



Implementación Experimental de Cierro Algoritmo Cuántico con Fotones



Primer Autor^{1,2}, Segundo Autor², Tercer Autor²

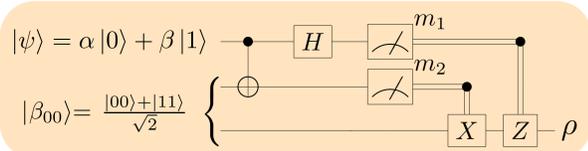
1. Departamento de física J.J. Giambiagi, FCEyN, UBA
2. Otra filiación (Alguna otra institución si es el caso)

Resumen

Se presentan los resultados de una implementación fotónica del algoritmo de teleportación, utilizando un par de fotones entrelazados en polarización como recurso cuántico y codificando el estado a teleportar en la fase de uno de los fotones. Para esto se armó una fuente de fotones entrelazados en polarización de alta calidad, compensando efectos espacio-temporales. La preparación del estado a teleportar se realizó con dos interferómetros de Sagnac concatenados. Controlando la diferencia de fase entre los caminos fue posible generar todos los estados de un qubit. El trabajo no sólo reporta la teleportación cuántica de qubits codificados en el grado de libertad de caminos de un fotón, sino que además muestra el trabajo realizado sobre distintos recursos y técnicas, de gran utilidad en un laboratorio de óptica cuántica. Se desarrollaron un conjunto de herramientas que permiten realizar la caracterización completa de estados de polarización y camino en forma automática. En efecto, el arreglo diseñado permite preparar y teleportar cualquier estado sobre la esfera de Bloch de manera totalmente automática con fidelidades superiores a 87%.

Teleportación cuántica

El algoritmo de teleportación permite transferir un estado cuántico a un lugar distante usando entrelazamiento cuántico y comunicación clásica como recursos físicos.



Estado de entrada:

$$|\psi\rangle |\beta_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [\alpha |0\rangle (|00\rangle + |11\rangle) + \beta |1\rangle (|00\rangle + |11\rangle)]$$

- Los dos qubits de Alice pasan por una compuerta CNOT, obteniendo a la salida el estado

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [\alpha |0\rangle (|00\rangle + |11\rangle) + \beta |1\rangle (|10\rangle + |01\rangle)]$$

- Luego el primer qubit de Alice pasa por una compuerta Hadamard

$$\frac{1}{2} [\alpha (|0\rangle + |1\rangle) (|00\rangle + |11\rangle) + \beta (|0\rangle - |1\rangle) (|10\rangle + |01\rangle)]$$

- Este estado se puede reescribir como la suma de los estados de dos qubits de Alice por los de un qubit de Bob:

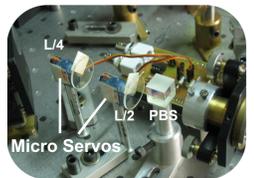
$$\frac{1}{2} [|00\rangle (\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle) + |01\rangle (\alpha |1\rangle + \beta |0\rangle) + |10\rangle (\alpha |0\rangle - \beta |1\rangle) + |11\rangle (\alpha |1\rangle - \beta |0\rangle)]$$

Alice mide su estado de dos qubits, y dependiendo del resultado de su medición, que comunica en forma clásica a Bob, éste eventualmente aplica una rotación y obtiene el estado teleportado.

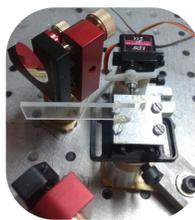
Control experimental

El movimiento de las láminas de onda y las láminas de fase se realiza de manera totalmente automática.

- Las láminas de media onda y cuarto de onda se montaron sobre motores Micro Servo que permiten girarlas con precisión de 1°.
- Las láminas de fase se colocaron sobre goniómetros. El tornillo de los mismos se hace girar por otro motor Micro Servo, de mayor torque que el utilizado para las láminas de onda, que permite una precisión en la fase del interferómetro de aproximadamente 2°.
- Los motores se conectan a una placa Arduino, mediante un shield diseñado para su conexión, y se controlan vía USB con la computadora.

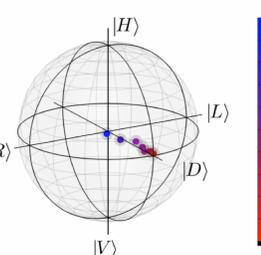
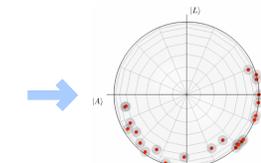
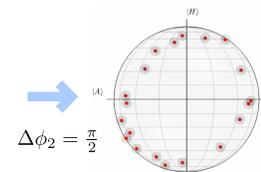
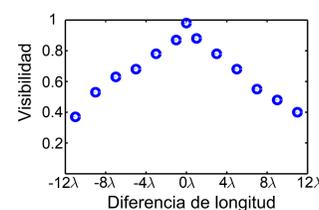
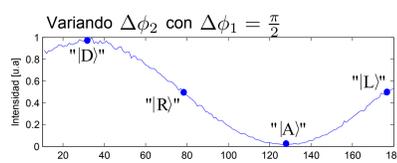
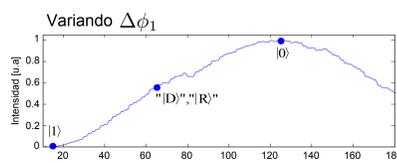


