



Memorias cuánticas entrelazadas para un repetidor cuántico: cada vez mas cerca del Internet cuántico

- Investigadores del ICFO logran por primera vez, en un estudio publicado en Nature, el entrelazamiento de dos memorias cuánticas multimodo, localizadas en diferentes laboratorios separados por 10 metros, y anunciado por un foton en la longitud de onda de las telecomunicaciones.
- Los científicos han implementado una tecnica que les permite alcanzar una tasa de entrelazamiento record, en un sistema que podria integrarse a la red de comunicacion tradicional por fibra optica, allanando el camino para operar a largas distancias.
- Los resultados se consideran un hito para las comunicaciones cuánticas y un gran paso adelante hacia el desarrollo de repetidores cuánticos, imprescindibles para el futuro Internet cuántico.

June 02, 2021

Durante la década de los 90s se lograron avances importantes en el campo de las telecomunicaciones, consiguiendo extender la red a distancias mas alla de las ciudades y areas metropolitanas, marcando asi un antes y un despues en la comunicacion global. Para poder escalar el sistema se utilizaron repetidores, que mejoraban las senales atenuadas y les permitian viajar a distancias mas largas con las mismas características de intensidad y fidelidad. Con la adición de satelites al sistema, se ha logrado normalizar el hecho de estar perdido entre las montañas en Europa y poder hablar con amigos viviendo en la otra punta del mundo.

En el camino hacia construir el futuro Internet cuantico, las memorias cuanticas desempeñan ese mismo papel. Junto con las fuentes generadoras de qubits, son los componentes basicos de este sistema, y actúan como repetidores de operaciones de datos utilizando la superposicion y el entrelazamiento como ingredientes claves. Pero, para poder operar un sistema como el Internet cuantico, primero es necesario entrelazar esas memorias a larga distancia, y mantener ese entrelazamiento de la manera mas eficiente posible.

Todo en uno

La revista Nature publica un estudio en el cual los científicos del ICFO Dario Lago, Samuele Grandi, Alessandro Seri y Jelena Rakonjac, dirigidos por el profesor ICREA del ICFO Hugues de Riedmatten, han logrado, por primera vez, un entrelazamiento materia-materia entre dos memorias cuanticas. Este entrelazamiento se ha conseguido entre memorias de estado solido, con propiedades multimodo, remotas - colocadas a cierta distancia -, y operando en la longitud de onda de las telecomunicaciones, siendo por lo tanto una tecnologia potencialmente escalable. Dicho de manera mas simple; han conseguido almacenar, durante un maximo de 25 microsegundos, un unico foton entre dos memorias cuanticas separadas entre si por 10 m de distancia.

? Descripcion: Imagen izquierda: Cristal de memoria cuantica dentro del criostato en el laboratorio. Imagen derecha: foto del cristal dopado con elementos de tierras raras (Praseodymium), utilizado como memoria cuantica

. Los investigadores sabian que el foton estaba en una de las dos memorias, pero no sabian en cual. Esto enfatiza la nocion clasica y anti-intuitiva que tenemos de la naturaleza; el foton estaria en un estado de superposicion cuantico en dos memorias a la vez, y cuando se detecta, sorprendentemente, se encontraban a 10 metros de distancia. El equipo supo que se habia creado entrelazamiento **detectar un foton en la longitud de onda de las**

telecomunicaciones, que se almacena en las memorias cuánticas de **forma multiplex**, una técnica que permite enviar varios mensajes simultáneamente por un solo canal de comunicación. Estas dos características - lograr entrelazamiento en la longitud de onda de las telecomunicaciones y de forma multiplex - son clave para poder escalar/extender el sistema a grandes distancias, y se han logrado juntas por primera vez.

