

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

En la major part de futures tecnologies quantiques, com la deteccio o la computacio quantica distribuides, cal connectar mes de dues estacions entre si, formant una xarxa. Per aixo, es fonamental desenvolupar metodes capacos de certificar la presencia de correlacions quantiques sense analeg 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 perdua 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 cami 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 nocio d'aleatorietat) no son necessaries. Aixo 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 cientifics a descartar aquelles rondes (o a aplicar un postprocessat similar). No obstant aixo, si es descarten rondes sense prou cura, s'obre la possibilitat que les dades restants puguin explicar-se a traves d'un model classic.

Ara, el **Dr. Tamas Krivachy** i en **Martin Kerschbaumer** de l'ICFO han demostrat la **no-localitat quantica en una xarxa triangular sota condicions realistes de soroll**, oferint aixi una manera de **tancar la llacuna de deteccio**. Utilitzant estats fotonics d'alta dimensio, aquest estudi publicat a Physical Review Letters mostra que les xarxes triangulars no son tan fragils com es pensava. De fet, son excepcionalment robustes davant la perdua 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 estacio rep dues i¿½meitatsi¿½ de dos estats entrellacats provinents de fonts diferents. Totes les estac
ons realitzen aleshores una mesura local, enregistren els resultats i analitzen si les correlac
ons observades son genuinament quantiq
es. Els investigadors de l'ICFO han demostrat que certs estats fotonics entrellacats d'
lta dimensio, coneguts com a estats NOON, poden tolerar perdues sorprenentment altes. i?
½Els estats NOON consisteixen en una superposicio quantica de N fotons que van cap a un
ostat i 0 cap a l'altre, i 0 fotons que van cap a un costat i N cap a l'altrei¿½, explica el D
. Tamas Krivachy, primer autor de l'article. i¿½Vam veure que la no-localitat persisteix fins i t
t quan hi ha mes d'un 50% de probabilitat de perdua de fotons, molt per sobre de
 requisit experimental del 20%i¿½, afegeix. Es important destacar que aixo es compleix fin
 i tot quan el nombre de fotons implicats en l'estat NOON es nomes de dos, cosa que ja es p

t realitzar experimentalme
t avui dia. Segons Krivachy, i¿½el següent pas clau seria dur a terme un experiment de Bell lliure de llacunes en la xarxa triangulari¿½. A mes dels coneixements fonament ls que proves de no-localitat en xarxes mes rigoroses i fiables podrien aportar, aquest ave c obriria un nou cami per al desenvolupament de futures tecnologies de comunicacio i com utacio quantica, on la distribucio robusta de l'entrellacament en xar

Referencia:
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), Fundacio Cellex, Fundacio 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 Forschungsforderung Niederosterreich m.b.H.