

Física cuántica e información: nuevas tecnologías para el siglo XXI

Laia Serradesanferm Córdoba y Antonio Acín

¿Qué sucede si codificamos información en sistemas cuánticos? Hace unos cincuenta años, un grupo de científicos y científicas se planteó esta misma pregunta, dando origen a la teoría de la información cuántica. Esta disciplina, hoy en día ya consolidada, nos ha proporcionado un amplio abanico de nuevas herramientas para procesar y transmitir información, cuyo potencial apenas comienza a explorarse.

La información es un concepto clave en nuestra sociedad, con un impacto muy directo en nuestro día a día: desde que nos levantamos hasta que nos acostamos, miles de mensajes son intercambiados por internet, así como miles de operaciones, de mayor o menor complejidad, son ejecutadas en los distintos dispositivos procesadores de información, desde supercomputadores hasta nuestros propios móviles. La información ha modificado de tal manera el modo en que vivimos y convivimos que a menudo se conoce a nuestra sociedad como la sociedad de la información.

Todas las aplicaciones de información operan con bits, que no es más que su unidad básica y que puede tomar dos valores, cero o uno. Nuestra conexión de internet en casa o en el trabajo, la capacidad de memoria de nuestro móvil o la velocidad del procesador de nuestro portátil, todo se mide en bits. La teoría de la información, iniciada por medio de los trabajos pioneros de Shannon a mediados del siglo XX, proporciona las herramientas para entender y optimizar el uso de bits de cara a resolver las distintas tareas de procesamiento de la información.

La física cuántica fue otra de las revoluciones que nos dejó el siglo XX. Es el formalismo que explica todos los fenómenos microscópicos que nos rodean. Al tratar con el mundo de lo más pequeño, su impacto en nuestra sociedad no es tan evidente a primera vista. Sin embargo, esta conclusión es incorrecta por superficial. Por un lado, y desde un nivel fundamental, las predicciones de la física cuántica supusieron un cambio radical en la comprensión de la naturaleza, ya que son en muchos aspectos muy distintas de las predicciones de la hasta entonces imperante física newtoniana. Desde una perspectiva más aplicada, la física cuántica ha sido y es crucial para comprender los materiales, la química y la estructura molecular y, por lo tanto, gran parte de la ciencia y la tecnología modernas. Aplicaciones como el láser, que se usa desde para leer el código de barras en el supermercado hasta en complejas operaciones quirúrgicas, o el transistor, que es fundamental para el funcionamiento de cualquier ordenador,

solo fueron posibles gracias a la comprensión del mundo microscópico que proporcionó la física cuántica.

Partículas cuánticas para procesar y transmitir información: cambio de paradigma

La teoría de la información y la física siempre habían ido avanzando de manera independiente. Los bits se comportaban siguiendo unas reglas que nada tenían que ver con las leyes de la mecánica, el electromagnetismo, la termodinámica o la gravedad. A partir de los años setenta y ochenta, diversos investigadores comenzaron a plantearse qué pasaría si usáramos partículas cuánticas, como los átomos o los fotones de luz, para transmitir y procesar información. *A priori*, esta pregunta no parecía tener demasiado recorrido, dado que la teoría de la información siempre se había visto como una disciplina abstracta, al margen de la realización física de los bits. Sin embargo, pronto se comprendió que el bit almacenado en una partícula descrita por la física cuántica, el bit cuántico o cúbit, es distinto y más rico que el bit clásico, es decir, aquel almacenado en una partícula que se rige por la física clásica. Esto desencadenó una ristra de nuevas incógnitas. ¿Podrían las exóticas propiedades cuánticas darnos de alguna utilidad? ¿Cómo se transformaría la teoría de la información tras mezclarse con la física cuántica? ¿Qué nuevas aplicaciones nos proporcionarían los bits cuánticos? Pero por aquel entonces, y a pesar de que eran unas preguntas muy estimulantes desde un punto de vista conceptual y teórico, implementarlas era una posibilidad cercana a la ciencia ficción teniendo en cuenta el estado de las tecnologías.

Sin embargo, los esfuerzos no cesaron y de la sinergia entre información y física cuántica nació una nueva disciplina: la teoría de la información cuántica. Pese a su enfoque teórico inicial, el dramático progreso tecnológico permitió a los puros conceptos materializarse en aplicaciones tangibles, e ideas que parecían más propias de la ciencia ficción se han convertido en realidad.

