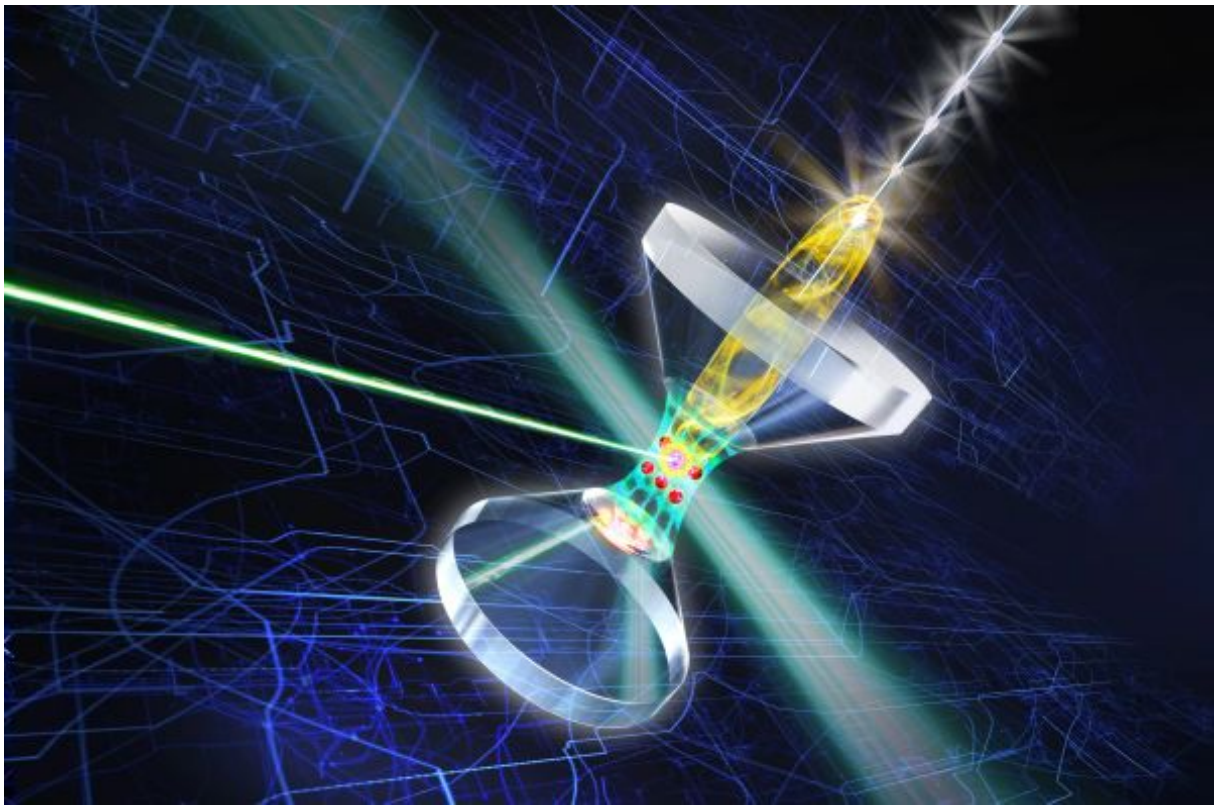


Propagacion segura de entrelazamiento con solo presionar un boton

Un equipo de fisicos, dirigido por investigadores del MPQ, utiliza pinzas opticas en resonadores opticos para crear entrelazamientos en una red cuantica.