Preparación y teleportación de estados



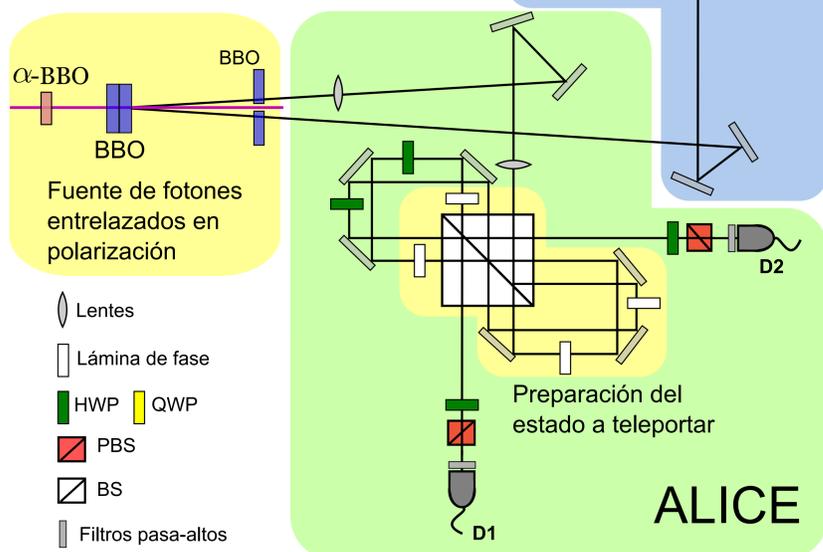
La preparación de un estado arbitrario en el camino de un fotón se obtiene utilizando un interferómetro con una diferencia de fase relativa $\Delta\phi_1$ entre los dos caminos del interior del interferómetro, y una diferencia de fase relativa $\Delta\phi_2$ adicional a la salida. Además, el grado de pureza del estado preparado también puede ser controlado incluyendo una diferencia en la longitud de los dos brazos del interferómetro.

$$\rho = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + V_n \cos(\Delta\phi_1) & i e^{i\Delta\phi_2} V_n \sin(\Delta\phi_1) \\ -i e^{i\Delta\phi_2} V_n \sin(\Delta\phi_1) & 1 - V_n \cos(\Delta\phi_1) \end{pmatrix}$$

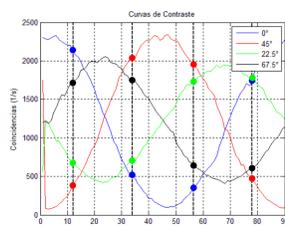
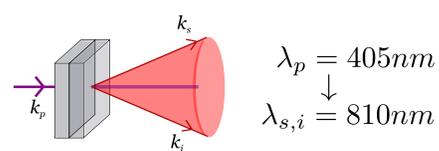


- Variando la fase relativa $\Delta\phi_1$ entre un máximo y un mínimo de intensidad se preparan estados de la base computacional.
- Fijando $\Delta\phi_1 = \frac{\pi}{2}$ y variando la fase relativa $\Delta\phi_2$ se preparan estados diagonales y circulares.
- Variando la visibilidad del primer interferómetro se controla el grado de mezcla de los estados preparados
- Los estados teleportados a Bob se miden como estados de polarización sobre la esfera de Bloch.

Esquema general del experimento

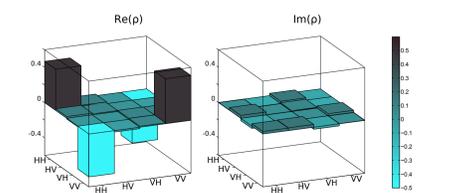
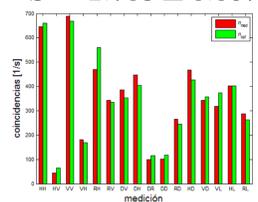


Fuente de Fotones entrelazados



Curvas de contraste medidas fijando una lámina de media onda y rotando la otra entre 0° y 90°. Los 16 puntos marcados son los utilizados para calcular S.

$$S = 2.703 \pm 0.067$$



Reconstrucción tomográfica de la matriz densidad (optimizada) del estado cuántico de 2 qubits emergente del cristal no lineal.

Tomografía del proceso cuántico

Se realizó una tomografía del proceso cuántico en cada una de las 4 posibles salidas, correspondientes a las polarizaciones H y V para los dos caminos, 0 y 1 y se calculó la fidelidad promedio del proceso para cada una.

$$F_{AV} = \frac{2X_{00} + 1}{3}$$

- $|0H\rangle \rightarrow F_{AV} = 0.95$
- $|1H\rangle \rightarrow F_{AV} = 0.87$
- $|0V\rangle \rightarrow F_{AV} = 0.87$
- $|1V\rangle \rightarrow F_{AV} = 0.90$