Como señala con entusiasmo Dario Lago, estudiante de doctorado en ICFO y primer autor del estudio: *¿Hasta ahora, otros grupos ya habían conseguido varios de los hitos logrados en este experimento, como entrelazar memorias cuánticas o almacenar fotones en memorias cuánticas con una eficiencia y tasa elevadas. Pero la singularidad de este experimento es que nuestras técnicas lo han logrado de manera conjunta y eficiente, y que el sistema puede llegar a extenderse a grandes distancias*

Configurando el experimento

Lograr este objetivo ha necesitado de esfuerzo y tiempo. El equipo preparó el experimento durante el transcurso de varios meses, utilizando como memorias cuánticas unos cristales base dopados con praseodimio, un elemento químico del grupo de las tierras raras^[1].

También se utilizaron dos fuentes generadoras de pares de fotones, correlacionados e individuales. En cada par de fotones, había uno llamado *¿mensajero¿*, con una longitud dentro del rango de las telecomunicaciones de 1436nm ; y el otro, llamado *¿senal¿*, con una longitud de onda de 606nm. **Los fotones senal se enviaron a una memoria cuántica**, formada por millones de átomos colocados aleatoriamente dentro de un cristal, y se almacenaron allí a través de un protocolo llamado AFC - por las siglas en inglés de peine de frecuencia atómica. A su vez, los **fotones mensajeros se enviaron a través de una fibra óptica a un dispositivo llamado divisor de haz**, donde se borra por completo la información sobre su origen y trayectoria. Samuele Grandi, investigador postdoctoral y coautor del estudio, comenta: *¿Borramos cualquier tipo de característica que nos dijera de donde procedían los fotones mensajeros, porque no queríamos tener ninguna información sobre el foton senal i intuir en que memoria cuántica se estaba almacenando¿*. Al borrar estas características el foton senal podía almacenarse en cualquiera de las memorias cuánticas, lo que significaba que había entrelazamiento entre el

s. Descripción: Ilustración esquemática del experimento y su ubicación dentro en los laboratorios de I

O. Para confirmar y verificar que, de hecho, se había conseguido un entrelazamiento, los científicos veían en el monitor un clic cada vez que **foton mensajero** llegaba al detector. Este entrelazamiento era el **foton senal** en estado de superposición entre las dos memorias

cuánticas, almacenándose como una excitación compartida por decenas de millones de átomos durante un máximo de 25 microsegundos.

Como mencionan Sam y Dario, ¿Lo curioso del experimento es que no era posible saber si el fotón estaba almacenado en la memoria cuántica del laboratorio 1 o del laboratorio 2, que estaban a más de 10 metros de distancia. Aunque esta es la característica principal de nuestro experimento, y por tanto algo que esperábamos que ocurriese, los resultados en el laboratorio seguían siendo contrarios a la intuición. Y aún más peculiar y alucinante para nosotros, ¡fuimos capaces de controlarlo!

La importancia de los fotones mensajeros

La mayoría de los estudios previos han experimentado con el entrelazamiento y memorias cuánticas utilizando fotones mensajeros para saber si el entrelazamiento entre las memorias cuánticas había tenido éxito o no. Un fotón mensajero es como una paloma mensajera, y los científicos pueden saber a su llegada que se ha establecido el entrelazamiento entre las memorias cuánticas. Cuando esto sucede, los intentos de entrelazamiento se detienen y el entrelazamiento se almacena en las memorias antes de ser analizado.

En este experimento se usa un fotón mensajero en la frecuencia de las telecomunicaciones. Por lo tanto, el entrelazamiento que se produce podría establecerse con un fotón compatible con las redes de telecomunicaciones existentes. Este hecho representa una hazaña considerable, ya que permitiría crear entrelazamientos a largas distancias y que estas tecnologías cuánticas se integrasen fácilmente en las redes e infraestructuras clásicas de telecomunicaciones ya existentes.

La multiplexación es clave

La multiplexación es la capacidad que tiene un sistema en enviar varios mensajes al mismo tiempo a través de un solo canal de transmisión. En las telecomunicaciones clásicas, es una herramienta que se utiliza con frecuencia para transmitir datos a través de Internet. En los repetidores cuánticos, esta técnica es un poco más compleja. Con las memorias cuánticas estándares, uno tiene que esperar a que el mensaje que anuncia el entrelazamiento regrese a las memorias antes de poder volver a intentar crear un nuevo entrelazamiento. Pero a través del protocolo AFC (peine de frecuencia atómica) que permite este enfoque de multiplexación, los investigadores pueden almacenar los fotones entrelazados en muchos momentos diferentes en la memoria cuántica, sin tener que esperar a que llegue la señal de éxito antes de generar el siguiente par de fotones entrelazados. Esta condición, denominada **¿multiplexación temporal¿** es una característica clave que representa un aumento importante en el tiempo operativo del sistema, lo que conlleva a un incremento en la tasa de entrelazamiento final.

