubit, las cuales consisten en la rotación de la primera lámina de onda con la que se encuentra el fotón idler. Las operaciones que se van a realizar serán realizadas con una lámina de $\frac{\lambda}{2}$ o una lámina de $\frac{\lambda}{4}$. Para la tercera etapa del experimento se realizaron 3 modificaciones en el montaje para realizar la medición en diferentes bases, las cuales se muestran en las figuras 3-5.

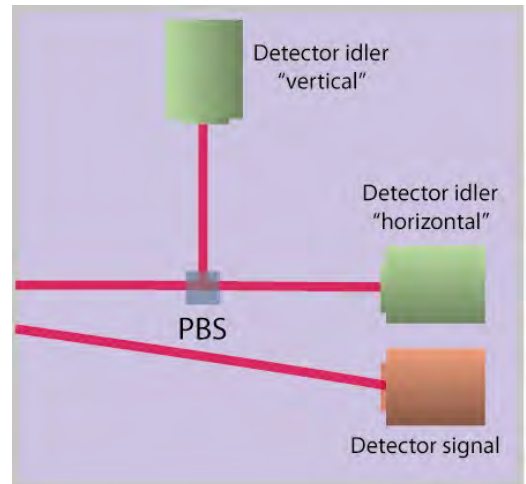


Figura 3. Configuración de medición para la base horizontal-vertical

Para este proceso el montaje de medición solo viene acompañado del de un polarizing beam splitter (PBS) y los respectivos detectores.

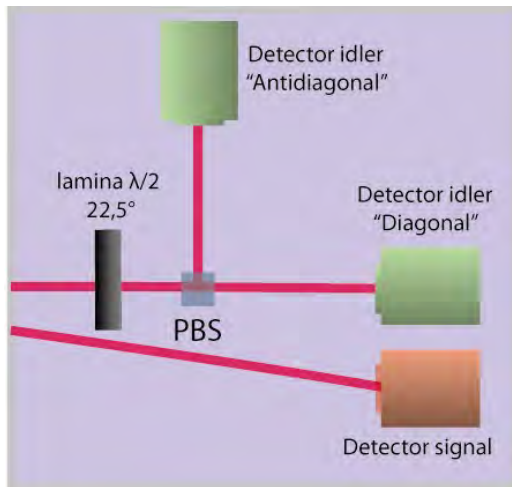


Figura 4. Configuración de medición para la base diagonal - antidiagonal

En esta ocasión el sistema de medición está acompañado de una lámina de media onda representada por una matriz de rotación. Al girarla $22,5^\circ$ conseguimos la representación del fotón en la nueva base.

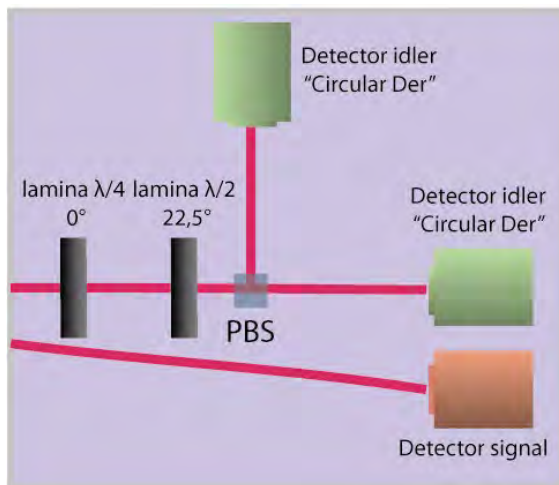


Figura 5. Configuración de medición para la base circular derecha y circular izquierda

Para este proceso el montaje viene acompañado de dos láminas, una lámina de media onda y una de cuarto de onda representadas por matrices de rotación, primera a $22,5^\circ$ y la segunda a 0° , consiguiendo la representación del fotón en la nueva base.

La última etapa consiste en la toma de datos. Los fotones "idler" y "signal" son dirigidos hacia los acopladores los cuales poseen los filtros de interferencia y el lente que redirige los fotones al interior de la fibra óptica. Por medio de la fibra se transportan los fotones hasta los detectores los cuales emiten un pulso o señal eléctrica que es recibida por FPGA. (FPGA es una tarjeta electrónica) La tarjeta le comunica al computador los datos recibidos los cuales son graficados y almacenados por el software *LabView*



Figura 6. LabView

Programa diseñado para mostrar las curvas de conteos de los 3 detectores y coincidencias entre detectores 1-2, 1-3 y 1-2. También para manipular los retardos y el tiempo de los intervalos de conteos de los fotones.

BBO (beta-barium borate) Cristal no lineal

Durante el paso del fotón *pump* por el cristal no lineal se realiza un proceso SPDC *Spontaneous parametric down-conversion*, el cual consiste en la división del fotón *pump* en dos nuevos fotones. El SPDC cumple la conservación de energía y de momento entre el estado del fotón *pump* y los estados de los fotones resultantes, es decir, *idler* y *signal*.

$$\vec{p}_{pump} = \vec{p}_{idler} + \vec{p}_{signal} \quad (14)$$

$$E_{pump} = E_{idler} + E_{signal} \quad (15)$$

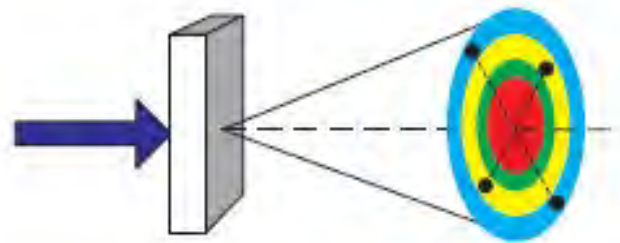


Figura 7. Conos generados por el cristal no lineal BBO⁷

El fotón *pump* en el momento de pasar por el cristal no lineal genera un cono de dispersión de los fotones los cuales se toman para el experimento dos fotones en el mismo plano horizontal.

