



## 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 continua

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 coherència induïda. Per aconseguir-ho, van evitar fer servir la visibilitat i en el seu lloc van utilitzar el concepte de "coherència de primer ordre", un paràmetre més convenient a l'hora de mesurar el comportament ondulatori dels fotons. Els seus resultats teòrics, verificats experimentalment en el règim de baix flux de fotons, s'han publicat a Physical Review A.

### **Experiments de coherència induïda**

La configuració experimental involucra dos cristalls no lineals de segon ordre que són 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 interferència quàntica a final de la ruta dels senyals. El punt clau és que es pot ajustar la probabilitat de que el recorregut del missatger del primer cristall s'ajunti amb el recorregut del missatger del segon cristall. Quan les trajectòries estan completament alineades, i per tant són indistingibles l'origen dels fotons missatgers és desconegut, així que es formen franges d'interferència a l sortida dels senyals. En cas contrari, el patró d'interferència desapareix perquè es pot determinar la trajectòria del missatger i, en conseqüència, el cristall d'origen

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

Els experiments previs de coherència induïda es van dur a terme principalment en el règim d'un sol foto, on la visibilitat és un indicador vàlid de la naturalesa ondulatoria. Tot i això, faltava un marc teòric i realitzacions experimentals adequades per al règim 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 funció de correlació de primer ordre per mesurar la coherència d'ona. "En la nostra configuració, la funció de correlació de primer ordre és crucial perquè ens permet mesurar la coherència entre els dos fotons que interfereixen. Aquesta coherència està directament relacionada, però en general no és exactament igual, a la visibilitat del patró d'interferència, que alhora depèn de si és possible distingir l'origen dels fotons", explica el Dr. Gerard J. Machado, primer autor de l'article.

Els investigadors també van introduir una nova mesura de distingibilitat basada en funcions de correlació de segon ordre. En vincular la coherència entre dos fotons que interfereixen amb el paràmetre de distingibilitat actualitzat, **van poder derivar una relació de complementaritat vàlida per a qualsevol taxa de flux de fotons**. Això amplia l'aplicabilitat de la coherència quàntica i la distingibilitat de fotons més enllà del règim d'un sol foto, i ofereix noves perspectives sobre la naturalesa d'aquests conceptes fonamentals.

A continuació, l'equip va provar la relació derivada teòricament en un experiment de coherència induïda en el règim de baix flux de fotons. "Ens vam haver d'enfrontar a diversos obstacles durant l'experiment, com ara mantenir i optimitzar la coherència 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 coincidien amb el model teòric", comparteix el Dr. J. Machad

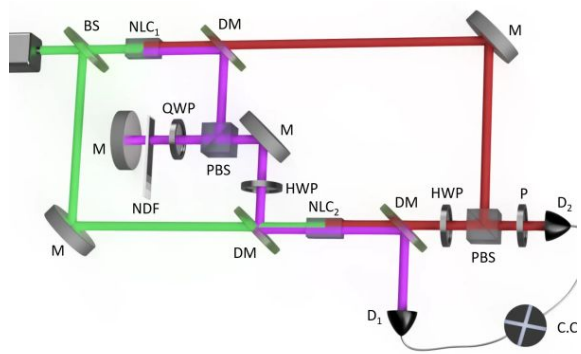
### **Coneixements fonamentals per a aplicacions quàntiques**

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 règims 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



Sketch of the experimental setup.