En particular, ya se tiene el conocimiento y las técnicas para almacenar bits en partículas cuánticas como los átomos

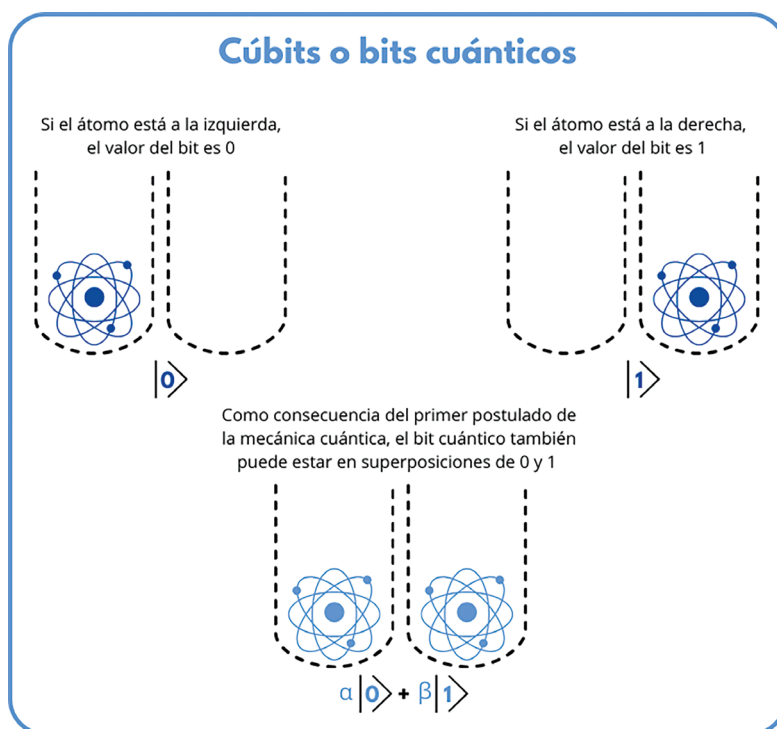
o fotones, lo que proporciona, como hemos avanzado, un bit distinto al tradicional.

Para codificar un bit tradicional basta con encontrar un soporte físico que pueda estar en dos estados distintos. Entonces se asocia uno de ellos con el cero y el otro con el uno. Por ejemplo, imaginemos que somos capaces de restringir la posición de un átomo a dos opciones, izquierda o derecha (véase la fig. 1). Si está a la izquierda, diremos que el valor del bit es cero, mientras que si está a la derecha diremos que es uno. Ahora bien, este átomo es una partícula cuántica, donde las leyes del formalismo cuántico se aplican. En concreto, el átomo se verá afectado por el principio de superposición. Se trata, ni más ni menos, del primer postulado de la disciplina (recordemos que los postulados de una teoría no se discuten, sino que se aceptan), según el cual, si una partícula cuántica puede estar en dos estados, también puede encontrarse en cualquier estado que sea la superposición de los mismos.

De manera más formal, el primer postulado nos dice que: (i) a todo sistema físico le corresponde un espacio de Hilbert y (ii) la descripción del estado del sistema está representado por un vector normalizado $|\psi\rangle$ en este espacio (estos símbolos $|\psi\rangle$, llamados kets, se usan en mecánica cuántica para representar a los vectores). A su vez, todo vector normalizado es un posible estado válido del sistema. Por lo tanto, si tenemos dos estados posibles, el átomo estando a la izquierda y el átomo estando a la derecha, cada uno vendrá representado por un vector normalizado, llamémosles $|0\rangle$ y $|1\rangle$. Pero, según álgebra lineal básica, la combinación lineal de vectores también da lugar a un vector, es decir a un estado válido del sistema. Traduciéndolo al lenguaje de la mecánica cuántica, de la combinación lineal de dos estados posibles surge otro estado posible, $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, siendo α y β números complejos que cumplan $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, ya que el vector debe seguir estando normalizado. Así, a nivel formal, la superposición no es nada más que una combinación lineal de vectores.