Láminas de onda

También conocido como retardador de onda el cual cumple con la función de transformar la componente vertical del vector de polarización aplicándole una fase previamente determinada por diseños de fabricación. Para el caso del experimento se usa una lámina de $\frac{\lambda}{4}$ y otra de $\frac{\lambda}{2}$ las cuales tienen las siguientes matrices asociadas.

$$\hat{A}_{\frac{\lambda}{4}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix}$$

$$\hat{A}_{\frac{\lambda}{2}} = \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \sin(2\theta) \\ \sin(2\theta) & -\cos(2\theta) \end{bmatrix}$$

Para el caso de la matriz de $\hat{A}_{\frac{\lambda}{4}}$ la cual no tiene dependencia del ángulo θ se realiza una transformación de rotación.

$$\hat{A}(\theta)_{\frac{\lambda}{4}} = R(\theta)\hat{A}_{\frac{\lambda}{4}}R(-\theta) \quad (16)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Operación de $\frac{\lambda}{4}$ en función del ángulo

$$\hat{A}_{\frac{\lambda}{4}}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) - i \sin^2(\theta) & \cos(\theta) \sin(\theta) + i \cos(\theta) \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \sin(\theta) + i \cos(\theta) \sin(\theta) & -i \cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) \end{bmatrix}$$

Instrumentación

El instrumental requerido para realizar el experimento es:

Cantidad	Instrumento
1	Mesa anti vibraciones.
4	Láminas de onda ($\frac{\lambda}{2}$ y $\frac{\lambda}{4}$).
1	BBO: beta borato de bario SPDC.
3	Detectores de fotones.
1	Láser.
3	Filtros intererenciales de $810\text{nm} \pm 5\text{nm}$.
1	Beam splitter de polarización (PBS).
2	Espejos.
	Lentes.
	Fibras ópticas.
	Monturas de elementos ópticos varios.
	FPGA (tarjeta electrónica)

Tabla 1. Instrumentación de laboratorio
Materiales requeridos para el montaje del proyecto.

III. PROCEDIMIENTO

Semana: 1

Equipo: Mesa Antivibraciones
Software LabView.
Tarjeta FPGA.
Fibras ópticas
Detectores

Actividad: Introducción al laboratorio de óptica y sus equipos. Conexión de los detectores con las fibras ópticas, además de la visualización de los fotones detectados mediante el software de LabView.

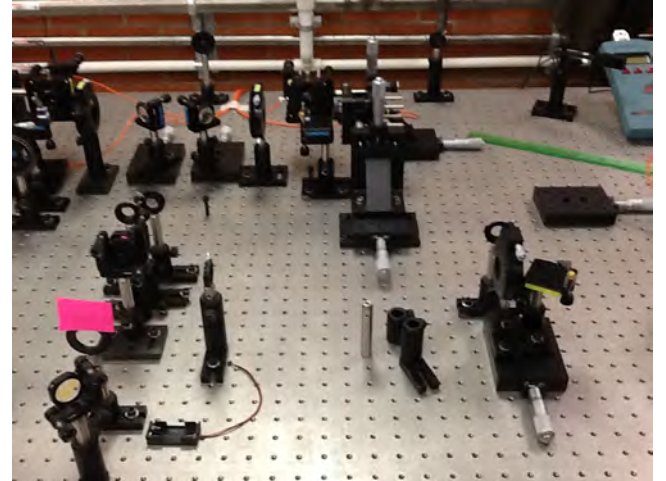


Figura 8. Espacio reservado para el montaje de láminas y 3^{er} detector.

Se tomaron las medidas de los instrumentos para buscar el espacio adecuado para su montaje.

Semana: 2 y 3

Equipo: Láser 405nm
Espejos
Cristal no lineal SPDC
Detectores signal y horizontal

Actividad: Alineación de los fotones idler y signal con sus respectivos detectores. Optimizamos la cantidad de conteos detectados, visualizados en el computador a través del software, con el fin de obtener un mayor número de coincidencias entre los detectores.

Semana: 4, 5 y 6

Equipo: Detector vertical
PBS

Actividad: En medio de la trayectoria del fotón idler, ubicamos nuestro PBS para desviar los fotones con orien-

tación vertical. Así mismo orientamos el detector vertical equidistante al detector horizontal con respecto al PBS. Realizamos una prueba la lámina $\frac{\lambda}{2}$ a 45° , en este caso todo el fotón pasa totalmente a vertical, de esta manera optimizamos coincidencias para nuestro segundo detector con signal.

