

Image not found

Les xarxes quantiques de tres nodes son excepcionalment resistents a la perda de fotons

En la major part de futures tecnologies quantiques, com la deteccio o la computacio quantica distribuïdes, cal connectar mes de dues estacions entre si, formant una xarxa. Per això, es fonamental desenvolupar metodes capacos de certificar la presencia de correlacions quantiques sense anàleg classic en condicions experimentals realistes que vagin mes enlla de l'escenari de dues parts.

En un article recentment publicat a *Physical Review Letters*, investigadors de l'ICFO han demostrat que els estats fotonics d'alta dimensio ofereixen una robustesa excepcional enfront de la perda de fotons en la xarxa triangular a l'hora de certificar correlacions purament quantiques. A mes, han tancat teoricament l'anomenada llacuna de deteccio, obrint el camí a futurs estudis tant en ciencia fonamental com en tecnologies quantiques emergents.

November 13, 2025

Una de les caracteristiques mes sorprenents de la teoria quantica es l'entrellacament. Aquest dona lloc a correlacions mes fortes que aquelles assolibles amb recursos classics i, en aquest sentit, a una teoria fisica no local. Els tests de Bell s'han utilitzat durant decades quan nomes dues parts hi estan involucrades per revelar correlacions quantiques entre elles. Tanmateix, aquestes proves depenen de les mesures que les parts decideixin realitzar, de manera que aquestes s'han de seleccionar aleatoriament. Per contra, en els tests de Bell que involucren mes de dos nodes connectats en una xarxa, les eleccions de les mesures (i, per tant, la noció d'aleatorietat) no son necessaries. Això es especialment convenient, ja que la major part de les tecnologies quantiques futures requeriran la connexio de diverses estacions.

Igual que ocorria amb els tests de Bell estandard en els seus inicis, els experiments actuals enfocats a demostrar la no-localitat en xarxes presenten certes llacunes o loopholes, debilitats en el disseny experimental que poden permetre una explicacio classica de les correlacions observades. Una d'aquestes es la **llacuna de deteccio**: de vegades, massa fotons entrellacats no arriben als detectors o passen sense ser detectats, fet que obliga els científics

a descartar aquelles rondes (o a aplicar un postprocessat similar). No obstant això, si es descarten rondes sense prou cura, s'obre la possibilitat que les dades restants puguin explicar-se a través d'un model clàssic.

Ara, el **Dr. Tamas Krivachy** i en **Martin Kerschbaumer** de l'ICFO han demostrat la **no-localitat quàntica en una xarxa triangular sota condicions realistes de soroll**, oferint així una manera de **tancar la llacuna de detecció**. Utilitzant estats fònics d'alta dimensió, aquest estudi publicat a Physical Review Letters mostra que les xarxes triangulars no són tan fràgils com es pensava. De fet, són excepcionalment robustes davant la pèrdua de fotons, fins i tot quan s'empren fonts imperfectes de parells entrellacats.

Una xarxa triangular consisteix en tres fonts independents que envien estats entrellacats a tres estacions, formant un bucle tancat. D'aquesta manera, cada estació rep dues $\frac{1}{2}$ meitats $\frac{1}{2}$ de dos estats entrellacats provinents de fonts diferents. Totes les estacions realitzen aleshores una mesura local, enregistren els resultats i analitzen si les correlacions observades són genuïnament quàntiques.

Els investigadors de l'ICFO han demostrat que certs estats fònics entrellacats d'alta dimensió, coneguts com a estats NOON, poden tolerar pèrdues sorprenentment altes. Els estats NOON consisteixen en una superposició quàntica de N fotons que van cap a un estat i 0 cap a l'altre, i 0 fotons que van cap a un costat i N cap a l'altre $\frac{1}{2}$, explica el Dr. Tamas Krivachy, primer autor de l'article. $\frac{1}{2}$ Vam veure que la no-localitat persisteix fins i tot quan hi ha més d'un 50% de probabilitat de pèrdua de fotons, molt per sobre del requisit experimental del 20% $\frac{1}{2}$, afegeix. És important destacar que això es compleix fins i tot quan el nombre de fotons implicats en l'estat NOON és només de dos, cosa que ja es pot realitzar experimentalment

avui dia. Segons Krivachy, $\frac{1}{2}$ el següent pas clau seria dur a terme un experiment de Bell lliure de llacunes en la xarxa triangular $\frac{1}{2}$. A més dels coneixements fonamentals que proves de no-localitat en xarxes més rigoroses i fiables podrien aportar, aquest avanç obriria un nou camí per al desenvolupament de futures tecnologies de comunicació i computació quàntica, on la distribució robusta de l'entrellacament en xarxa

Referència:

Tamas Krivachy, Martin Kerschbaumer, Closing the Detection Loophole in the Triangle Network with High-Dimensional Photonic States, Phys. Rev. Lett. 135, 160803 (2025).

DOI: <https://doi.org/10.1103/nwzw-tqzp>

Agradecimientos:

We acknowledge financial support from the Government of Spain (Severo Ochoa CEX2019-000910-S and FUNQIP), Fundació Cellex, Fundació Mir-Puig, Generalitat de Catalunya (CERCA program). T.K. additionally acknowledges funding from the Swiss National

Science Foundation (project 214458) and from the Austrian Federal Ministry of Education via the Austrian Research Promotion Agency-FFG (flagship project FO999897481, funded by EU program NextGenerationEU). M.K. additionally acknowledges funding from the Erasmus+ Programme of the European Union through an Erasmus+ traineeship grant, as well as from the Gesellschaft für Forschungsförderung Niederösterreich m.b.H.