Sin embargo, más allá de las matemáticas de los espacios vectoriales, a nivel físico la interpretación y las consecuencias del concepto de superposición son difíciles de asimilar para nuestra intuición, ya que este fenómeno ocurre en el mundo microscópico, de los átomos y las moléculas, que no vemos con nuestros ojos, ni oímos, ni podemos tocar; en el mundo en el que vivimos, que sí percibimos, las superposiciones desaparecen. No existe por tanto analogía que podamos usar para explicarlas y es algo intrínseco a ese mundo de lo pequeño.

Volviendo a nuestra motivación inicial, lo que sí podemos concluir es que de codificar un bit en una partícula cuántica se sigue que el bit cuántico, o cúbit, es distinto al bit tradicional, o clásico, ya que puede tomar los dos valores habituales de cero y uno, pero también cualquier superposición de los



mismos. El cambio de paradigma adquiere así su máxima expresión: la naturaleza de la información depende de manera crucial de las leyes físicas que describan el soporte donde la almacenamos.

Otro cambio de paradigma: del determinismo al indeterminismo

Pese a nuestra dificultad por comprender intuitivamente el fenómeno de la superposición, sus consecuencias son innegables: desde el nacimiento de la cuántica, este principio ha permitido explicar los resultados de numerosos experimentos de manera adecuada, consolidándose así su aceptación entre la comunidad científica. Una de las consecuencias más trascendentales es la pérdida del determinismo, lo que supuso otro cambio de paradigma, uno quizás más sorprendente aún.

Antes del nacimiento de la mecánica cuántica, las leyes de la física dictaban que todo comportamiento en el universo era, al menos en principio, predecible. La única barrera que nos obligaba a usar probabilidades venía impuesta por nuestra ignorancia. Por el contrario, la superposición provoca que al medir un cúbit no obtengamos 0 o 1 de manera determinista (como sí que ocurre con los bits clásicos), sino probabilística. Eso significa que, dado un mismo cúbit, existe una cierta probabilidad de obtener tanto un 0 como un 1 al medirlo. El resultado final no está definido de antemano y no se puede predecir con total seguridad.

De nuevo, este fenómeno es una consecuencia directa de otros postulados de la disciplina. Estos nos dicen que, dado el estado de nuestro cúbit, definido en general por una superposición $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, la probabilidad de obtener un 0 al medirlo es $|\alpha|^2$ y, en ese caso, el cúbit pasará a

Fig. 1. Esquema que representa un átomo en superposición.

estar en el estado $|0\rangle$ (es decir, se convertirá en un bit clásico con valor 0, sin superposición alguna). Análogamente, la probabilidad de obtener un 1 al medirlo será $|\beta|^2$, dejando el cúbit en el estado $|1\rangle$ (de nuevo, un bit clásico sin superposición). Es decir, al medir un sistema cuántico (en nuestro caso, un cúbit), se destruye la superposición cuántica inicial. Y lo que es más importante: aunque tengamos un conocimiento perfecto, sin ignorancia, tanto del estado de la partícula como de la medida que se lleva a cabo, la teoría no nos permite más que hacer una predicción del futuro en términos de probabilidades.

Los ordenadores cuánticos

Una vez queda clara la diferencia entre bits cuánticos y clásicos, vale la pena visitar todos los usos que hacemos de la información y ver cómo se modifican bajo los fenómenos de la física cuántica. Uno de los usos más habituales es el cálculo y la resolución de problemas, una tarea que los ordenadores actuales realizan constantemente. Esto lleva de manera inmediata a la idea del ordenador cuántico. No hace falta revestir de excesivo misterio este concepto, que en el fondo es muy parecido al de ordenador clásico. Simplemente, donde los ordenadores convencionales procesan información codificada en bits clásicos, un ordenador cuántico lo hace en bits cuánticos. Y de manera análoga, se definen los algoritmos cuánticos, series de operaciones a ejecutar sobre cúbits de cara a resolver un problema.