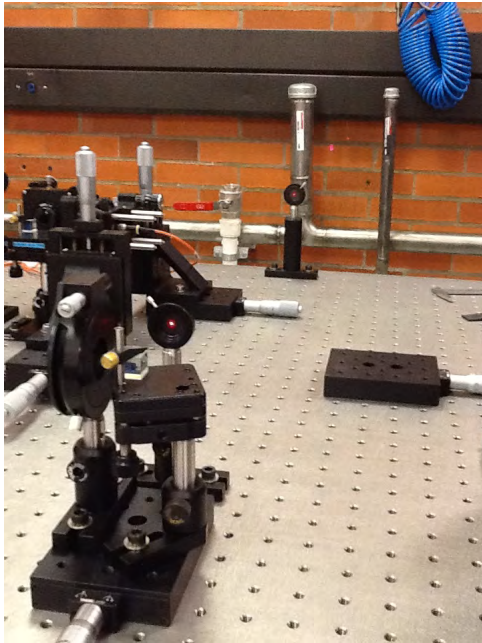


Figura 9. Alineación PBS

Instalación del PBS y su alineación usando iris para ello, en la figura se puede ver un láser de color rojo usado para ese fin. La alineación se realizó sin la instalación del 3^{er} detector.

Semana: 7 y 8

Equipo: Lámina $\frac{\lambda}{4}$ y $\frac{\lambda}{2}$ Soporte para láminas

Actividad: De a cuerdo a la matriz que define la operación en cada lámina definimos ángulos donde se presentan los cambios más significativos en la polarización del fotón. De esta manera montamos cada lámina y variamos sus ángulos en rangos de $[0^\circ, 180^\circ]$. El software registraba conteos cada 0.5 segundos por eso para obtener un buen número de datos tomamos datos en intervalos de 3 minutos. Para la lámina $\frac{\lambda}{2}$ se analizaron 17 ángulos y para $\frac{\lambda}{4}$ se analizaron 9 ángulos

Semana: 9

Equipo: Lámina $\frac{\lambda}{4}$ y $\frac{\lambda}{2}$ Soporte para láminas

Actividad: Medimos en la base diagonal y anti diagonal calculando la matriz de cambio de base, la cual está dada por la lamina de $\frac{\lambda}{2}$ a 22.5° . El primero que interactúa con el fotón debe tener la lámina de operación de manera que en el segundo soporte se montó la lámina de $\frac{\lambda}{2}$. Tomamos datos para ángulos entre $[0^\circ, 180^\circ]$ en intervalos de tres minutos.

Semana: 10

Equipo: Lámina $\frac{\lambda}{4}$ y $\frac{\lambda}{2}$ Soporte para láminas

Actividad: Medimos en la base circular derecha y circular izquierda calculando la matriz de cambio de base, la cual está dada por la lámina de $\frac{\lambda}{4}$ a 0° y $\frac{\lambda}{2}$ a 22.5° . El

primero que interactúa con el fotón debe tener la lámina de operación de manera que en los otros dos soportes por orden de operación ubicamos primero la lámina de $\frac{\lambda}{4}$ y luego $\frac{\lambda}{2}$. Tomamos datos para ángulos entre $[0^\circ, 180^\circ]$ en intervalos de tres minutos.

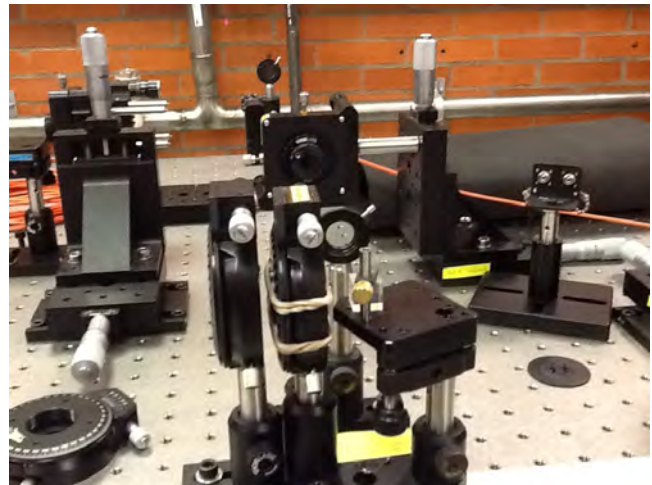


Figura 10. Instalación de la 3^{ra} lámina de onda. Se instaló la lámina de onda de $\frac{\lambda}{4}$ a un ángulo de 0° se sostuvo la lámina por medio de cauchos para evitar la implementación de otro soporte que pudiera bloquear la dirección de los fotones signal.

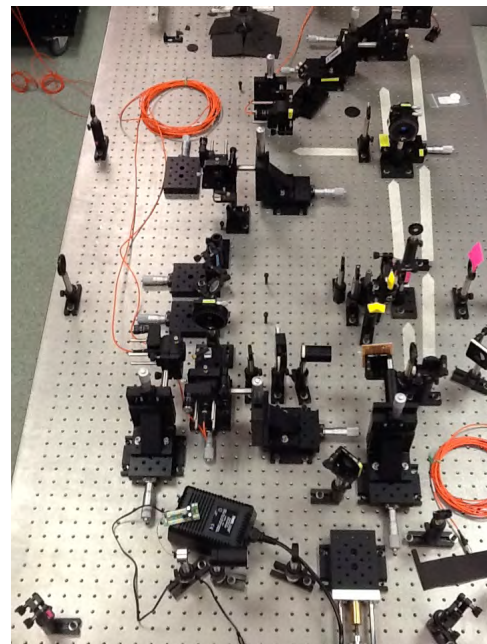


Figura 11. Foto aérea de todo el montaje del experimento.

