



## Entrellacament de memories quantiques per a repetidors quantics: mes a prop de l'Internet Quantic

Investigadors de l'ICFO aconseguixen per primera vegada, en un estudi publicat a la revista Nature, l'entrellacament de dues memories quantiques multimode, col·locades a dos laboratoris diferents separades per 10 metres, i assenyalat per un foto a l'longitud d'ona de les telecomunicacions.

Els científics han implementat una tècnica que els permet arribar a una taxa d'entrellacament record. El sistema podria integrar-se a la xarxa de comunicació tradicional per fibra òptica, aplanant així el camí per operar a llargues distàncies.

## **Els resultats es consideren una fita per a les comunicacions quantiques i un gran pas endavant cap al desenvolupament de repetidors quantics, imprescindibles per al futur Internet quantic.**

June 02, 2021

---

Durant la dècada dels noranta es van aconseguir avenços importants en el camp de les telecomunicacions. Estenent la xarxa a distàncies més enllà de les ciutats i àrees metropolitanes, es va marcar un abans i un després en la comunicació global. Per a poder escalar el sistema es van fer servir repetidors, que milloraven els senyals atenuats i permetien que viatgessin a distàncies més llargues, amb les mateixes característiques d'intensitat i fidelitat. Amb la integració de satèl·lits al sistema s'ha aconseguit normalitzar el fet d'estar perdut a les muntanyes d'Europa i poder parlar amb amics vivint a l'altra punta del món.

En el camí cap a construir el futur Internet quantic, les memòries quantiques exerceixen aquest mateix paper. Juntament amb les fonts generadores de qubits, són els components bàsics dels sistemes de comunicació quàntica. Actuen com a repetidors d'operacions de dades, utilitzant la superposició i l'entrellacament com a ingredients claus. Però, per tal de poder operar un sistema com l'Internet quantic, primer cal entrellacar aquestes memòries llarga distància i mantenir aquest entrellacament de la manera més eficient possible.

### **Tot en un**

La revista Nature publica un estudi en el qual els científics de l'ICFO Dario Lago, Samuele Grandi, Alessandro Seri i Jelena Rakonjac, dirigits pel professor ICREA a l'ICFO Hugues de Riedmatten, han aconseguit per primera vegada un entrellacament matèria-matèria entre dues memòries quantiques. Aquest entrellacament s'ha aconseguit entre memòries d'estat sòlid, amb propietats multimodals, remotes - col·locades a certa distància -, i operant en la longitud d'ona de les telecomunicacions, sent per tant una tecnologia potencialment escalable. Dit de manera més simple; han aconseguit emmagatzemar, durant un màxim de 2 microsegons, un únic fotó entre dues memòries quantiques separades entre si per 10 m de distància.?

L'equip sabia que el fotó estava en una de les dues memòries, però no sabien en quina. Això emfatitza la noció clàssica i anti intuïtiva que tenim de la natura; el fotó estava en un estat de superposició quàntica en les dues memòries alhora, que sorprenentment, es troba en separades per 10 metres de distància. En detectar-se un fotó a la longitud d'ona de les telecomunicacions, els investigadors veien un clic a un monitor, indicant que s'havia c

entrellacament. L'emmagatzematge a les memòries quàntiques es va produir de manera multiplex, una tècnica que permet enviar diversos missatges simultàniament per un sol canal de comunicació. Aquestes dues característiques - aconseguir entrellacament en la longitud d'ona de les telecomunicacions i de forma multiplex - són clau per poder escalar o estendre el sistema a grans distàncies. Aquesta és la primera vegada que s'han aconseguit juntes. Com assenyala amb entusiasme Dario Lago, estudiant de doctorat a l'ICFO i primer autor de l'estudi: "Fins ara, altres grups ja havien aconseguit algunes de les fites aconseguides en aquest experiment, com entrellacar memòries quàntiques o emmagatzemar-hi fotons amb una eficiència i taxa d'entrellacament elevades. Però la singularitat d'aquest experiment és que les nostres tècniques ho han aconseguit de manera conjunta i eficient, i que el sistema podria arribar a estendre's a grans distàncies".

