

Nuevos avances en la coherencia y la distinguibilidad de fotones

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

July 29, 2024

La mecanica cuantica, un reino de fenomenos sorprendentes y antintuitivos, ha fascinado a los cientificos durante decadas. En su centro se encuentra la interferencia cuantica, un concepto ejemplificado por el famoso experimento de la doble rendija, el cual muestra el concepto de dualidad onda-particula. En este experimento, una particula cuantica (como un foton, un electron o un atomo) pasa a traves de dos rendijas e impacta en una pantalla, creando (tras varias repeticiones) un patron de interferencia de bandas brillantes y oscuras, indicativo de un comportamiento ondulatorio.

Siendo una gran innovacion en su momento, ahora sabemos que este fenomeno solo ocurre

cuando no hay forma de saber por que rendija pasa la particula y que este se puede explicar por la dualidad onda-particula. Dicha dualidad establece que las entidades cuanticas exhiben propiedades de particula 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 mas alla e ilustran el llamado principio de complementariedad, segun el cual las entidades cuanticas pueden pasar de exhibir un comportamiento ondulatorio a uno de particula de forma continua.
En general, el grado de interferencia cuantica se mide por la visibilidad de las franjas de interferencia, pero este parametro no siempre es una opcion 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 esta por encima del regimen de un solo foton. En estos escenarios, nuevas medidas y relaciones de complementariedad son necesarias.
Ahora, los investigadores del ICFO, el **Dr. Gerard J. Machado** (tambien 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 **relacion de complementariedad valida 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 parametro mas conveniente para medir el comportamiento ondulatorio de los fotones. Sus hallazgos teoricos, verificados experimentalmente en el regimen de bajo flujo de fotones, se han publicado en Physical Review A.

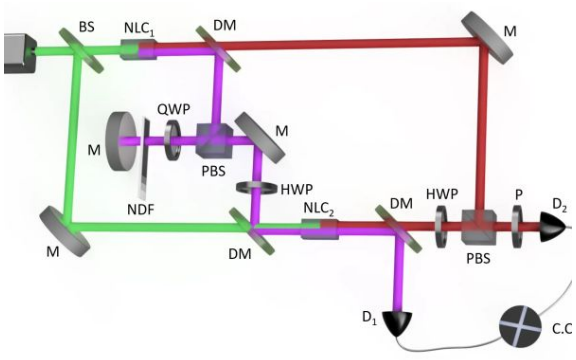
Experimentos de coherencia inducida
La configuracion experimental involucra dos cristales no lineales de segundo orden que son iluminados por ondas mutuamente coherentes para generar un par de fotones, llamados senal y mensajero.
Los fotones siguen un circuito particular para que ocurra la interferencia cuantica al final de la ruta de las senales. 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 estan 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 senales. De lo contrario, el patron 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 regimen de un solo foton, donde la visibilidad es un indicador valido de su naturaleza ondulatoria. Sin embargo, faltaba un marco teorico y realizaciones experimentales adecuadas para el regimen 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 funcion de correlacion de primer orden para medir la coherencia de onda. "En nuestra configuracion, la funcion de correlacion de primer orden es crucial porque nos permite medir la coherencia entre los dos fotones que interfieren. Esta coherencia esta directamente relacionada, pero en general no es exactamente igual, a la visibilidad del patron 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 articulo.
Los investigadores tambien introdujeron una nueva medida de distinguibilidad basada en funciones de correlacion de segundo orden. Al vincular la coherencia entre dos fotones que interfieren con el parametro de distinguibilidad actualizado, **pudieron derivar una relacion de complementariedad valida para cualquier tasa de flujo de fotones**. Esto extiende la aplicabilidad de la coherencia cuantica y la distinguibilidad de fotones mas alla del regimen de un solo foton, ofreciendo nuevas perspectivas sobre la naturaleza de estos conceptos fundamentales.
El equipo luego probo su relacion derivada teoricamente en un experimento de coherencia inducida en el regimen de bajo flujo de fotones. "Nos enfrentamos a varios obstaculos 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 requirio el uso de diferentes detectores de fotones individuales. Pero, a traves de mejoras iterativas en nuestra configuracion, obtuvimos los resultados experimentales deseados, que coincidian con el modelo teorico", comparte el Dr. J. Machado.

Conocimientos fundamentales para aplicaciones cuanticas
Adaptar el experimento a tasas de flujo de fotones mas altas y extenderlo a sistemas cuanticos mas complejos y de mayor dimension deberia ser el siguiente paso dentro de la comunidad. Sin embargo, este trabajo ya proporciona conocimientos fundamentales aplicables a diversas tecnologias cuanticas, incluida la comunicacion, la computacion y la metrologia cuanticas.
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 valido para diferentes regimenes de flujo de fotones**, desde un solo foton hasta una alta ganancia parametrica".

Referencia bibliografica:
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.