

Nous avencos en la coherencia i la distingibilitat de fotons

Investigadors de l'ICFO han derivat i verificat experimentalment una nova relacio de complementarietat per a la interferencia quantica en experiments de coherencia induida. La relacio es valida tant per a taxes de flux de fotons baixes com altes, estenent a la darrera l'aplicabilitat dels conceptes de coherencia quantica i distingibilitat de fotons.

July 29, 2024

La mecanica quantica, un regne de fenomens sorprenents i antintuitius, ha fascinat els cientifics durant decades. Al seu centre hi rau la interferencia quantica, un concepte exemplificat pel famos experiment de la doble escletxa, el qual mostra el concepte de dualitat ona-particula. En aquest experiment, una particula quantica (com un foto, un electro o un atom) passa a traves de dues escletxes i impacta en una pantalla, creant (despres de diverses repeticions) un patro d'interferencia de bandes brillants i fosques, indicatiu d'un comportament ondulatori.

Essent una gran innovacio en el seu moment, ara sabem que aquest fenomen nomes passa

quan no hi ha manera de descobrir per quina escletxa passa la particula i que aquest es pot explicar a traves de la dualitat ona-particula. Aquesta dualitat estableix que les entitats quantiques exhibeixen propietats de particula o ona depenent de les circumstancies experimentals.

Des d'aleshores han sorgit i s'han demostrat experimentalment moltes variacions d'aquests experiments. Alguns van un pas mes enlla i il·lustren l'anomenat principi d complementarietat, segons el qual les entitats quantiques poden passar d'exhibir u comportament ondulatori a un de particula de manera continua

En general, el grau d'interferencia quantica es mesura a partir de la visibilitat de les frange d'interferencia, pero aquest parametre no sempre es una opcio adequada. Es el cas, pe exemple, dels experiments basats en el concepte de coherencia induida quan la taxa de flu dels fotons enviats es troba per sobre del regim d'un sol foto. En aquests escenaris, nove mesures i relacions de complementarietat son necessaries

Ara, els investigadors de l'ICFO, e**Dr. Gerard J. Machado** (tambe membre de l'Imperial College de Londres), el **Lluc Sendra** i el **Dr. Adam Valles**, dirigits pel **professor de l'ICFO i la UPC, el Dr. Juan P. Torres**, han derivat una **relacio de complementarietat valida per a qualsevol taxa de flux de fotons** generada en experiments de coherencia induida. Per aconseguir-ho, van evitar fer servir la visibilitat i en el seu lloc van utilitzar el concepte de "coherencia de primer ordre", un parametre mes convenient a l'hora de mesurar el comportament ondulatori dels fotons. Els seus resultats teorics, verificats experimentalment en el regim de baix flux de fotons, s'han publicat a Physical Review A.

Experiments de coherencia induida

La configuracio experimental involucra dos cristalls no lineals de segon ordre que son il·luminats per ones mutuament coherents per a generar un parell de fotons, anomenat senyal i missatger

Els fotons segueixen un circuit particular per tal que es produeixi la interferencia quantica a final de la ruta dels senyals. El punt clau es que es pot ajustar la probabilitat de que e recorregut del missatger del primer cristall s'ajunti amb el recorregut del missatger del sego cristall. Quan les trajectories estan completament alineades, i per tant son indistingibles l'origen dels fotons missatgers es desconegut, aixi que es formen franges d'interferencia a l sortida dels senyals. En cas contrari, el patro d'interferencia desapareix perque es po determinar la trajectoria del missatger i, en conseqüencia, el cristall d'orige

Relacions de complementarietat per a taxes de flux de fotons baixes i altes

Els experiments previs de coherencia induida es van dur a terme principalment en el regim d'un sol foto, on la visibilitat es un indicador valid de la naturalesa ondulatoria. Tot i aixo, faltava un marc teoric i realitzacions experimentals adequades per al regim d'alt flux de fotons, una escassetat que l'equip de l'ICFO va voler abordar.

Al seu estudi, els investigadors van reemplacar la visibilitat per l'anomenada funcio de correlacio de primer ordre per mesurar la coherencia d'ona. "En la nostra configuracio, la funcio de correlacio de primer ordre es crucial perque ens permet mesurar la coherencia entre els dos fotons que interfereixen. Aquesta coherencia esta directament relacionada, pero en general no es exactament igual, a la visibilitat del patro d'interferencia, que alhora depen de si es possible distingir l'origen dels fotons", explica el Dr. Gerard J. Machado, primer autor de l'article.

Els investigadors tambe van introduir una nova mesura de distingibilitat basada en funcions de correlacio de segon ordre. En vincular la coherencia entre dos fotons que interfereixen amb el parametre de distingibilitat actualitzat, **van poder derivar una relacio de complementarietat valida per a qualsevol taxa de flux de fotons**. Aixo amplia l'aplicabilitat de la coherencia quantica i la distingibilitat de fotons mes enlla del regim d'un sol foto, i ofereix noves perspectives sobre la naturalesa d'aquests conceptes fonamentals.

A continuacio, l'equip va provar la relacio derivada teoricament en un experiment de coherencia induida en el regim de baix flux de fotons. "Ens vam haver d'enfrontar a diversos obstacles durant l'experiment, com ara mantenir i optimitzar la coherencia entre els fotons que interfereixen i mesurar coincidencies entre fotons de diferents longituds d'ona, cosa que va requerir l'us de diversos detectors de fotons individuals. Pero, a traves de millores iteratives en la nostra configuracio, vam obtenir els resultats experimentals desitjats, que coincidien amb el model teorici¿½, comparteix el Dr. J. Machad

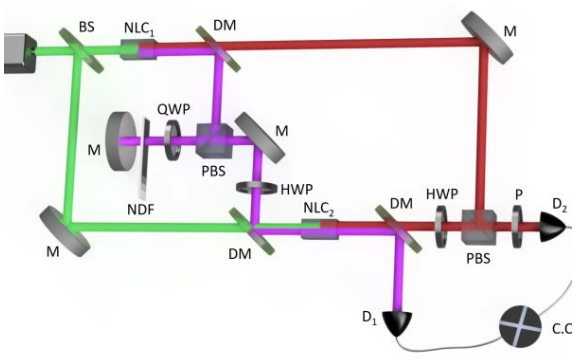
Coneixements fonamentals per a aplicacions quantiques

Adaptar l'experiment a taxes de flux de fotons mes altes i estendre'l a sistemes quantics mes complexos i de major dimensio hauria de ser el pas següent dins la comunitat. Tot i aixo aquest treball ja proporciona coneixements fonamentals aplicables a diverses tecnologie quantiques, incloent-hi la comunicacio, la computacio i la metrologia quantiques

El professor Dr. Juan P. Torres destaca la importancia dels seus resultats: i¿½**Hem connectat el comportament ondulatori de la llum** (la seva coherencia) **amb el seu comportament corpuscular** (distingibilitat de fotons), **proporcionant un marc unificat valid per a diferents regims de flux de fotons**, des d'un sol foto fins a un alt guany parametric".

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.