En la parte superior izquierda se encuentra el láser y en la parte derecha están los 3 detectores, en la parte inferior se ven los espejos que re direccionan a los fotones, en la margen derecha en la mitad de la foto se puede encontrar el cristal no lineal y las láminas de onda. (Comparar con la figura 2.)

Semana: 11

Actividad: Con los datos ya recolectados, calculamos la probabilidad de que el fotón se encuentre en un estado partir de las coincidencias en cada componente de la base donde se mida. Dicha probabilidad en una componente se obtiene al dividir el valor de las coincidencias en esa componente sobre las coincidencias totales en tal base. Por último graficamos dichos resultados, así como los conteos obtenidos por cada uno de los detectores.

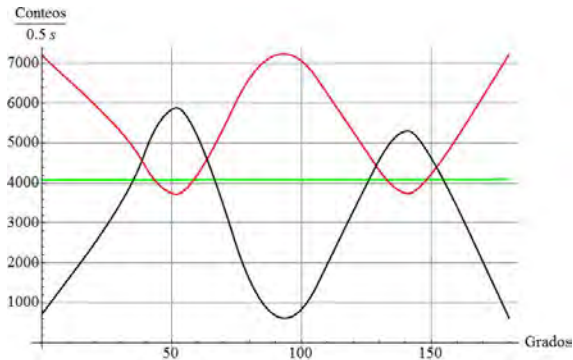
IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El proyecto se dividió en dos operaciones unitarias $\frac{\lambda}{2}$ y $\frac{\lambda}{4}$ usando a diferentes ángulos, y en tres diferentes bases, es decir, se realizaron las operaciones de los qubit en la base horizontal vertical, diagonal y anti diagonal y por ultimo la base circular hacia la derecha y circular hacia la izquierda. Las mediciones se llevaron en un rango de 3 minutos por cada ángulo de la operación de la lámina de onda. Los detectores se configuraron para tomar datos en intervalos de 0.5 segundos.

A. Base $|H\rangle$ y $|V\rangle$

En esta base los conteos y las coincidencias del detector horizontal se muestra de color rojo, mientras que las líneas negras están asociadas con el detector vertical y el detector del fotón señal se muestra de color verde.

Lámina de $\frac{\lambda}{4}$



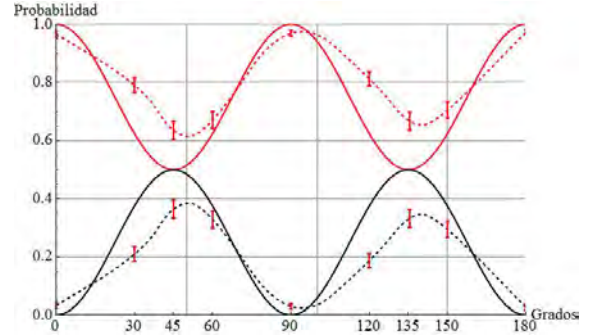
Gráfica 1. Conteos Vs. ángulo de rotación para $\frac{\lambda}{4}$.
Curva de conteos de los 3 diferentes detectores con la operación $\frac{\lambda}{4}$.

Al operar el fotón idler $|H\rangle$ a la lámina de onda $\frac{\lambda}{4}$ (usando la ecuación (13)) en la base $|H\rangle$ y $|V\rangle$ obtenemos un valor esperado para horizontal es:

$$\langle H|\hat{A}|H\rangle = \cos^2 \theta + i \sin^2 \theta \quad (17)$$

En donde \hat{A} es la matriz asociada a $\frac{\lambda}{4}$. El valor esperado vertical es:

$$\langle V|\hat{A}|H\rangle = (1 - i) \cos \theta \sin \theta \quad (18)$$

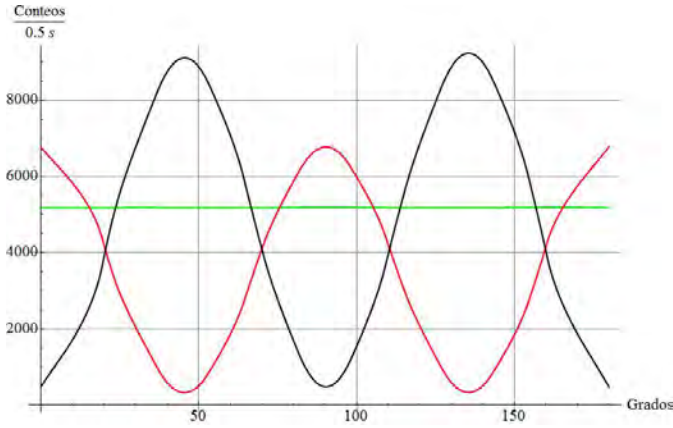


Gráfica 2. Probabilidad de los estados bajo operación con la lámina de $\frac{\lambda}{4}$ en diferentes ángulos.
La operación a la que se somete $|H\rangle$ genera un estado de salida de superposición.

Se puede evidenciar en las curvas teóricas y experimentales la variación de las componentes de polarización. La componente horizontal teóricamente varía en el rango $[\frac{1}{\sqrt{2}}, 1]$ mientras que la componente vertical tiene un rango de $[0, \frac{1}{\sqrt{2}}]$, es decir, que con la variación del ángulo de la lámina de onda hace variar al vector de polarización haciendo que en 45° y en 135° el vector este con una inclinación máxima de 45° . En el proceso experimental los rangos son más cortos pero siguen conservando las siguientes propiedades: para la componente horizontal el valor máximo es obtenido es 1 y para la componente vertical el valor mínimo es 0. Con la rotación de la lámina encontramos un variación del vector de polarización el cual no alcanza a obtener una inclinación máxima de 45° .