July 12, 2024

El entrelazamiento, la "accion espeluznante a distancia" de Einstein, es hoy en dia la herramienta para la ciencia de la informacion cuantica. Es el recurso esencial para los ordenadores cuanticos y para transmitir informacion cuantica en una futura red cuantica. Pero esta herramienta es muy sensible, ya que es un enorme desafio entrelazar bits cuanticos en reposo (qubits) con qubits en vuelo en forma de fotones "con solo presionar un boton". Ahora, un equipo dirigido por **Gerhard Rempe**, director del **Instituto Max Planck de Optica Cuantica** en Garching, Alemania, ha logrado hacer exactamente eso con atomos conectados en paralelo, intercalados entre dos espejos casi perfectos. Esta configuracion garantiza una

interaccion fiable con fotones en forma de qubits en vuelo, una tecnica de la que fue pionero Gerhard Rempe. Utilizando pinzas opticas, el equipo pudo controlar individualmente hasta seis atomos y entrelazar cada uno con un foton. Mediante una tecnica de multiplexacion, los cientificos demostraron la generacion de entrelazamiento atomo-foton con casi un 100 por ciento de eficiencia, un logro innovador para distribuir el entrelazamiento a traves de una red cuantica. El trabajo se publica hoy en la revista Science.

Las interfaces entre qubits en reposo y qubits en movimiento o en vuelo entran en juego siempre que es necesario transmitir informacion cuantica a largas distancias. "Un aspecto es la comunicacion de informacion cuantica a largas distancias en un futuro Internet cuantico", explica **Emanuele Distante**, que superviso el experimento como investigador postdoctoral y ahora es investigador en el ICFO de Barcelona: "El segundo aspecto es el objetivo de conectar muchos qubits en una red distribuida para crear un ordenador cuantico mas poderoso. Ambas aplicaciones requieren interfaces eficientes entre qubits en reposo y qubits en movimiento. Esta es la razon por la que muchos grupos en todo el mundo estan investigando de manera acelerada interfaces a nivel cuantico de para la interaccion de materia-luzi¿½.

Se estan aplicando varios enfoques tecnicos diferentes. Gerhard Rempe y su equipo de Garching llevan muchos anos trabajando en un metodo que utiliza, como resonador optico, atomos de rubidio ultrafrios capturados y atrapados entre dos espejos casi perfectos. La meta se centra en construir un Internet cuantico futuro. Este enfoque tiene una ventaja inherente porque permite que un atomo atrapado interactue de una manera muy eficiente con un foton, que rebota entre los dos espejos unas veinte mil veces como una pelota de ping-pong. Ademas, como uno de los dos espejos es ligeramente mas transparente que el otro, el foton sale en una direccion exactamente predeterminada. Esto significa que no se pierde, sino que se puede acoplar de forma fiable a una fibra optica. Si este foton se entrelaza con el atomo mediante un protocolo especifico de pulsos de luz laser, este entrelazamiento se mantiene a medida que el foton viaja.

Multiplexacion para evitar perdidas de transmision

En 2012, el equipo de Garching logro entrelazar un atomo en un resonador con un segundo atomo en otro resonador mediante una "radio de fotones" a traves de una fibra de vidrio de 60 metros de largo. Con la ayuda del foton transmitido, formaron un objeto cuantico entrelazado extendido a partir de los dos atomos. Sin embargo, el foton no debe perderse en la fibra de vidrio durante el camino, y este es precisamente el problema con viajes de distancias mas largas. La solucion, al menos para distancias medias de unos pocos kilometros, se llama "multiplexacion o multiplexado". La multiplexacion es un metodo estandar utilizado en la tecnologia de la informacion clasica para hacer que la transmision sea mas robusta. Es como un enlace de radio a traves de un area ruidosa: si envia la senal de radio a traves de varios canales paralelos, aumenta la probabilidad de que llegue al receptor

a traves de al menos un canal.
"Sin la multiplexacion ni siquiera nuestro Internet actual funcionaria", explica Distante: "Pero trasladar este metodo a los sistemas de informacion cuanticos supone un desafio especial". La multiplexacion no solo es interesante para una transmision mas segura a distancias mas largas en un Internet cuantico futuro, sino tambien para una red cuantica local. Un ejemplo es el ordenador cuantico distribuido, que consta de varios procesadores mas pequenos conectados mediante fibras opticas cortas. Sus qubits en reposo podrian entrelazarse de manera mas confiable mediante la multiplexacion con qubits en movimiento para formar un ordenador cuantico distribuido y mas poderoso.

