



## Nuevos avances en la coherencia y la distinguibilidad de fotones

Investigadores del ICFO han derivado y verificado experimentalmente una nueva relación de complementariedad para la interferencia cuántica en experimentos de coherencia inducida. La relación es válida tanto para tasas de flujo de fotones bajas como altas, extendiendo a esta última la aplicabilidad de los conceptos de coherencia cuántica y distinguibilidad de fotones.

July 29, 2024

---

La mecánica cuántica, un reino de fenómenos sorprendentes y antintuitivos, ha fascinado a los científicos durante décadas. En su centro se encuentra la interferencia cuántica, un concepto ejemplificado por el famoso experimento de la doble rendija, el cual muestra el concepto de dualidad onda-partícula. En este experimento, una partícula cuántica (como un fotón, un electrón o un átomo) pasa a través de dos rendijas e impacta en una pantalla, creando (tras varias repeticiones) un patrón de interferencia de bandas brillantes y oscuras, indicativo de un comportamiento ondulatorio.

Siendo una gran innovación en su momento, ahora sabemos que este fenómeno solo ocurre

cuando no hay forma de saber por que rendija pasa la partícula y que este se puede explicar por la dualidad onda-partícula. Dicha dualidad establece que las entidades cuánticas exhiben propiedades de partícula u onda dependiendo de las circunstancias experimentales.

Desde entonces han surgido y se han demostrado experimentalmente muchas variaciones de estos experimentos. Algunos de ellos van un paso más allá e ilustran el llamado principio de complementariedad, según el cual las entidades cuánticas pueden pasar de exhibir un comportamiento ondulatorio a uno de partícula de forma continua.

En general, el grado de interferencia cuántica se mide por la visibilidad de las franjas de interferencia, pero este parámetro no siempre es una opción adecuada. Es el caso, por ejemplo, de los experimentos basados en el concepto de coherencia inducida cuando la tasa de flujo de los fotones enviados está por encima del régimen de un solo fotón. En estos escenarios, nuevas medidas y relaciones de complementariedad son necesarias.

Ahora, los investigadores del ICFO, el **Dr. Gerard J. Machado** (también miembro del Imperial College de Londres), **Lluc Sendra** y el **Dr. Adam Valles**, dirigidos por el **profesor del ICFO y la UPC, el Dr. Juan P. Torres**, han derivado una **relación de complementariedad válida para cualquier tasa de flujo de fotones** generada en experimentos de coherencia inducida. Para ello, evitaron usar la visibilidad y en su lugar emplearon el concepto de "coherencia de primer orden", un parámetro más conveniente para medir el comportamiento ondulatorio de los fotones. Sus hallazgos teóricos, verificados experimentalmente en el régimen de bajo flujo de fotones, se han publicado en *Physical Review A*.

### **Experimentos de coherencia inducida**

La configuración experimental involucra dos cristales no lineales de segundo orden que son iluminados por ondas mutuamente coherentes para generar un par de fotones, llamados señal y mensajero.

Los fotones siguen un circuito particular para que ocurra la interferencia cuántica al final de la ruta de las señales. El punto clave es que se puede ajustar la probabilidad de que el recorrido del mensajero del primer cristal se junte con el recorrido del mensajero del segundo cristal. Cuando sus trayectorias están completamente alineadas, y por lo tanto son indistinguibles, el origen de los fotones mensajeros es desconocido, y se forman franjas de interferencia en la salida de las señales. De lo contrario, el patrón de interferencia desaparece porque se puede determinar la trayectoria del mensajero y, en consecuencia, su cristal de origen.

### **Relaciones de complementariedad para tasas de flujo de fotones bajas y altas**

Los experimentos previos de coherencia inducida se llevaron a cabo principalmente en el régimen de un solo fotón, donde la visibilidad es un indicador válido de su naturaleza ondulatoria. Sin embargo, faltaba un marco teórico y realizaciones experimentales adecuadas para el régimen de alto flujo de fotones, una escasez que el equipo del ICFO quiso

abordar.

En su estudio, los investigadores reemplazaron la visibilidad por la llamada función de correlación de primer orden para medir la coherencia de onda. "En nuestra configuración, la función de correlación de primer orden es crucial porque nos permite medir la coherencia entre los dos fotones que interfieren. Esta coherencia está directamente relacionada, pero en general no es exactamente igual, a la visibilidad del patrón de interferencia, que a su vez depende de si es posible distinguir el origen de los fotones", explica el Dr. Gerard J. Machado, primer autor del artículo.

Los investigadores también introdujeron una nueva medida de distinguibilidad basada en funciones de correlación de segundo orden. Al vincular la coherencia entre dos fotones que interfieren con el parámetro de distinguibilidad actualizado, **pudieron derivar una relación de complementariedad válida para cualquier tasa de flujo de fotones**. Esto extiende la aplicabilidad de la coherencia cuántica y la distinguibilidad de fotones más allá del régimen de un solo fotón, ofreciendo nuevas perspectivas sobre la naturaleza de estos conceptos fundamentales.

El equipo luego probó su relación derivada teóricamente en un experimento de coherencia inducida en el régimen de bajo flujo de fotones. "Nos enfrentamos a varios obstáculos durante el experimento, como mantener y optimizar la coherencia entre los fotones que interfieren y medir coincidencias entre fotones de distintas longitudes de onda, lo que requirió el uso de diferentes detectores de fotones individuales. Pero, a través de mejoras iterativas en nuestra configuración, obtuvimos los resultados experimentales deseados, que coincidían con el modelo teórico", comparte el Dr. J. Machado.

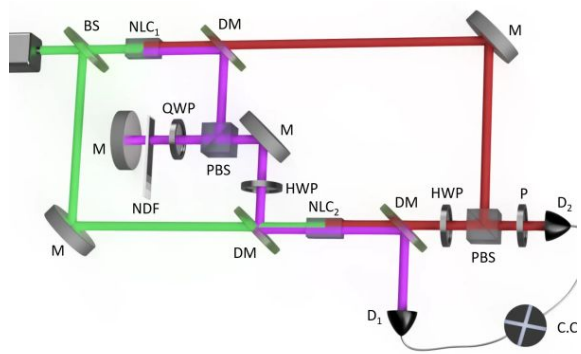
### **Conocimientos fundamentales para aplicaciones cuánticas**

Adaptar el experimento a tasas de flujo de fotones más altas y extenderlo a sistemas cuánticos más complejos y de mayor dimensión debería ser el siguiente paso dentro de la comunidad. Sin embargo, este trabajo ya proporciona conocimientos fundamentales aplicables a diversas tecnologías cuánticas, incluida la comunicación, la computación y la metrología cuánticas.

El profesor Dr. Juan P. Torres destaca la importancia de sus resultados: "**Hemos conectado el comportamiento ondulatorio de la luz (su coherencia) con su comportamiento corpuscular (distinguibilidad de fotones), proporcionando un marco unificado válido para diferentes regímenes de flujo de fotones**, desde un solo fotón hasta una alta ganancia paramétrica".

### **Referencia bibliográfica:**

J. Machado, L. Sendra, A. Valles and J. P. Torres, Complementarity relationship between coherence and path distinguishability in an interferometer based on induced coherence, Phys. Rev. A 110, 012421 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevA.110.012421



Sketch of the experimental setup.