Lámina de $\frac{\lambda}{2}$

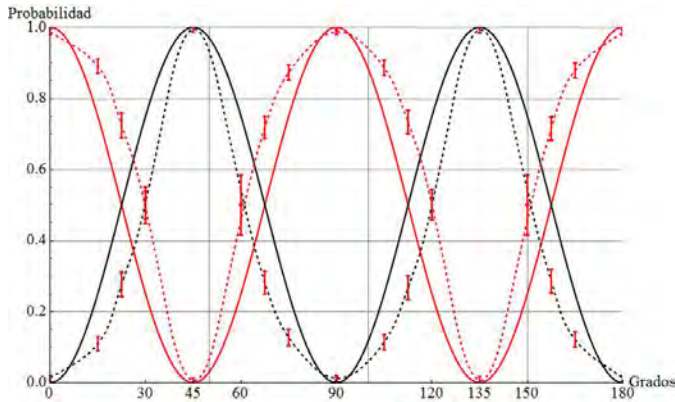
Al operar el fotón idler en las bases horizontal y vertical con la lámina de media onda, cada uno de los conteos detectados es descrito por los valores esperados teóricamente.



Gráfica 3. Conteos Vs. ángulo de rotación para $\frac{\lambda}{2}$.
Curva de conteos de los 3 diferentes detectores con la operación $\frac{\lambda}{2}$.

$$\langle H|\hat{A}|H\rangle = \cos 2\theta \quad (19)$$

$$\langle V|\hat{A}|H\rangle = \sin 2\theta \quad (20)$$



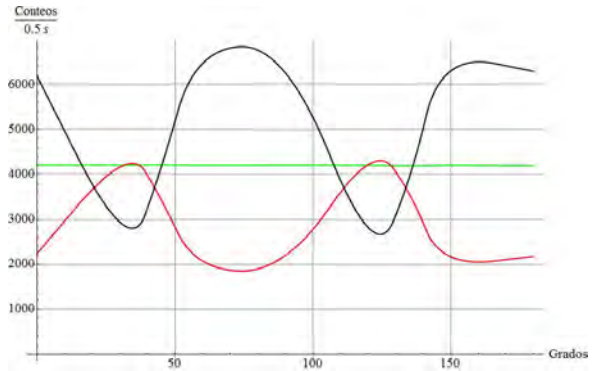
Gráfica 4. Probabilidad de los estados bajo operación con la lámina de $\frac{\lambda}{2}$ en diferentes ángulos.
La operación a la que se somete $|H\rangle$ genera un estado de salida de superposición.

En el gráfico de probabilidad la componente horizontal y vertical se mueven en un intervalo de $[0,1]$ en el momento que la parte horizontal llega a un máximo en el valor 1 los ángulos 0° y 90° de la componente vertical llegan a 0 las coincidencias, lo mismo pasa en sentido contrario en el ángulo de 45° . Los resultados obtenidos experimentalmente se ajustan muy bien para estos puntos, pero no lo hacen para los puntos donde se intersectan. Este hecho se ve reflejado en la gráfica 4 donde el máximo de conteos alcanzado por la componente vertical es mayor al logrado por la horizontal. El cambio en la polarización se va alternando de la misma manera entre componente y componente, a medida que se realiza un barrido del ángulos de 0° a 180° .

B. Base diagonal $|\nearrow\rangle$ y anti diagonal $|\searrow\rangle$

En esta base los conteos y las coincidencias del detector diagonal está de color rojo, mientras que las líneas negras están asociadas con el detector antidiagonal y el detector del fotón signal es de color verde.

Lámina de onda de $\frac{\lambda}{4}$



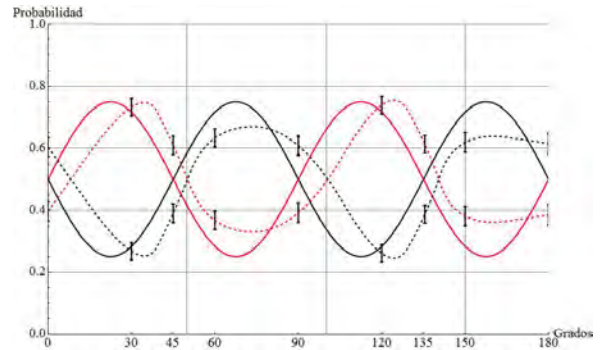
Gráfica 5. Conteos Vs. ángulo de rotación para $\frac{\lambda}{4}$ en base diagonal antidiagonal.

Curva de conteos de los 3 diferentes detectores con la operación $\frac{\lambda}{4}$.

