

EL HARDWARE CUÁNTICO: qubits naturales y artificiales*

Palabras clave: computación cuántica, qubits, iones atrapados, transmon, fluxonium, decoherencia.

Keywords: quantum computing, qubits, trapped ions, transmon, fluxonium, decoherence.

Resumen: La construcción de una computadora cuántica requiere identificar sistemas físicos capaces de almacenar y procesar información cuántica de manera controlada. En este artículo se analiza el problema del hardware cuántico desde una perspectiva conceptual, distinguiendo entre qubits naturales —basados en grados de libertad ya presentes en sistemas atómicos, moleculares o fotónicos— y qubits artificiales, diseñados e implementados en plataformas de estado sólido como circuitos superconductores o puntos cuánticos. Como marco orientador se discuten los criterios propuestos en 1996 por David DiVincenzo, que establecen requisitos físicos mínimos para la realización de un procesador cuántico en el modelo de circuitos. Se examinan aspectos como la escalabilidad exponencial del espacio de estados cuánticos, la preparación de estados iniciales puros, el aislamiento frente al entorno, la implementación controlada de transformaciones unitarias y la medición confiable del estado cuántico. Asimismo, se mencionan brevemente modelos alternativos de computación cuántica —como la computación adiabática y la basada en la medición— que imponen requisitos parcialmente diferentes. El objetivo es ofrecer una visión integrada del desafío experimental actual, subrayando las tensiones entre control, aislamiento y escalabilidad que definen el desarrollo del hardware cuántico contemporáneo.

■ **Schmiegelow, Christian T^{1,2*};
Cormick, Cecilia³;
Tosi, Leandro⁴**

¹ Universidad de Buenos Aires, FCEyN, Departamento de Física. CABA, Argentina.

² CONICET-Universidad de Buenos Aires, IFIBA, CABA, Argentina.

³ Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

⁴ Grupo de Circuitos Cuánticos Bariloche, CAB-CNEA, CONICET, Instituto Balseiro, Bariloche, Argentina.

*E-mail: schmiegelow@df.uba.ar

Quantum Hardware: Natural and Artificial Qubits

Abstract: Building a quantum computer requires identifying physical systems capable of reliably storing and processing quantum information. This article examines quantum hardware from a conceptual perspective, distinguishing between natural qubits—based on intrinsic degrees of freedom of atoms, molecules, or photons—and artificial qubits engineered in solid-state platforms such as superconducting circuits or quantum dots. As a guiding framework, we discuss the criteria proposed in 1996 by David DiVincenzo, which outline the essential physical requirements for implementing a quantum processor within the circuit model. Key issues include the exponential growth of Hilbert space dimension, the preparation of well-defined pure initial states, isolation from environmental noise, the controlled implementation of unitary transformations, and reliable quantum measurements. Alternative models of quantum computation—such as adiabatic and measurement-based approaches—are briefly addressed, highlighting how different paradigms impose distinct physical demands. The aim is to provide an integrated overview of current experimental challenges, emphasizing the fundamental trade-offs between control, isolation, and scalability that shape the development of contemporary quantum hardware.

■ INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la computación cuántica ha evolucionado desde una propuesta teórica hacia un campo experimental de intensa actividad. Sin embargo, más allá de los algoritmos y de las promesas de ventaja exponencial, el desafío central sigue siendo físico: construir sistemas capaces de almacenar y manipular información cuántica de manera controlada. Este problema, conocido como el del hardware

cuántico, exige identificar plataformas experimentales que satisfagan una serie de requisitos fundamentales.

En 1996, dos años después de la aparición del algoritmo de Shor, el físico teórico David DiVincenzo formuló cinco criterios destinados a evaluar si una determinada plataforma física podría convertirse en un procesador cuántico. Estos requisitos se transformaron en una guía orientadora para buena parte de la

investigación en hardware cuántico dentro del llamado modelo de circuitos, la estrategia original y más difundida para realizar cómputos cuánticos.

En el modelo de circuitos, un algoritmo cuántico consiste esencialmente en: i) la preparación de un estado inicial simple; ii) una secuencia de transformaciones del estado cuántico mediante operaciones llamadas compuertas, que actúan sobre uno o dos subsistemas por vez;

* N. del E.: A pedido de los autores se reemplazó el artículo original publicado por la presente versión en la cual se modificó el texto bajo el título "A modo de cierre".

y iii) la medición final del estado resultante.