La diferencia sin embargo radica en que este procesado se realiza usando los fenómenos de la física cuántica, sin análogo en nuestro mundo macroscópico clásico y que, por tanto, son inaccesibles a nuestros ordenadores actuales operando sobre bits clásicos. Es decir, el ordenador cuántico puede usar más operaciones, tiene a su disposición más herramientas para resolver problemas complejos y, por lo tanto, puede llegar a proporcionar soluciones a estos de manera mucho más eficiente. En este último caso, se produce la llamada ventaja computacional cuántica. Aunque hay situaciones en las que un ordenador cuántico no ofrece ninguna ventaja respecto a los ordenadores tradicionales, existen problemas para los que sí que es posible obtenerla. El ejemplo más paradigmático es el algoritmo de Shor [1]. Dado un número inicial, N , dicho algoritmo demostró cómo un ordenador cuántico permite encontrar dos factores, p y q , tales que su producto sea igual al número inicial, $N = p \times q$ (excluyendo la solución trivial definida por 1 y N), algo para lo que no existe algoritmo eficiente en un ordenador clásico. ¿Existen otros algoritmos más allá de Shor? La respuesta es afirmativa y distintos ejemplos han sido obtenidos en las últimas décadas.

De la existencia de ventajas computacionales cuánticas nace el gran empeño que se está poniendo

a nivel mundial por construir un ordenador cuántico con suficiente potencia (es decir, con la capacidad de procesar un gran número de cúbits) y sin que cometa errores. Pese a que el objetivo final aún dista de estar cerca, en los últimos años ya se han producido grandes progresos en esta dirección. En concreto, ya disponemos de ordenadores cuánticos en el régimen conocido como NISQ [2], por Noisy Intermediate-Scale Quantum. Se trata por tanto de ordenadores con algo de ruido, sin corrección de errores, y de un tamaño intermedio (centenares de cúbits). Estos ordenadores no son suficientes para factorizar grandes números, pero han dado lugar a experimentos de ventaja computacional cuántica [3], si bien solo en problemas de poca, por no decir nula, relevancia práctica. Al mismo tiempo se trabaja en la implementación de métodos de corrección errores para conseguir ordenadores sin ruido, habiéndose realizado considerables avances en los últimos años [4, 5]. Los plazos hacia la ventaja cuántica práctica, es decir, hacia la existencia de un ordenador capaz de resolver un problema de interés para la sociedad mejor que las máquinas clásicas actuales, se van acortando año a año.

Criptografía cuántica

Otra importante aplicación de la información más allá de la computación es la comunicación. Y un aspecto clave en las comunicaciones actuales es el de la privacidad: casi tan importante como el poder enviar información de un lugar a otro es el poder hacerlo de manera segura, sin que un posible espía o enemigo tenga acceso a los mensajes que se envían.

Ahora mismo, el campo de la criptografía clásica nos proporciona las herramientas para diseñar métodos de transmisión privada. Por lo general, estos métodos se basan en el concepto de complejidad computacional, es decir, en la dificultad de los ordenadores (clásicos) para encontrar la solución a algunos problemas matemáticos. Por ejemplo, actualmente los intercambios de información confidencial son seguros porque se basan en el algoritmo RSA [6], que explota la ausencia de un algoritmo eficiente para la factorización de grandes números. Sin embargo, el algoritmo de Shor demostró que un ordenador cuántico sí que sería capaz de factorizar de manera eficiente y, por tanto, romper RSA¹. Esto nos obligó a replantear la seguridad de los esquemas de encriptación actuales.

En este contexto, los bits cuánticos vuelven a abrir nuevas posibilidades para la encriptación de

¹ Es importante recordar que no hay prueba de que no haya un algoritmo eficiente de factorización en ordenadores clásicos, aunque su no existencia parece probable teniendo en cuenta los numerosos esfuerzos que se han llevado a cabo para encontrarlo, sin resultado.

