

Image not found

Nous avencos en la coherencia i la distingibilitat de fotons

Investigadors de l'ICFO han derivat i verificat experimentalment una nova relació de complementarietat per a la interferència quàntica en experiments de coherència induïda. La relació és vàlida tant per a taxes de flux de fotons baixes com altes, estenent a la darrera l'aplicabilitat dels conceptes de coherència quàntica i distingibilitat de fotons.

July 29, 2024

La mecànica quàntica, un regne de fenòmens sorprenents i antintuitius, ha fascinat els científics durant dècades. Al seu centre hi rau la interferència quàntica, un concepte exemplificat pel famós experiment de la doble escletxa, el qual mostra el concepte de dualitat ona-partícula. En aquest experiment, una partícula quàntica (com un foto, un electro o un àtom) passa a través de dues escletxes i impacta en una pantalla, creant (després de diverses repeticions) un patró d'interferència de bandes brillants i fosques, indicatiu d'un comportament ondulatori.

Essent una gran innovació en el seu moment, ara sabem que aquest fenomen només passa quan no hi ha manera de descobrir per quina escletxa passa la partícula i que aquest es pot explicar a través de la dualitat ona-partícula. Aquesta dualitat estableix que les entitats quàntiques exhibeixen propietats de partícula o ona depenent de les circumstàncies experimentals.

Des d'aleshores han sorgit i s'han demostrat experimentalment moltes variacions d'aquests experiments. Alguns van un pas més enllà i il·lustren l'anomenat principi d complementarietat, segons el qual les entitats quàntiques poden passar d'exhibir un comportament ondulatori a un de partícula de manera contínua

En general, el grau d'interferència quàntica es mesura a partir de la visibilitat de les franges d'interferència, però aquest paràmetre no sempre és una opció adequada. És el cas, per exemple, dels experiments basats en el concepte de coherència induïda quan la taxa de flux dels fotons enviats es troba per sobre del règim d'un sol foto. En aquests escenaris, noves mesures i relacions de complementarietat són necessàries

Ara, els investigadors de l'ICFO, el **Dr. Gerard J. Machado** (també 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 **relació de complementarietat vàlida 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 segon 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 aixio, faltava un marc teorici 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 reemplaçar 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 ahora 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**. Aixio 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 teoriquement 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 coincidències entre fotons de diferents longituds d'ona, cosa que va requerir l'ús de diversos detectors de fotons individuals. Però, a través de millores iteratives en la nostra configuració, vam obtenir els resultats experimentals desitjats, que coincidirien amb el model teòric i ¹/₂, comparteix el Dr. J. Machado

Coneixements fonamentals per a aplicacions quàntiques

Adaptar l'experiment a taxes de flux de fotons més altes i estendre'l a sistemes quàntics més complexos i de major dimensió hauria de ser el pas següent dins la comunitat. Tot i això aquest treball ja proporciona coneixements fonamentals aplicables a diverses tecnologies quàntiques, incloent-hi la comunicació, la computació i la metrologia quàntiques

El professor Dr. Juan P. Torres destaca la importància dels seus resultats: **«Hem connectat el comportament ondulatori de la llum (la seva coherència) amb el seu comportament corpuscular (distingibilitat de fotons), proporcionant un marc unificat vàlid per a diferents regims de flux de fotons, des d'un sol foto fins a un alt guany paramètric».**

Referència bibliogràfica:

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

Image not found

Sketch of the experimental setup.