Desde entonces se han desarrollado otros dos modelos de computación cuántica, equivalentes en capacidad de cómputo al modelo de circuitos: la computación cuántica adiabática y la computación basada en la medición. Más allá del interés teórico de formular un mismo cómputo de distintas maneras, cada modelo impone requisitos físicos parcialmente distintos, por lo que ciertas plataformas experimentales pueden resultar más adecuadas para uno que para otro.

En la computación cuántica adiabática, el cómputo se realiza mediante una evolución unitaria suave y progresiva del sistema, en lugar de una secuencia discreta de compuertas. La computación basada en la medición, en cambio, parte de un estado inicial altamente entrelazado y procede mediante mediciones locales sucesivas. Cada medición produce un resultado aleatorio, pero la elección de la medición y el resultado obtenido determinan la evolución del resto del registro cuántico, de modo que el cómputo completo emerge de la concatenación apropiada de estas mediciones.

A continuación se discuten los criterios propuestos por DiVincenzo, procurando respetar su formulación original, aunque señalando en qué medida deben adaptarse cuando se consideran modelos alternativos de computación cuántica.

■ CRITERIOS DE DIVINCENZO

1. EL SISTEMA DEBE ESTAR BIEN CARACTERIZADO Y SU DIMENSIÓN DEBE CRECER EXPONENCIALMENTE

La información cuántica debe ser almacenada y procesada en algún sistema físico. El primer criterio esta-

blece que dicho sistema debe estar bien caracterizado y que la dimensión de su espacio de estados debe crecer exponencialmente al agregar nuevos componentes.

En primer lugar, se trata necesariamente de un sistema cuya evolución esté gobernada por las leyes de la mecánica cuántica y que admita estados de superposición. Pero además, el espacio de estados debe conocerse con precisión. No importa si se trata de qubits (sistemas de dimensión 2), qutrits (dimensión 3) u otros sistemas de dimensión mayor; lo esencial es saber con qué tipo de portadores de información se cuenta. No resulta aceptable disponer de una mezcla mal caracterizada de distintos tipos de sistemas, ni desconocer el número efectivo de elementos que componen el procesador.

Este requisito se vincula con la posibilidad de escalar el sistema. La dimensión del espacio de estados está determinada por el número de estados distinguibles entre sí mediante mediciones ideales; no debe confundirse con la cantidad infinita de estados cuánticos posibles. Equivalentemente, puede entenderse como la cantidad de estados clásicos mutuamente excluyentes que sirven de base para construir superposiciones.

Si cada elemento del procesador es un sistema de dimensión d y se dispone de N elementos del mismo tipo, la dimensión del sistema compuesto crece como d^N . Este crecimiento exponencial es el que permite, al menos en principio, aspirar a una ventaja exponencial de cómputo frente a dispositivos clásicos.

2. DEBE SER POSIBLE PREPARAR UN ESTADO INICIAL BIEN DEFINIDO

El segundo criterio exige la posibilidad de preparar el sistema en un

estado inicial conocido y reproducible. No basta con que el estado sea siempre el mismo en promedio; debe tratarse de un estado cuántico lo más puro posible.

Por ejemplo, un estado térmico corresponde a una mezcla estadística de distintos estados energéticos, con probabilidades determinadas por la temperatura. En cambio, en un registro de N qubits, un estado inicial adecuado podría consistir en preparar todos los qubits en el estado asociado al valor lógico 0. Aunque la dificultad experimental de esta preparación depende de la plataforma considerada, este requisito suele ser más accesible que otros asociados al control dinámico o al aislamiento.

3. EL SISTEMA DEBE ESTAR SUFICIENTEMENTE AISLADO DE SU ENTORNO

Durante el cómputo, los estados cuánticos deben preservarse el tiempo suficiente para que las operaciones previstas puedan completarse. Si un elemento del procesador interactúa de manera no controlada con el entorno, su estado puede alterarse y convertirse en fuente de error.

