



Es transmet entrellacament entre llum i matèria a la xarxa metropolitana de Barcelona

Investigadors de l'ICFO demostren la transmissió de l'entrellacament entre matèria i llum al llarg de desenes de quilòmetres a través de la fibra òptica a Barcelona.

April 02, 2024

A mesura que s'intensifiquen els esforços per a l'assoliment d'ordinadors quàntics molt potents, existeix un programa paral·lel expandint-se ràpidament que té com a objectiu aconseguir l'anàleg quàntic de l'internet clàssic. Aquesta nova xarxa quàntica proporcionarà un nivell de ciberseguretat ultra-segur, garantit per les lleis de la física quàntica, i es centrarà en intercanviar qubits, els elements unitaris de la informació quàntica i aquells que formen el llenguatge dels ordinadors quàntics. Com a part de la seva funció, aquesta xarxa proporcionarà l'espai a través del qual es podran connectar diferents ordinadors quàntics, tal com es connecten els processadors clàssics en computació en el núvol. Com a opció natural per a la futura infraestructura de l'internet quàntic, la xarxa d

telecomunicacions existent proporciona un canal gairebé omnipresent a través del qual la llum pot viatjar distàncies molt llargues amb una absorció limitada. Degut a la seva baixa absorció i alta velocitat, la llum és una gran candidata com a portadora d'informació, ja sigui clàssica o quàntica. La llum laser s'utilitza fàcilment per transferir informació clàssica Internet, ja que l'atenuació de la llum en les fibres òptiques es compensa amb amplificadors de llum col·locats cada desenes de quilòmetres dins d'aquestes fibres. No obstant això, la transferència d'informació quàntica, és a dir, la comunicació quàntica, requereix mitjans molt més sofisticats.

Els bits quàntics, els elements principals de la comunicació quàntica, estan codificats en la llum, concretament en fotons individuals. Però aquesta codificació quàntica no es pot amplificar perquè les regles de la mecànica quàntica no ho permeten: si s'intenta amplificar el senyal codificat quànticament, la informació d'aquest senyal que porten els fotons es veu greument danyada. Per tant, els amplificadors utilitzats en les xarxes clàssiques no es poden utilitzar per a bits quàntics. Això significa que es necessita una tecnologia radicalment nova per construir una versió quàntica de l'Internet: **repetidor quàntic**.

Així com els amplificadors de llum garanteixen la connectivitat entre ubicacions llunyanes, els repetidors quàntics permetran la comunicació a llarga distància distribuint l'**entrellacament** entre ells. L'entrellacament és una propietat exclusivament quàntica de dos objectes que mostren correlacions entre ells, les quals no es poden reproduir per mitjans clàssics, i és un dels components principals de la comunicació quàntica. Aquest es pot utilitzar per transferir informació quàntica, per exemple mitjançant teletransportació quàntica entre dos nodes d'un sistema de repetidor quàntic.

Una forma d'establir l'**entrellacament remot entre dos nodes** és mitjançant la **transmissió directa**: es pot generar un parell de fotons entrellacats, un dels quals roman aturat al seu lloc mentre l'altre viatja a l'altra ubicació. El segon fotó que viatja ha de ser compatible amb la transmissió per fibra òptica, mentre que el primer ha d'emmagatzemar-se en una memòria quàntica, procés que es coneix com a entrellacament entre llum i matèria.

Ara bé, per **acoblar diversos nodes** i aconseguir un **entrellacament a llarga distància** entre memòries quàntiques, es necessita un **conjunt de repetidors quàntics**. Una arquitectura prometedora per a aquests nodes repetidors quàntics es basa en buscar acoblar la generació espontània d'uns parells de fotons - un procés conegut com a conversió descendent paramètrica espontània (SPDC)- amb una memòria quàntica externa.

Aquest és l'enfocament que han adoptat els investigadors de l'ICFO. En l'estudi publicat a *Optica Quantum*, **Jelena Rakonjac**, **Samuele Grandi**, **Soren Wengerowsky**, **Dario Lago-Rivera** i **Felicien Appas**, dirigits pel professor ICREA de l'ICFO **Hugues de Riedmatten**, demostren la **transmissió d'entrellacament entre matèria i llum al llarg de desenes de quilòmetres a través de fibra òptica**.

En el seu experiment, van aconseguir generar parells de fotons, un dels quals s'emet a la longitud d'ona de telecomunicacions de 1436 nm, mentre que l'altre s'emet a 606 nm,

compatible amb les memòries quàntiques d'estat sòlid, construïdes amb cristalls especials dopats amb àtoms de terres rares.

L'obra va utilitzar la xarxa metropolitana de fibra òptica de Barcelona, connectant el seu sistema a dues fibres que anaven des de l'ICFO, a Castelldefels, fins al Centre de Telecomunicacions de Catalunya (CTTI), a l'Hospitalet de Llobregat. En connectar tots dos centres (anada i tornada), van crear un anell de 50 km, enviant els fotons fins al centre de Barcelona i de nou a l'ICFO. Amb això, van demostrar que, després d'un **viatge complet de 50 km**, la llum generada al laboratori mantenia les seves característiques quàntiques, demostrant que els qubits fònics mantenen el que se'n diu "coherència" en recórrer desenes de quilòmetres en una fibra òptica, fins i tot en àrea metropolitana.

