

COMPLEMENTO DEL CAPÍTULO 1 • RED CUÁNTICA REAL

Entrelazar un átomo con un fotón

... y enviarlo 24 km por fibra de la ciudad



Büki *et al.*, **Phys. Rev. Lett.** **137**, 090803 (2026)

Grupos de Weinfurter (LMU) y Rempe (MPQ), Múnich • [arXiv:2607.08513](#)

Por qué esto importa: la internet cuántica

- ▶ Una **internet cuántica** necesita enlazar *qubits de materia* (átomos, iones) separados por kilómetros.
- ▶ El mensajero natural entre nodos es un **fotón** entrelazado con el átomo.
- ▶ Problema: los átomos emiten en el *visible* (780 nm), donde la fibra *absorbe muchísimo*.

La tensión central

La luz que el átomo “sabe” emitir (780 nm) es *justo* la que la fibra no deja viajar. Las telecomunicaciones usan ~ 1550 nm.

Este paper resuelve esa tensión y distribuye entrelazamiento átomo-fotón por la fibra *real* de Múnich.

Qué lograron, en una diapositiva

- ▶ Entrelazaron un solo átomo de ^{87}Rb con un fotón, *convirtieron* el fotón a longitud de onda de telecomunicaciones, lo enviaron por **24 km de fibra desplegada** de la ciudad (14 km en línea recta, LMU $\leftrightarrow$ MPQ), y lo *re-convirtieron* a 780 nm.
- ▶ El entrelazamiento *sobrevivió*: la fidelidad cayó menos del 1%.

Fidelidad

$$\mathcal{F} \geq 86.8\%$$

(ref. 87.6%)

Desigualdad de Bell

$$S = 2.30 \pm 0.08$$

> 2 : hay entrelazamiento

Eficiencia del enlace

$$1.7\%$$

por fotón transmitido

Primera distribución de entrelazamiento átomo-fotón por fibra metropolitana *ya instalada*.

El montaje de un vistazo (la Figura 1)



- ▶ El átomo emite un fotón (780 nm) *entrelazado* con su estado interno.
- ▶ **QFC1** lo baja a telecom (1514 nm) $\rightarrow$ 24 km de fibra $\rightarrow$ **QFC2** lo sube de vuelta a 780 nm $\rightarrow$ se mide.
- ▶ Cuando el fotón llega a MPQ, se avisa a LMU y *allí* se lee el estado del átomo (fluorescencia).

Los dos qubits que se van a entrelazar

Qubit atómico

Dos subniveles Zeeman del estado base de ^{87}Rb :

$$|\downarrow\rangle \equiv |F=1, m=-1\rangle$$

$$|\uparrow\rangle \equiv |F=1, m=+1\rangle$$

Es un *espín* de larga vida: la memoria.

Qubit fotónico

La *polarización* del fotón emitido:

$$|L\rangle \text{ (circ. izq.)}, \quad |R\rangle \text{ (circ. der.)}$$

Es el *mensajero* que viaja por la fibra.

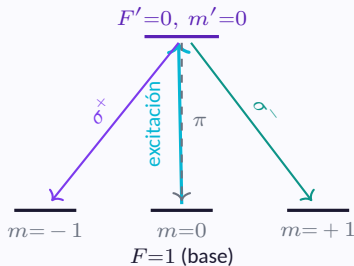
La meta: dejar el sistema en un estado en el que *no* se pueda describir el átomo sin el fotón.

El cómo (1): excitar y dejar que decaiga

1. Se prepara el átomo en $|F=1, m=0\rangle$.
2. Un pulso lo **excita** a $|F'=0, m'=0\rangle$.
3. El átomo **decae espontáneamente** y emite un fotón.

Por conservación del momento angular, el cambio Δm fija la *polarización* del fotón:

- $m=-1$: fotón σ^+ (izq., $|L\rangle$)
- $m=0$: fotón π
- $m=+1$: fotón σ^- (der., $|R\rangle$)



El cómo (2): por qué queda entrelazado

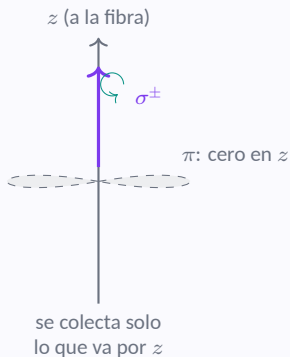
La **clave geométrica**: se recoge la luz *a lo largo del eje z* (hacia la fibra).

- ▶ Un dipolo π (canal $m=0$) *no radia* a lo largo de su propio eje $\Rightarrow$ ese fotón **no se colecta**.
- ▶ Solo sobreviven los dos canales $\sigma^\pm$ ($m = \pm 1$), circulares opuestos.

El fotón “lleva escrita” *a cuál* subnivel cayó el átomo (información de camino) $\Rightarrow$ quedan *correlacionados*:

Estado átomo-fotón

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|L\rangle |\downarrow_z\rangle + |R\rangle |\uparrow_z\rangle)$$



? Pausa socrática #1 — información de camino

El fotón queda entrelazado porque “sabe” a qué subnivel cayó el átomo.?

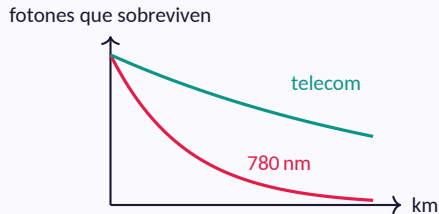
- ▶ ¿Qué pasaría con el entrelazamiento si *mediéramos* la polarización sin registrar el resultado?
- ▶ ¿Por qué la conservación del momento angular es la que “ata” el espín del átomo a la polarización?
- ▶ Si también colectáramos el canal π , ¿por qué se *arruinaría* el qubit?