Una consecuencia típica de estas interacciones es el entrelazamiento no deseado entre el sistema y su ambiente. Por ejemplo, cuando un átomo decae espontáneamente emitiendo un fotón, el estado conjunto átomo-campo queda correlacionado. Desde la perspectiva del sistema de interés, este proceso conduce a la llamada decoherencia, es decir, a la degradación de las propiedades cuánticas debida a la acción del entorno.

Cuando DiVincenzo formuló sus criterios, el nivel de error tolerable era aún incierto. Desde entonces se han desarrollado diversas estrategias para enfrentar este problema: códi-

gos de corrección cuántica de errores, subespacios casi libres de decoherencia y técnicas de mitigación y modelado de ruido. También se han propuesto qubits topológicos, que en principio podrían ser intrínsecamente más robustos frente a ciertas perturbaciones. A pesar de estos avances, el control del ruido ambiental continúa siendo uno de los principales desafíos, en particular en las plataformas de estado sólido que implementan lo que aquí denominamos qubits artificiales.

4. DEBE SER POSIBLE IMPLEMENTAR TRANSFORMACIONES UNITARIAS CONTROLADAS

En el modelo de circuitos, el cómputo se realiza mediante una secuencia de transformaciones unitarias aplicadas al registro cuántico. Por lo tanto, la plataforma física debe permitir la implementación controlada de compuertas que actúen sobre uno o dos subsistemas por vez.

Para explotar el crecimiento exponencial del espacio de estados, las compuertas de dos qubits deben ser capaces de generar entrelazamiento. Existen distintos conjuntos de compuertas universales, en el sentido de que combinaciones apropiadas de ellas permiten aproximar cualquier evolución unitaria del sistema completo.

En la práctica, las compuertas de un solo qubit suelen ser relativamente sencillas de implementar, mientras que las interacciones entre subsistemas representan con frecuencia la principal fuente de error. Nuevamente, la cuestión del umbral de errores tolerables resulta central para determinar la viabilidad de una plataforma dada.

5. DEBE SER POSIBLE REALIZAR MEDICIONES DEL ESTADO DEL SISTEMA

Finalmente, una vez ejecutado el algoritmo, es necesario extraer información del sistema mediante mediciones. Estas deben determinar el resultado clásico correspondiente y dejar el registro en un estado consistente con el valor observado, de acuerdo con la regla de Born.

En la descripción tradicional del modelo de circuitos, la medición completa se realiza al final del cómputo, lo que evita la propagación de errores hacia etapas posteriores. Sin embargo, muchos esquemas de corrección de errores requieren mediciones intermedias, cuyos errores sí pueden afectar pasos subsiguientes. En general, un proceso de medición imperfecto puede modelarse como una medición ideal precedida por errores en la memoria o en las compuertas, lo que permite integrar su análisis dentro del marco general de estudio del ruido.

■ QUBITS NATURALES

Un **qubit** es una representación abstracta de un sistema físico que posee dos estados distinguibles de manera inequívoca. De forma análoga, un **qutrit** corresponde a un sistema con tres estados, se ha introducido **ququart** para cuatro estados, y en general un **qudit** refiere a un sistema con d estados. Pero, ¿qué son exactamente estos estados? La naturaleza nos ofrece múltiples sistemas físicos con una gran variedad de posibles estados que podemos aprovechar. Por ejemplo, dentro de un átomo, uno de sus electrones puede encontrarse en distintos orbitales. O una molécula puede hallarse en diferentes estados de vibración o rotación. De este modo, en un solo átomo o molécula es posible definir un qubit: basta con seleccionar, entre todos sus posibles estados, un par que resulte conveniente.

Los **qubits atómicos** han sido especialmente populares y exitosos en sus distintas realizaciones. Un átomo presenta muchísimas variables que podrían servir como qubits: la velocidad y posición del núcleo, las de cada electrón, o incluso los espines tanto nucleares como electrónicos. La configuración más habitual consiste en codificar el qubit en dos estados electrónicos; es decir, en dos configuraciones distintas de uno de los electrones del átomo. En el lenguaje de los orbitales de Bohr, se trataría de dos órbitas diferentes. Así, el qubit adopta el valor 0 o 1 según se encuentre en una u otra órbita, o, en otras palabras, según posea una u otra energía.