No obstant això, la comunicació quàntica requereix utilitzar i verificar l'entrellacament entre ubicacions remotes, on els fotons entrellacats es detecten en ubicacions ben separades en l'espai i el temps. Tenint això en compte, els investigadors van ampliar la seva xarxa amb un nou node, aquesta vegada ubicat en la [fundació i2CAT](#), un edifici de Barcelona, a uns 44 quilòmetres de l'ICFO a través de la xarxa local de fibra òptica i 17 quilòmetres en línia recta. A l'i2CAT van instal·lar un detector de telecomunicacions per mesurar l'arribada de fotons d'1436 nm que arribaven a través d'una de les fibres, mentre que l'altra fibra estava connectada a un transductor. Quan es detectava que un foto havia arribat, la senyal elèctrica generada pel detector es convertia novament en llum gràcies al transductor i s'enviava a través de la línia de la segona fibra òptica. D'aquesta manera, la informació va poder tornar a l'ICFO amb gran precisió, tot i que el foto de 1436 nm es va detectar a uns 17 quilòmetres de distància.

L'experiment va validar el sistema utilitzat per generar entrellacament entre matèria i llum i ha demostrat ser un dels candidats pioners per al desenvolupament d'un node-repetidor quàntic, la tecnologia que permet la comunicació quàntica a llarga distància. Ja s'han realitzat demostracions de prova de principi al laboratori i el grup ara està treballant per millorar el rendiment tant de la memòria com de la font generadora de parells de fotons. D'altra banda, els investigadors de l'ICFO estan col·laborant de manera activa amb [Cellnex \(Xarxa oberta de Catalunya\)](#) en la posada en marxa d'un nou laboratori a la torre de Collserola, en el context dels projectes [QNetworks](#) i [EuroQCI Espanya](#), per dur a terme la realització d'un estat entrellacat entre memòries quàntiques remotes. La creació d'una xarxa troncal de llarga distància per a la distribució de l'entrellacament entre memòries quàntiques és també un dels principals objectius de la [Quantum Internet Alliance](#) (QIA), el projecte europeu líder en la realització de l'internet quàntic, projecte del que l'ICFO n'és un soci principal.

Els resultats d'aquest estudi, principalment "**la transmissió de l'entrellacament entre matèria i llum a través de fibres òptiques ja desplegades en una àrea metropolitana, són el pas inicial cap a la realització d'un internet quàntic complet, amb la nostra font de fotons i el nostre node, incloent-hi la memòria quàntica, com a peces essencials en aquesta xarxa**", tal com

comenta Samuele Grandi, investigador de l'ICFO i coautor principal de l'estudi.

Com conclou el professor ICREA de l'ICFO Hugues de Riedmatten: "**L'entrellacament de materia-llum es un recurs clau per a la comunicacio quantica i s'ha demostrat moltes vegades al laboratori. Demostrar-ho en la xarxa de fibra instal·lada es un gran primer pas pe aconseguir dur a terme proves de la tecnologia de repetidors quantics en l'area d Barcelona, preparant el terreny per a xarxes de llarga distancia basades en fibra optica**".

Aquest projecte ha estat finançat parcialment per la Generalitat de Catalunya, en particular per l'Acord de Govern marc i½Quantica - Vall de la Mediterrania de les Ciències i les Tecnologies Quantiques i½ GOV/51/2022, impulsat per la Secretaria de Politiques Digital , i la Els programes QInfinity, Qollserola, Qsunset i QuantumCAT, aixi com el projecte europeu Quantum Internet Alliance, i els programes nacionals Q-networks, EuroQCI-Espanya i Pla Complementari a les Comunicacions Quantiques.

Referencia: Transmission of Light-Matter Entanglement over a Metropolitan Network, Jelena V. Rakonjac, Samuele Grandi, Soren Wengerowsky, Dario Lago-Rivera, Felicien Appas, and Hugues de Riedmatten, *Optica Quantum* **1**, 94-102 (2023).

Agraïments i Financiacio: FUNDACIO Privada MIR-PUIG; Fundacion Cellex; Generalitat de Catalunya (AGAUR, CERCA); Agencia Estatal de Investigacion (BES-2017- 082464 CEX2019-000910-S, PID2019-106850RB- I00); Ministerio de Ciencia e Innovacion (IJC2020-044956-I, PLEC2021-007669, PRTR-C17.11); European Regional Development Fund (Quantum CAT); Horizon 2020 Framework Programme (713729, 754510, 820445); EU Horizon Europe Research and Innovation programme (EuroQCI in Spain) (Project no.101091638). El projecte es realitza dins del marc de l'Acord de Govern i½Quantica - Vall de la Mediterrania de les Ciències i les Tecnologies Quantiques i½ GOV/51/2022, impulsat per la Secretaria de Politiques Digitals de la Generalitat de Catalunya.