Al realizar la respectiva operación al fotón *idler* encontramos los respectivos valores esperados para un estado diagonal y antidiagonal los cuales son:

$$\langle \hat{A}|\nearrow\rangle = -(1+i)\frac{\cos\theta\sin\theta}{\sqrt{2}} + \frac{\cos^2\theta - i\sin^2\theta}{\sqrt{2}} \quad (21)$$

$$\langle \hat{A}|\searrow\rangle = (1+i)\frac{\cos\theta\sin\theta}{\sqrt{2}} + \frac{\cos^2\theta - i\sin^2\theta}{\sqrt{2}} \quad (22)$$

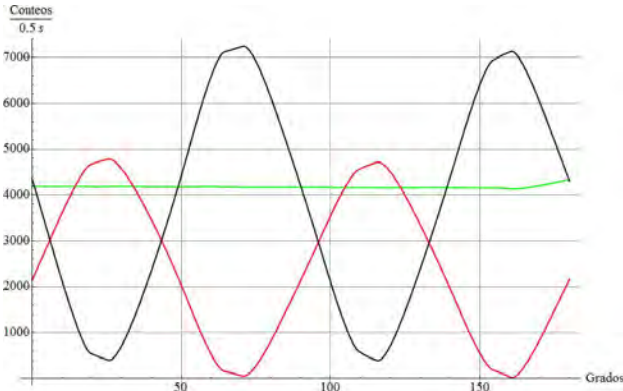


Gráfica 6. Probabilidad de los estados bajo operación con la lámina de $\frac{\lambda}{4}$ en diferentes ángulos en la base diagonal antidiagonal.

Curva de probabilidad de la lámina de onda de $\frac{\lambda}{4}$.

En esta operación se evidencia un comportamiento oscilatorio entre un estado diagonal y un estado anti diagonal. Retornando a la base $|H\rangle$ y $|V\rangle$ encontramos que el punto de equilibrio en el cual se realiza la oscilación es el estado $|H\rangle$ con esto podemos ver que a 0° el vector de polarización se encuentra horizontal y a medida que se barre el ángulo de la lámina de onda de $[0^\circ, 45^\circ]$ se encuentra que el vector de polarización comienza a aumentar en un estado anti diagonal y disminuir su estado diagonal encontrando sus óptimos en 22.5° . En el intervalo de $[45^\circ, 90^\circ]$ se repite el proceso pero siendo el vector diagonal el que empieza creciendo y el anti diagonal decreciendo. Los datos experimentales tienen un comportamiento oscilatorio parecido al teórico. Por otro lado los datos poseen una fase que hace que se desplace el comportamiento alrededor de 5° , como también se evidencia cambios en los máximos locales, es decir, que se evidencia que los valores de la amplitud de la oscilación es mayor cuando el estado está dominado por el valor anti diagonal que cuando el estado está dominado por el valor diagonal de la amplitud.

Lámina de onda $\frac{\lambda}{2}$



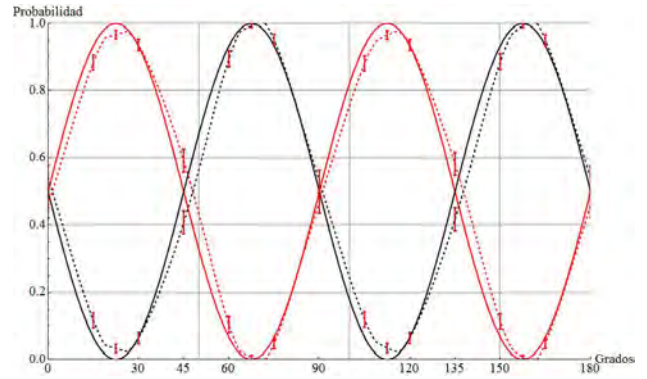
Gráfica 7. Conteos Vs. ángulo de rotación para $\frac{\lambda}{2}$ en base diagonal anti diagonal.

Curva de conteos de los 3 diferentes detectores con la operación $\frac{\lambda}{2}$.

Los respectivos valores esperados correspondientes al operar el fotón con la lámina de media onda en la nueva base están dadas por:

$$\langle \hat{A}_{|\nearrow\rangle} \rangle = \frac{\cos 2\theta + \sin 2\theta}{\sqrt{2}} \quad (23)$$

$$\langle \hat{A}_{|\searrow\rangle} \rangle = \frac{\cos 2\theta - \sin 2\theta}{\sqrt{2}} \quad (24)$$



Gráfica 8. Probabilidad de los estados bajo operación con la lámina de $\frac{\lambda}{2}$ en diferentes ángulos en la base diagonal anti diagonal.

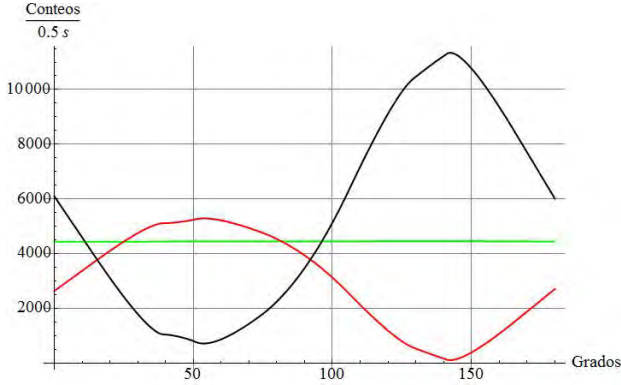
Curva de probabilidad de la lámina de onda de $\frac{\lambda}{2}$.