Pinzas opticas para manipular atomos

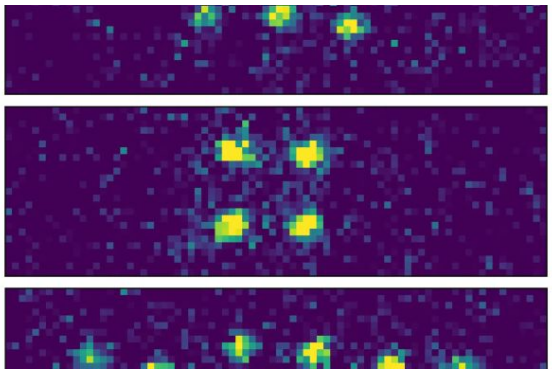
El desafio para el equipo de Garching fue cargar varios atomos dentro de un resonador como qubits en reposo y manipularlos individualmente. Solo si se conoce la posicion de los atomos se pueden entrelazar en paralelo, con un foton cada uno, para lograr la multiplexacion. Por tanto, el equipo desarrollo una tecnica para insertar pinzas opticas en el resonador estrecho. "Los espejos estan separados solo por medio milimetro aproximadamente", explica **Lukas Hartung**, estudiante de doctorado y primer autor del articulo de Science.
Las pinzas opticas consisten en finos rayos laser que son lo suficientemente potentes como para capturar un atomo en su foco y moverlo con precision a la posicion deseada. Usando hasta seis de estas pinzas, el equipo pudo organizar una cantidad correspondiente de atomos de rubidio flotantes en la cavidad para formar una red ordenada de qubits. Dado que los atomos pueden permanecer facilmente en la trampa durante un minuto (para la fisica cuantica es una eternidad), podrian facilmente entrelazarse con un foton cada uno. "Esto funciona casi el cien por ciento de las veces", dice Distante, destacando la ventaja clave de esta tecnica: la distribucion del entrelazamiento funciona casi "deterministicamente", es decir, con solo presionar un boton.

Escalable a muchos mas qubits

Para lograrlo, el equipo utilizo un objetivo de lente de microscopio, colocado con precision micrometrica encima del resonador, para enfocar los haces individuales de las pinzas de luz en la cavidad estrecha del espejo. Las pinzas otpicas se generan mediante los llamados deflectores acusticos-opticos y, por tanto, pueden controlarse de manera individual. El ajuste preciso de las pinzas opticas requiere mucha destreza. "Superar este desafio fue la piedra angular del exito del experimento", resume **Stephan Welte,** que participo en el desarrollo de la tecnologia como parte del equipo y ahora es investigador en ETH Zurich.
El experimento actual da lugar a perspectivas muy prometedoras de que el metodo pueda ampliarse a muchos mas qubits sin tener perdidas: el equipo estima que dentro de un resonador de este tipo se podrian controlar hasta 200 atomos. Dado que estos bits cuanticos se pueden controlar muy bien en el resonador, esto seria un gran paso adelante. Y como la

interfaz incluso alimenta el cien por cien de los fotones entrelazados en la fibra optica, seria plausible e imaginable una red de muchos resonadores, cada uno con 200 atomos como qubits en reposo. Esto daria como resultado un poderoso ordenador cuantico. Sigue siendo un sueno de futuro. Pero con las pinzas opticas, el equipo de Garching tiene ahora bajo control una parte significativa de este futuro.

Articulo citado: L. Hartung, M. Seubert, S. Welte, E. Distante, G. Rempe. A quantum-network register assembled with optical tweezers in an optical cavity. Science (2024



Los cientificos han podido manipular hasta seis atomos de rubidio como bits cuanticos en el resonador optico con las pinzas de luz. Para hacerlos visibles, los atomos se excitan para que emitan luz. En teoria, el resonador puede albergar hasta 200 atomos