Conversión de frecuencia: por qué es indispensable

- ▶ A 780 nm la fibra pierde *muchísimo*; a ~ 1500 nm (telecom) pierde poco (~ 0.35 dB/km).
- ▶ Sobre 24 km eso es la diferencia entre $\sim 0\%$ y $\sim 11\%$ de transmisión.

La idea

Traducir el color del fotón **sin borrar su qubit**: la polarización (y el entrelazamiento) deben quedar intactos.



Conversión de frecuencia: cómo funciona

Generación por diferencia de frecuencias (DFG) en un cristal no lineal (*niobato de litio periódicamente polarizado*, en guía de onda):

Se resta la frecuencia de un bombeo

$$\frac{1}{780} - \frac{1}{1610} = \frac{1}{1514} \text{ (nm}^{-1}\text{)}$$

- ▶ Bombeo intenso a 1610 nm “baja” el fotón de 780 a 1514 nm.
- ▶ En el otro nodo, el proceso inverso (suma de frecuencias) lo *regresa* a 780 nm, resonante con otro átomo.

El truco que preserva el qubit

El cristal va dentro de un **interferómetro de Sagnac**: las dos polarizaciones recorren el mismo camino en sentidos opuestos y se convierten *idénticamente*.

Así la polarización — y con ella el entrelazamiento — no se distorsiona.

Cómo leer la Figura 1 (paso a paso)

- ▶ **Izquierda (Nodo 1, LMU):** el *esquema de niveles* que ya vimos — el átomo emite el fotón entrelazado. Ese recuadro es el “motor” del experimento.
- ▶ **Centro:** el fotón pasa por **QFC1** (se vuelve telecom), viaja los 24 km de fibra de la ciudad, y llega a **QFC2** (vuelve a 780 nm).
- ▶ **Derecha (Nodo 2, MPQ):** tras *filtrar* el ruido del bombeo, se hace una *medición de proyección* sobre la polarización del fotón.
- ▶ **Flecha de regreso:** al detectar el fotón en MPQ se avisa a LMU (por una *segunda* fibra clásica) y se lee el estado del átomo con fluorescencia (interruptor MEMS + APD).

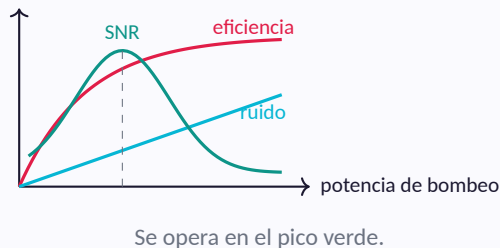
En una frase: el esquema de niveles *crea* el entrelazamiento; el resto de la figura lo *transporta* y lo *mide*.

Cómo leer la Figura 2 (caracterizar los conversores)

La Figura 2 mide, para cada conversor, tres curvas frente a la *potencia de bombeo*:

- **Eficiencia** (rojo): sube con la potencia y *satura* ($\sim 44\text{-}50\%$).
- **Ruido** (azul): más bombeo $\Rightarrow$ más fotones parásitos.
- **Relación señal/ruido** (verde): tiene un *óptimo*.

La línea punteada marca la potencia elegida: la que maximiza la SNR, no la eficiencia.



Los resultados en detalle

- ▶ **Fidelidad** del entrelazamiento: $\geq 86.8\%$ en telecom y $\geq 86.9\%$ tras volver a 780 nm (referencia sin fibra: 87.6%).
- ▶ **Bell/CHSH**: $S = 2.30 \pm 0.08 > 2$ — viola la desigualdad, hay entrelazamiento genuino.
- ▶ **Eficiencia por fotón**: 1.7% (42% bajar $\times$ 11% fibra $\times$ 37% subir).
- ▶ **SNR** del enlace: 47 ± 8 .
- ▶ Eficiencia *global* de distribución: 3.1×10^{-5} (domina el 1% de *colectar* el fotón del átomo).

El cuello de botella honesto. Lo difícil no es la conversión (ya es $\sim 40\%$), sino *atrapar* el fotón que el átomo emite en todas direcciones: apenas 1% entra a la fibra.

Por qué es un hito

- ▶ Es la primera vez que se distribuye entrelazamiento átomo-fotón por *fibra urbana ya instalada*, a la longitud de onda natural del átomo, *conservando* el entrelazamiento.
- ▶ Es un ladrillo del **repetidor cuántico**: enlazar memorias atómicas distantes para una futura internet cuántica.

Puente con la IA / QML. Igual que un modelo distribuido necesita *mover representaciones* entre nodos sin corromperlas, una red cuántica necesita mover *qubits* entre nodos sin destruir su entrelazamiento. Aquí el “cable” es un fotón traducido a telecom, y la “pérdida” que se cuida no es un gradiente, sino la *fidelidad*.^{AI}

? Pausa socrática #2 — hacia el repetidor

Con esto se entrelaza *un* átomo con *un* fotón lejano.



- ▶ ¿Cómo usarías dos de estos enlaces para entrelazar *dos átomos* distantes que nunca se “vieron”? (pista: medición de Bell del fotón)
- ▶ Si la eficiencia global es 3×10^{-5} , ¿qué haría falta para que esto sea *práctico*?
- ▶ ¿Por qué preservar la fidelidad importa más que la eficiencia para un repetidor?

Fuente

M. Büki, P. Malik, F. Fertig, *et al.*,
“Metropolitan Entanglement Distribution between an Atom and a Near-Visible
Photon”,
Phys. Rev. Lett. **137**, 090803 (2026).

doi.org/10.1103/94hz-xtht · [arXiv:2607.08513](https://arxiv.org/abs/2607.08513)

Complemento del Capítulo 1 — Introducción a la computación cuántica