La componente diagonal y anti diagonal se mueven en un rango de $[0,1]$ teóricamente, los puntos donde la probabilidad de la componente diagonal es máxima, se da en el ángulo de $22,5^\circ$. En este mismo punto la componente anti diagonal tiene una probabilidad mínima cercana a cero, de acuerdo con los resultados experimentales. Lo mismo sucede en el ángulo de $67,5^\circ$ donde la componente anti diagonal alcanza su máximo cercano a 1 y por consiguiente la parte diagonal cae a cero. Los resultados obtenidos experimentalmente se ajustan muy bien para estos puntos, pero no lo hacen para los puntos donde se intersecan las dos componentes, este hecho se ve reflejado en la gráfica (3) donde el máximo de conteos alcanzado por la componente vertical es mayor al logrado por la horizontal. El cambio en la polarización se va alternando de la misma manera entre componente y componente, a medida que se realiza un recorrido por los ángulos de 0° a 180° .

C. Base circular derecha $|\circ\rangle$ y circular izquierda $|\oslash\rangle$

En esta base los conteos y las coincidencias del detector circular hacia la derecha está de color rojo, mientras que las líneas negras están asociadas con el detector circular hacia la izquierda y el detector del fotón señal se muestra de color verde.

Lámina de onda de $\frac{\lambda}{4}$



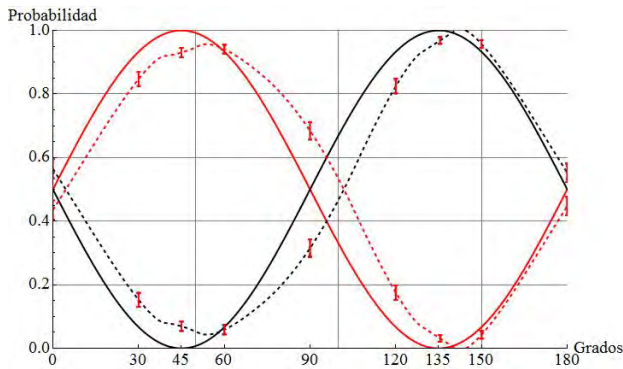
Gráfica 9. Probabilidad de los estados bajo operación con la lámina de $\frac{\lambda}{4}$ en diferentes ángulos en la base circular hacia la derecha y circular hacia la izquierda.

Curva de conteos de los 3 diferentes detectores con la operación $\frac{\lambda}{4}$.

Los valores esperados son los siguientes:

$$\langle \hat{A}_{|\odot\rangle} \rangle = (1-i) \frac{\cos \theta \sin \theta}{\sqrt{2}} + \frac{\cos^2 \theta - i \sin^2 \theta}{\sqrt{2}} \quad (25)$$

$$\langle \hat{A}_{|\ominus\rangle} \rangle = -(1-i) \frac{\cos \theta \sin \theta}{\sqrt{2}} + \frac{\cos^2 \theta - i \sin^2 \theta}{\sqrt{2}} \quad (26)$$



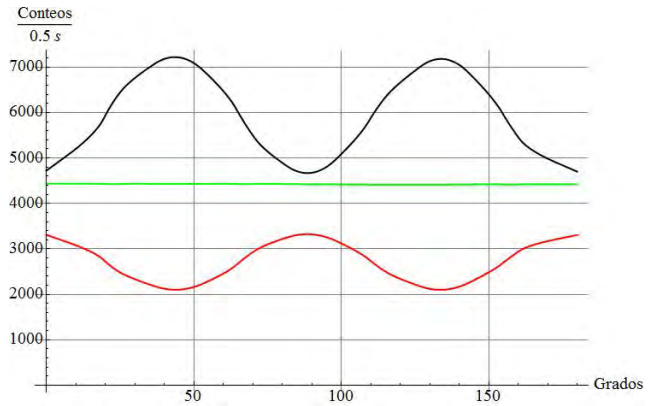
Gráfica 10. Probabilidad de los estados bajo operación con la lámina de $\frac{\lambda}{4}$ en diferentes ángulos en la base circular hacia la derecha y circular hacia la izquierda.

Curva de probabilidad de la lámina de onda de $\frac{\lambda}{4}$.

Para esta operación se encontró un buen comportamiento de los datos experimentales aunque tenga una fase que los obliga a desplazarse de los valores teóricos esperados, sin embargo, para el intervalo de $[135^\circ, 180^\circ]$ la precisión aumenta disminuyendo la fase de los primeros

ángulos. En los puntos de intersección teóricamente son a 0° , 90° y 180° se evidencia un comportamiento circular hacia la derecha como circular hacia la izquierda. En 45° se espera un estado totalmente circular hacia la derecha y en 135° un estado totalmente circular hacia la izquierda, sin embargo, con la fase se evidencia esos valores en 50° y 140° respectivamente.

Lámina de onda de $\frac{\lambda}{2}$



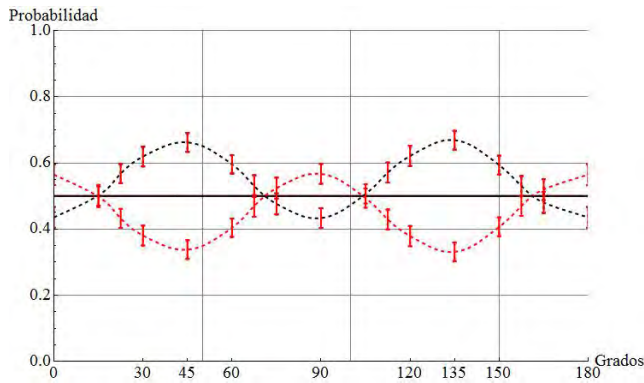
Gráfica 11. Probabilidad de los estados bajo operación con la lámina de $\frac{\lambda}{2}$ en diferentes ángulos en la base circular hacia la derecha y circular hacia la izquierda.