Próximos pasos

Tal y como comenta el Prof. ICREA del ICFO Hugues de Riedmatten: ¡¿Concebimos esta idea hace más de 10 años, y estoy encantado de ver que ahora ha tenido éxito en el laboratorio. Los siguientes pasos son llevar el experimento fuera del laboratorio, para intentar vincular diferentes nodos y distribuir el entrelazamiento en distancias mucho mayores, más allá de lo que hemos conseguido ahora. De hecho, estamos en medio de conseguir el primer enlace cuántico de 35km, que se hará entre Barcelona y el ICFO, en Castelldefels? ¡¿. Esta claro que la futura red cuántica traerá muchas aplicaciones en un futuro próximo. Lograr este objetivo confirma que estamos en el camino correcto para desarrollar estas nuevas tecnologías y comenzar a implementarlas en lo que será una nueva forma de comunicación. **Internet Cuántico.**

Referencia: 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 grupo de elementos conocido como tierras raras está compuesto por los elementos del grupo lantanidos: lantano (La), cerio (Ce), **praseodimio (Pr)**, neodimio (Nd), prometio (Pm), etc.

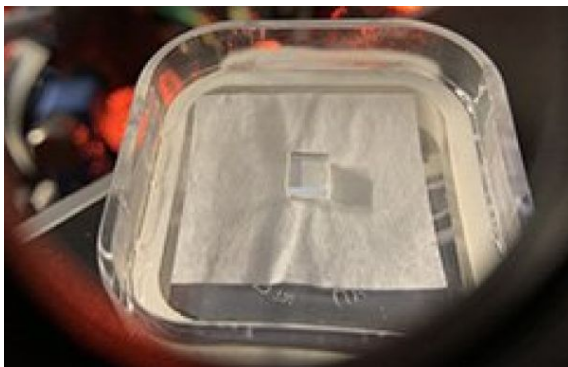


Ilustración esquemática del experimento y su ubicación dentro en los laboratorios de ICFO. @ICFO

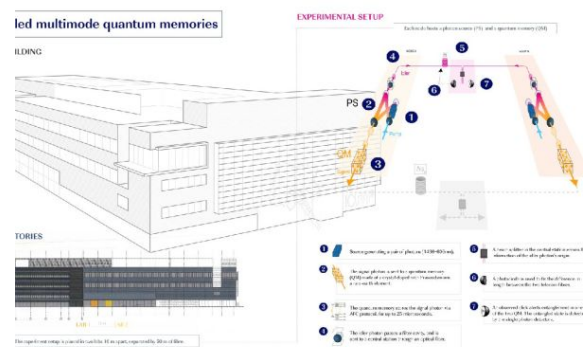
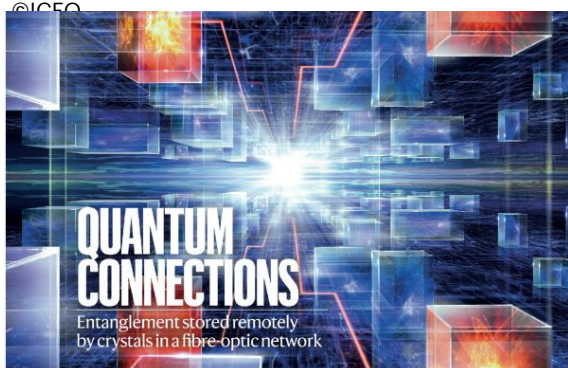


Ilustración esquemática del experimento y su ubicación dentro en los laboratorios de ICFO.



Portada de Nature - 3 Junio