



Las redes cuánticas de tres nodos son excepcionalmente resistentes a la pérdida de fotones

En la mayor parte de las futuras tecnologías cuánticas, como la detección o computación cuántica distribuidas, hay que conectar más de dos estaciones entre sí, formando una red. Por ello, es fundamental desarrollar métodos capaces de certificar la presencia de correlaciones cuánticas sin análogo clásico en condiciones experimentales realistas que vayan más allá del escenario de dos partes.

En un artículo reciente publicado en *Physical Review Letters*, investigadores del ICFO demostraron que los estados fotónicos de alta dimensión ofrecen una robustez excepcional frente a la pérdida de fotones en la red triangular a la hora de certificar correlaciones puramente cuánticas. Además, cerraron teóricamente la llamada laguna de detección, abriendo el camino a futuros estudios tanto en ciencia fundamental como en tecnologías cuánticas emergentes.

November 13, 2025

Una de las características más sorprendentes de la teoría cuántica es el entrelazamiento. Este da lugar a correlaciones más fuertes que aquellas alcanzables mediante recursos clásicos y, en este sentido, a una teoría física no local. Los tests de Bell se han utilizado durante décadas cuando solamente dos partes están involucradas para revelar correlaciones cuánticas entre ellas. Sin embargo, estas pruebas dependen de las medidas que las partes elijan realizar, por lo que estas deben seleccionarse aleatoriamente. Por el contrario, en los tests de Bell que involucran más de dos nodos conectados en una red, las elecciones de las medidas (y, por tanto, la noción de aleatoriedad) no son necesarias. Esto es realmente conveniente, ya que la mayor parte de tecnologías cuánticas futuras requerirán la conexión de varias estaciones. Al igual que en los inicios de los tests de Bell estándar, los experimentos actuales enfocados a demostrar la no localidad en redes presentan ciertas lagunas o loopholes, debilidades en el diseño experimental que pueden permitir una explicación clásica de las correlaciones observadas. Una de ellas es la **laguna de detección**: en ocasiones, demasiados fotones entrelazados no llegan a los detectores o pasan sin ser detectados, lo que obliga a los científicos a descartar esas rondas (o a aplicar un post-procesado similar). Sin embargo, si se descartan rondas sin el debido cuidado, se abre la posibilidad de que los datos restantes puedan explicarse mediante un modelo clásico.

El **Dr. Tamas Krivachy** y **Martin Kerschbaumer** del ICFO han demostrado ahora la **no localidad cuántica en una red triangular bajo condiciones realistas de ruido**, ofreciendo así una forma de **cerrar la laguna de detección**. Utilizando estados fotónicos de alta dimensión, este estudio publicado en *Physical Review Letters* muestra que las redes triangulares no son tan frágiles como se pensaba. De hecho, son excepcionalmente robustas frente a la pérdida de fotones, incluso cuando se emplean fuentes imperfectas de pares entrelazados.

Una red triangular consiste en tres fuentes independientes que envían estados entrelazados a tres estaciones, formando un bucle cerrado. De este modo, cada estación recibe dos $\frac{1}{2}$ partes de dos estados entrelazados provenientes de diferentes fuentes. Todas las estaciones realizan entonces una medida local, registran los resultados y analizan si las correlaciones observadas son genuinamente cuánticas.

Los investigadores del ICFO han demostrado que ciertos estados fotónicos entrelazados de alta dimensión, conocidos como estados NOON, pueden tolerar pérdidas sorprendentemente altas. Los estados NOON consisten en una superposición cuántica de N fotones que van hacia un lado y 0 hacia el otro, y 0 fotones que van hacia un lado y N hacia el otro, explica el Dr. Tamas Krivachy, primer autor del artículo. Vimos que la no localidad persiste incluso cuando existe más de un 50% de probabilidad de pérdida de fotones, muy por encima del requisito experimental del 20%. Es importante destacar que esto se cumple incluso cuando el número de fotones implicados

n el estado NOON es solo dos, algo que ya puede realizarse experimentalmente hoy en día. Según Krivachy, *¿el siguiente paso clave sería realizar un experimento de Bell libre de lagunas en la red triangular?* Además de los conocimientos fundamentales que pruebas de no localidad en redes más rigurosas y fiables podrían aportar, este avance abriría un nuevo camino para el desarrollo de futuras tecnologías de comunicación y computación cuántica, donde la distribución robusta del entrelazamiento en redes r

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 Forschungsförderung Niederösterreich m.b.H.