### Configurant l'experiment

Aconseguir aquest objectiu ha necessitat d'esforç i de temps. L'equip va preparar l'experiment durant el transcurs de diversos mesos, utilitzant com a memòries quàntiques uns cristalls dopats amb praseodimi, un element químic del grup de les terres rares<sup>[1]</sup>. També es van utilitzar dues fonts generadores de parells de fotons, correlacionats i individuals. A cada parell de fotons, n'hi havia un anomenat "missatger", amb una longitud d'ona dins de la franja de les telecomunicacions de 1436 nm; i l'altre, anomenat "senyal", amb una longitud d'ona de 606 nm. **Els fotons senyal es van enviar a una memòria quàntica**, formada per milions d'àtoms col·locats aleatòriament dins d'un vidre, i es van emmagatzemar-hi a través d'un protocol anomenat AFC - per les sigles en anglès de pinta de freqüència atòmica. Al seu torn, **els fotons missatgers es van enviar a través d'una fibra òptica a un dispositiu anomenat divisor de feix**, on es va esborrar del tot la informació sobre el seu origen i trajectòria. Samuele Grandi, investigador postdoctoral i coautor de l'estudi, comenta: "És difícil esborrar qualsevol tipus de característica que ens digues d'on procedien els fotons missatgers, perquè no volíem tenir cap informació sobre el fotó senyal ni intuir en quina memòria quàntica s'estava emmagatzemant". En esborrar aquestes característiques, el fotó senyal podria emmagatzemar-se en qualsevol de les memòries quàntiques, el que significava que hi havia entrellacament entre els fotons. Per confirmar i verificar que, de fet, s'havia aconseguit un entrellacament, els científics van fer un clic cada vegada que un fotó missatger arribava al detector. Aquest entrellacament era el fotó senyal en estat de superposició entre les dues memòries quàntiques, emmagatzemant com una excitació compartida per desenes de milions d'àtoms durant un màxim de 25 micròsegons. Com mencionen el Dario i el Sam, "El més curiós de l'experiment és que no és possible saber si el fotó estava emmagatzemat a la memòria quàntica de laboratori 1 o de laboratori 2, que estaven a més de 10 metres de distància. Tot i que aquesta és la característica principal del nostre experiment, i per tant des del principi esperàvem que passés alguna"

cosa, els resultats al laboratori van confirmar-se contraris a la intuïció. I encara més eculiari i al·lucinant per a nosaltres, vam ser capaços de cont

### **La importància dels fotons missatgers**

La majoria dels estudis previs ja havien experimentat amb l'entrellacament i les memòries quàntiques utilitzant fotons missatgers, per saber si es produïa amb èxit entrellacament entre elles o no. Un foto missatger es com un colom missatger; quan arriba, els científics poden saber que s'ha establert l'entrellacament entre les memòries quàntiques. Aleshores, els intents d'entrellacament s'aturen i aquest entrellacament s'emmagatzema en les memòries abans de ser analitzat

En aquest experiment es fa servir un foto missatger en la freqüència de les telecomunicacions. Això vol dir que l'entrellacament que es produeix podria establir-se d'igual manera amb un foto compatible amb les xarxes de telecomunicacions existents. Aquest fet representa una gesta considerable, ja que permetria crear entrellacaments a llargues distàncies, i que aquestes tecnologies quàntiques s'integressin fàcilment a les xarxes i infraestructures clàssiques de telecomunicacions ja existents

### **La multiplexació és clau**

La multiplexació és la capacitat que té un sistema d'enviar diversos missatges simultàniament a través d'un sol canal de transmissió. En les telecomunicacions clàssiques, és una eina que s'utilitza amb freqüència per transmetre dades a través d'Internet, però als repetidors quàntics, aquesta tècnica és una mica més complexa. Amb les memòries quàntiques estàndard, un ha d'esperar que el missatge que anuncia l'entrellacament torni a les memòries abans de poder tornar a intentar crear-ne un de nou. Però a través del protocol AFC (pinta de freqüència atòmica), que permet aquest enfocament de multiplexació, els investigadors poden emmagatzemar els fotons entrellacats en molts moments diferents en una memòria quàntica, sense haver d'esperar-se que arribi el senyal d'èxit abans de generar el següent parell de fotons entrellacats. Aquesta condició, anomenada "**multiplexació temporal**" és una característica clau que representa un augment important en el temps operatiu del sistema, el que comporta un increment en la taxa d'entrellacament final.