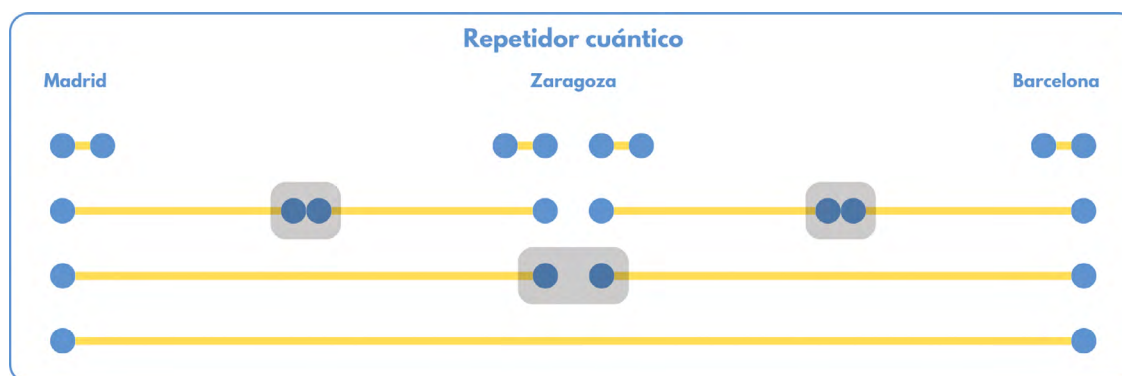


Fig. 2. Esquema de cómo un repetidor cuántico establecería entrelazamiento (línea amarilla) entre Madrid y Barcelona. El proceso va de arriba abajo: primero se empieza con 4 pares de partículas entrelazadas (círculos lilas). Luego, una partícula de cada par se envía a una estación intermedia donde se realiza una medida concreta, llamada medida de Bell (caja gris). Esto permite que el entrelazamiento se extienda, primero de Madrid a Zaragoza y, paralelamente, de Zaragoza a Barcelona y, repitiendo el procedimiento, de Barcelona hasta Madrid. En este [enlace](#) se puede consultar una versión más extendida de este ejemplo [13].

información y permiten el diseño de los llamados protocolos de criptografía cuántica. En esta disciplina, el tipo de seguridad proporcionado deja de lado la complejidad matemática y, en su lugar, se basa en las propias leyes de la física cuántica. La seguridad se convierte en algo fundamental e intrínseco al propio algoritmo de encriptación, independiente a los desarrollos en capacidad computacional que puedan llegar a ocurrir en el futuro.

El primer esquema de criptografía cuántica fue propuesto en 1984 por Charles Bennett y Gilles Brassard y se conoce como protocolo BB84 [7]. En él, dos partes honestas, llamadas generalmente Alice y Bob, se intercambian cúbits para establecer una clave secreta que luego será usada para enviar información de manera segura. Las acciones del enemigo, tradicionalmente llamado Eva, no pueden violar las leyes de la física cuántica. En particular, no pueden violar el teorema de no-clonación [8], según el cual la información cuántica no se puede copiar. Al no poder duplicar la información, Eva tendrá que medir los cúbits originales directamente, introduciendo un error en el canal que la hará detectable. Así, el cúbit perderá su superposición cuántica inicial, $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, y se transformará en un bit clásico, $|0\rangle$ o $|1\rangle$, en función del resultado obtenido. Esta pérdida de la superposición permite a los usuarios honestos darse cuenta de que alguien externo está escuchando y abortar la comunicación insegura a tiempo.

Yendo un paso más allá, los físicos ahora están trabajando en protocolos de criptografía cuántica que no solo se sostengan en el formalismo cuántico y no en la dificultad computacional, sino cuya seguridad tampoco dependa de las implementaciones en *hardware* real. Estos métodos “independientes de los dispositivos” [9] permiten, como su propio nombre indica, asegurar la comunicación sin realizar hipótesis sobre los equipos que se empleen para llevarla a cabo. La privacidad, en este caso, está garantizada por el comportamiento estadístico que obedecen.

Para ello, hacen uso de, quizás, la más exótica de las características cuánticas. En concreto, se amparan en el llamado entrelazamiento, un fenómeno que provoca que los estados cuánticos de dos o más partículas no estén definidos individual-

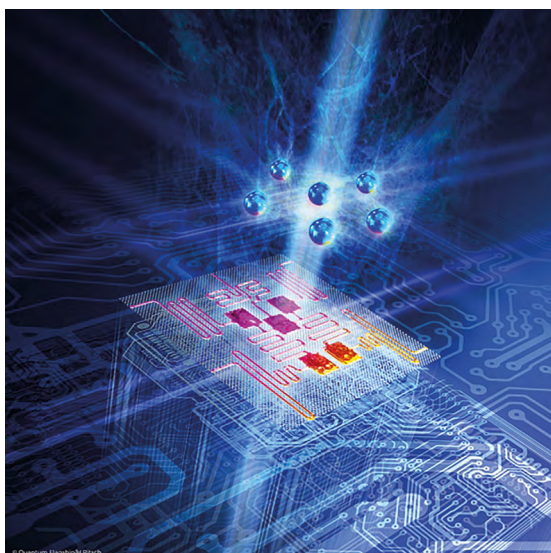
mente, sino tan solo de manera conjunta. Un estado entrelazado podría ser, por ejemplo, un estado de dos cúbits tal que, al medirlos, con un medio de probabilidad obtengamos 0 en el primero y 0 en el segundo, y con otro medio de probabilidad obtengamos 1 en el primero y 1 en el segundo (esto vendría dado por $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle_1|0\rangle_2 + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle_1|1\rangle_2$, donde el subíndice indica el cúbit al que nos referimos). Nótese que no se puede definir el estado cuántico de ninguno de los cúbits de manera individual; ambos están encapsulados en un único estado conjunto.