Curva de conteos de los 3 diferentes detectores con la operación $\frac{\lambda}{2}$.

Los valores esperados son los siguientes:

$$\langle \hat{A}_{|\odot\rangle} \rangle = \frac{\cos 2\theta + i \sin 2\theta}{\sqrt{2}} \quad (27)$$

$$\langle \hat{A}_{|\ominus\rangle} \rangle = \frac{\cos 2\theta - i \sin 2\theta}{\sqrt{2}} \quad (28)$$



Gráfica 12. Probabilidad de los estados bajo operación con la lámina de $\frac{\lambda}{2}$ en diferentes ángulos en la base circular hacia la derecha y circular hacia la izquierda.

Curva de probabilidad de la lámina de onda de $\frac{\lambda}{2}$.

A partir de la base teórica, la probabilidad de que el fotón sea circular a la derecha o circular a la izquierda debe ser la misma una relación 50-50, independiente del ángulo en que se use la lámina de onda $\lambda/4$. En el caso experimental se puede apreciar como la componente circular hacia la derecha oscila en un intervalo de [0.4, 0.7] y la circular izq. lo hace entre [0.3, 0.6] pero las dos hacen alrededor del eje de 0,5 conservando la relación donde la suma de las dos probabilidades da 1.

Comparando ángulos representativos, escogidos previamente para realizar las operaciones con la lámina de media onda en las dos primeras bases, podemos verificar cómo los resultados corresponden en buena medida a lo esperado teóricamente. Para el caso de la base circular, la adición de una nueva lámina de onda al experimento ocasionó inconvenientes con los conteos que se obtenían en el detector en comparación a las mediciones realizadas en bases anteriores. Aunque se puede apreciar un patrón de oscilación, la diferencia entre los conteos de una componente y la otra es evidente.

D. Conteos

En todas las gráficas de conteos se evidencia un comportamiento asociado con las coincidencias en cada base, en el momento en que el fotón idler pasa la lámina de onda se encuentra en un estado de superposición que al llegar al PBS es medido obligando a colapsar la ecuación en uno de los dos posibles estados. La línea de fotón signal se mantiene constante ya que no se le realiza ope-

raciones de polarización si no que es el fotón anunciador de llegada del fotón idler.

E. Errores

Se encuentran varias fuentes de errores que contribuyen a la falta de precisión de algunos datos. Comenzando con el factor que menos contribuye el cual consiste en las coincidencias oscuras, las cuales son del orden de 1 a 2 coincidencias cada 5 min. Por otro lado se evidencia que el comportamiento de las gráficas teóricas y experimentales tienen un comportamiento muy similar sin embargo los datos experimentales poseen una fase. Cada fase puede atribuirse a las inclinaciones de las láminas de onda, es decir, durante el montaje cada lámina de onda estuviera levemente inclinada a la orientación necesaria para que los fotones llegaran perpendiculares a ella. Otra fuente de errores es la calibración de los detectores la cual consiste en la alineación del haz de los fotones con la fibra óptica que va dirigida a los detectores.

Se desea resaltar que durante el experimento por conflictos de materiales con otro grupo los datos en la base $|H\rangle$ y $|V\rangle$ no se pudieron optimizar la alineación de los detectores para evitar dañar los otros experimentos.

V. CONCLUSIONES

Los datos obtenidos durante el proceso tienen un comportamiento fiel a lo esperado teóricamente lo que comprueba las operaciones con los qubits en un proceso meramente experimental. Por otro lado se comprobó las propiedades de superposición y normalización de los qubits que son la parte primordial de la información cuántica. También durante el experimento se comprobó la propiedad cuántica de la luz que indica la existencia como fotón, esto se ve reflejado en el momento en que la función de estado colapsa a uno de los posibles estados puros. La existencia de diferentes bases en las que se pueden operar los qubits, como la existencia de una transformación de cambio de base que para este proyecto se ve reflejada en los sistemas de medición en el momento de incluir una nueva lámina de onda para realizar las operaciones en una nueva base.

Por último el factor que juega la alineación y calibración del montaje experimental para un futuro proyecto aplicado, es decir, la importancia de optimizar la calibración, alineación y métodos de medición para evitar fases y pérdida de fotones como también cuentas oscuras.

¹ B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of photonics* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991).

² G. Jaeger, *Entanglement, information, and the interpreta-*

tion of quantum mechanics (Springer, Boston, 2009).

³ M. A. Nielsen, I. L. Chuang, *Quantum computation and quantum information* (Cambridge U. P., Cambridge, 2008).

- ⁴ P. Bronner, A. Strunz, C. Silberhorn and J. Meyn. *Interactive Screen experiments with single photons*. (Eur. J. Phys 30 (2009) 345-353).
- ⁵ E. Galvez. *Qubit quantum mechanics with correlated-photon experiments*. (Departement of Physics and Astronomy, Colgate University)
- ⁶ B. Pearson and P. Jackson. *A hands-on introduction to single photons and quantum mechanics for undergraduates*. (Departement of Physics and Astronomy, Dickinson College)
- ⁷ Y. Shih *Entangled biphoton source-property and preparation*. (Department of Physics, University of Maryland, Baltimore, 2003)
- ⁸ G. Brassard *Quantum information processing for computer scientists* (Department of Physics, University of Montréal, Baltimore, 2006)