### **Propers passos**

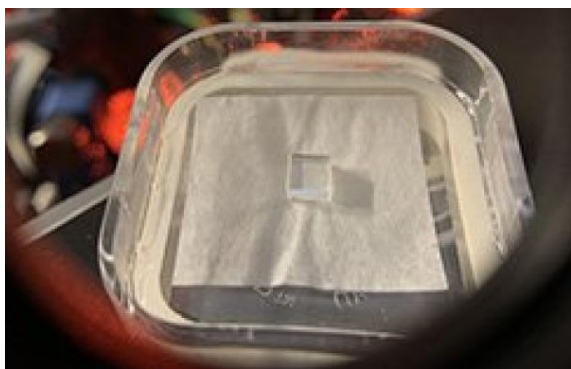
Tal i com comenta el Prof. ICREA a l'ICFO Hugues de Riedmatten: *«Vam concebre aquesta idea fa més de 10 anys, i estic encantat de veure que ara ha tingut èxit al laboratori. Els següents passos seran portar l'experiment fora de laboratori, per intentar vincular diferents nodes, i distribuir l'entrellacament a distàncies molt més grans que les que hem aconseguit ara. De fet, estem en procés d'aconseguir el primer enllaç quàntic de 35 km, que es farà entre Barcelona i l'ICFO, a Castelldefels. És clar que la futura xarxa quàntica portarà moltes aplicacions en un futur*

ur proxim. Aconseguir aquest objectiu confirma que estem en el camí correcte per desenvolupar aquestes noves tecnologies i començar a implementar-les, en el que serà una forma de connectar el **Internet Quàntic**.

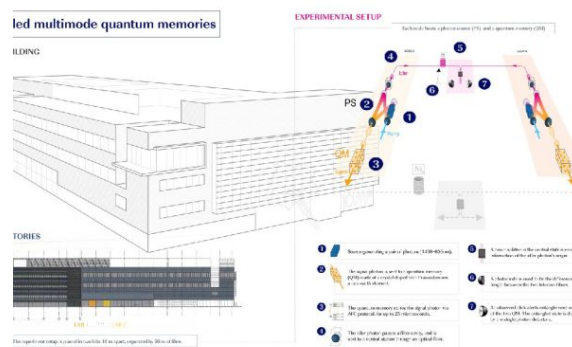
Referència: Telecom-heralded entanglement between multimode solid-state quantum memories

Dario Lago-Rivera, Samuele Grandi, Jelena V. Rakonjac, Alessandro Seri, and Hugues de Riedmatten, Nature, 2021, <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03481-8>

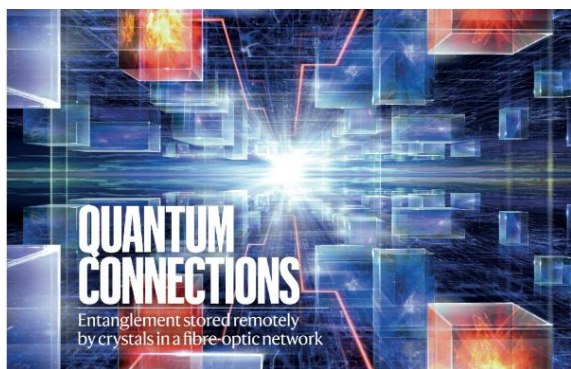
[1] El conjunt d'elements coneguts com a terres rares està format per disset elements químics, i inclouen els lantanids, grup on es troba el praseodimi (Pr), l'escandi (Sc) i l'itri (Y).



Close-up image of a rare-earth doped crystal used as a quantum memory. ©ICFO



Il·lustració esquemàtica de l'experiment i de la seva ubicació dins dels laboratoris.



Portada de Nature - 3 Junio