Los resultados al medir partículas entrelazadas presentan correlaciones que son imposibles de obtener en física clásica. Las correlaciones clásicas (como podrían ser dos dados trucados para que siempre salgan dobles) satisfacen una serie de condiciones, conocidas como desigualdades de Bell [10]. En cambio, los resultados de medidas realizadas en ciertos estados entrelazados las violan. Este tipo de tests de Bell son los que se usan en criptografía independiente a los dispositivos para probar la seguridad del protocolo. Si se supera la prueba, es decir, si las correlaciones son puramente cuánticas, significa que el estado ha permanecido entrelazado durante el protocolo y que, por lo tanto, Eva no ha interferido realizando una medida (una acción que destruiría la superposición cuántica y, por ende, el entrelazamiento). Si no se supera la prueba, no se puede asegurar que la comunicación sea segura y hay que buscar otra manera de enviar el mensaje.

Comunicación cuántica

Además de la privacidad, la cuántica también puede aplicarse a la comunicación por sí misma. Enviando bits cuánticos en vez de clásicos entre dos puntos cualesquiera del planeta se sustituye la comunicación clásica por la comunicación cuántica. Establecer comunicaciones cuánticas a largas distancias no es sencillo, justamente debido al teorema de no-clonación, que en este caso es una barrera a sortear. En comunicaciones clásicas, la señal que contiene el mensaje en bits que queremos transmitir se degrada rápidamente mientras viaja a través de una fibra óptica. Para que el mensaje llegue correctamente a su destino, la

Fig. 3. Representación artística de las operaciones con qubits (© Quantum Flagship/H).



señal se amplifica (es decir, se copia) a lo largo de su recorrido. Esta posibilidad, perfectamente lícita en comunicaciones clásicas, está en clara discrepancia con el teorema de no-clonación.

Por ello, la comunicación cuántica debe recurrir a otros métodos, como los llamados repetidores cuánticos [11], para poder enviar mensajes entre dos puntos lejanos. Estos repetidores cuánticos permiten entrelazar partículas por tramos pequeños (de modo que haya muy pocas pérdidas) hasta conseguir entrelazamiento entre dos puntos lejanos (véase la fig. 2), un recurso indispensable para que la comunicación cuántica se realice con éxito. Una vez establecido el entrelazamiento entre dos puntos lejanos, se puede usar esta propiedad cuántica para enviar mensajes y comunicarnos, por ejemplo, a través de la teleportación cuántica [12]. Estos métodos ya se están poniendo en práctica, con la esperanza de que, en un futuro, se pueda llegar a establecer un internet cuántico global, consiguiendo comunicación cuántica a grandes distancias.

Conclusiones

Esta breve introducción a la información cuántica puede resumirse en dos mensajes clave. El primero debería estar claro: la información es un concepto crucial en nuestra sociedad y la física cuántica nos proporciona nuevas herramientas para su procesamiento y transmisión. Este mensaje ya ha sido asimilado a escala mundial e importantes iniciativas e inversiones están llevándose a cabo por grandes y pequeñas empresas, así como entidades gubernamentales², para transformar ideas que pueden sonar un tanto futuristas de entrada, como el ordenador o el internet cuántico, en una realidad tangible y útil.

² En nuestro territorio, existe por ejemplo una iniciativa paneuropea en tecnologías cuánticas llamada [Quantum Flagship](#).

El segundo mensaje es una llamada a un optimismo cauteloso o una cautela optimista. Preparar, manipular, almacenar y transmitir cúbits es mucho más complicado que hacer lo propio con bits clásicos. Si el bit cuántico deja de estar en una superposición, se convierte en un bit clásico que solo toma los valores cero o uno, perdiéndose cualquier ventaja cuántica. Pero mantener las superposiciones es una tarea compleja, dado que no solo las medidas intencionadas, sino también el ruido y las interacciones no controladas con el entorno las destruyen. Es un comportamiento parecido al que, según nos solían contar nuestros padres, los reyes magos siguen la víspera del 6 de enero: si te quedas durmiendo y no sales de tu habitación, la magia de los reyes se mantiene intacta y te levantarás con tus regalos más deseados; pero si te pica la curiosidad y decides espiarlos, o incluso si por accidente los pillas in fraganti, la magia desaparecerá y te quedarás sin nada. Esta fragilidad de los efectos cuánticos, la misma que permite detectar cuando alguien nos está espiando durante una comunicación secreta, es también uno de los mayores escollos para el desarrollo de las tecnologías de la información cuántica.

En resumen, si queremos que los cúbits sigan siendo cúbits, es necesario prepararlos y procesarlos en un entorno aislado del exterior (por ejemplo, a muy baja temperatura) y que se pueda manipular de manera controlada (ver fig. 3). Aquí reside el gran desafío tecnológico. Esto explica por qué, a pesar de años de esfuerzo, los ordenadores cuánticos o esquemas de comunicación cuántica existentes presentan todavía importantes desafíos que limitan su implementación práctica. El camino no es sencillo y está lleno de obstáculos. Pero la motivación y objetivo final están claros y existen distintos resultados que demuestran que las tecnologías de la información cuántica permitirán resolver problemas que en la actualidad limitan nuestro progreso y bienestar como sociedad.

Referencias

- [1] P. W. SHOR, Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring, *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science* (Santa Fe, NM, EE. UU.), p. 124, 1994.
- [2] J. PRESKILL, Quantum Computing in the NISQ Era and Beyond, *Quantum* **2**, 79 (2018).
- [3] F. ARUTE *et al.*, Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor, *Nature* **574**, 505 (2019).
- [4] R. ACHARYA *et al.*, Suppressing Quantum Errors by Scaling a Surface Code Logical Qubit, *Nature* **614** (7949), 676 (2023).
- [5] D. BLVSTEIN *et al.*, Logical Quantum Processor Based on Reconfigurable Atom Arrays, *Nature* **626**, 58 (2024).

- [6] R. RIVEST, A. SHAMIR y L. ADLEMAN, A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems, *Communications of the ACM* **21**, 120 (1978).
- [7] C. H. BENNETT y G. BRASSARD, Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing, *Proceedings of the International Conference on Computers, Systems & Signal Processing* (Bangalore, India) vol. 1, p. 175 (1984).
- [8] W. WOOTTERS y W. H. ZUREK, A Single Quantum Cannot be Cloned, *Nature* **299**, 802 (1982).
- [9] A. ACÍN *et al.*, Device-independent Security of Quantum Cryptography against Collective Attacks, *Physical Review Letters* **98**, 230501 (2007).
- [10] J. S. BELL, On the Einstein Podolsky Rosen Paradox, *Physics Physique Fizika* **1**, 195 (1964).
- [11] H. J. BRIEGEL, W. DÜR, J. I. CIRAC y P. ZOLLER, Quantum Repeaters: The Role of Imperfect Local Operations in Quantum Communication, *Physical Review Letters* **81**, 5932 (1998).
- [12] C. H. BENNETT, G. BRASSARD, C. CRÉPAU, R. JOZSA, A. PERES y W. K. WOOTTERS, Teleporting an unknown Quantum State Via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels, *Physical Review Letters* **70**, 1895 (1993).
- [13] ICFO, <https://www.youtube.com/watch?v=FKv5xWAZKdg> (diciembre 2024).

Laia Serradesanferm Córdoba

Escritora científica en el ICFO.
Science Communication, ICFO-
Instituto de Ciencias Fotónicas,
Barcelona



Antonio Acín Dal Maschio

Profesor ICREA en el ICFO-Instituto
de Ciencias Fotónicas, Barcelona



¿te gusta investigar?

ATI

La solución adecuada a cada instalación

Suministro de equipamiento para investigación

* alimentación HV-LV * crates de alimentación * racks * electrónica de control y adquisición * espectroscopia * detectores (silicio, HPGe, centelleadores, Cd/Zn/Te...) * cables y accesorios * gestión de adquisiciones

info@atisistemas.com