Para contar con un “buen” qubit, es necesario elegir un par de estados que sean estables y controlables. Esto significa que deben estar lo suficientemente aislados del entorno como para conservar la información durante un tiempo relevante, pero, al mismo tiempo, ser susceptibles de manipulación externa para realizar las operaciones lógicas necesarias.

Para empezar, es común elegir **átomos hidrogenoides**. Es decir, átomos que poseen capas electrónicas cerradas y un único electrón en la capa de valencia. Quienes utilizan átomos neutros como plataforma suelen optar por **átomos alcalinos**, que ya son de por sí hidrogenoides. Por otro lado, quienes trabajan con átomos ionizados suelen emplear **átomos alcalinotérreos**, que al ser ionizados una sola vez quedan con un único electrón de valencia, adoptando así la configuración de un átomo hidrogenoide. Estas elecciones simplifican enormemente la estructura atómica y permiten seleccionar y controlar con mayor facilidad un par de estados. Con un solo electrón, los tres qubits más utilizados reciben los nombres de **magnético**, **reloj** y **óptico**. Cada uno presenta ventajas y desafíos propios.

El **qubit magnético**, por ejemplo, se define en los dos estados de espín del electrón en su estado fundamental. Estos estados tienen tiempos de vida extremadamente largos (de horas o incluso días) y son fáciles de controlar tanto con ondas de radio como con láseres. Su principal dificultad radica en que son muy sensibles a fluctuaciones magnéticas, lo que provoca la pérdida de una propiedad denominada coherencia cuántica. Para mitigar este problema, se aplican diversas técnicas de aislamiento y protocolos en **subespacios libres de decoherencia**, lo que permite alcanzar tiempos de coherencia de hasta varios segundos.

El **qubit reloj** también se basa en estados de espín del electrón, pero en átomos cuyo núcleo posee espín. En este caso existen ciertos estados —todavía dentro del subespacio fundamental— que son prácticamente insensibles a los campos magnéticos. Es decir, combinan la larga vida característica de los estados fundamentales, con una gran coherencia. Su nombre proviene de que justamente estos estados se emplean como referencia de frecuencia en los relojes atómicos, como el famoso reloj de cesio-133, o en la nueva generación de **relojes atómico-ópticos**. La dificultad de este tipo de qubits es que, al trabajar con átomos cuyo núcleo tiene espín, la estructura de niveles se vuelve mucho más compleja y el control de todas las operaciones necesarias resulta más difícil. Sin embargo, el progreso del campo ha superado estas limitaciones, y hoy en día los qubits reloj se cuentan entre los más exitosos.

El **qubit óptico**, o **metaestable**, se define propiamente en dos estados orbitales distintos del electrón de valencia. A diferencia de los dos anteriores —donde el qubit se construye con los dos posibles espines de un electrón en un mismo orbital—, en

este caso los estados electrónicos son diferentes: uno fundamental y otro excitado. Para ello, el estado excitado debe ser **metaestable**, es decir, con una vida media suficientemente larga en comparación con el tiempo requerido para las operaciones y el cómputo. En condiciones normales, casi todos los estados excitados decaen en unos pocos nanosegundos, ya que están conectados con niveles inferiores mediante transiciones dipolares eléctricas. Sin embargo, existen algunos átomos con estados metaestables de vidas medias mucho más prolongadas, desde milisegundos hasta segundos o incluso minutos. Ejemplos emblemáticos son los iones de calcio, bario e iterbio. Estos estados han sido empleados como qubits en las primeras generaciones de computadoras cuánticas y también en aplicaciones como relojes atómico-ópticos, gravímetros y experimentos de física fundamental más allá del modelo estándar.

Existe una **infinidad de sistemas naturales** que presentan niveles discretizados de energía y que pueden aprovecharse en diversas aplicaciones de la computación y de otras tecnologías cuánticas. En prácticamente todos ellos, un electrón queda confinado en una región del espacio por la acción de otras cargas eléctricas, lo que genera niveles discretos de energía que luego pueden manipularse mediante ondas electromagnéticas. Desde átomos y moléculas, hasta los llamados centros de color en sólidos cristalinos, se han identificado y desarrollado sistemas cuánticos controlables en múltiples escalas. Tal vez uno de los más conocidos —por su enorme popularidad— merezca una breve discusión: los **centros de vacancia de nitrógeno** en diamante.

Los **centros de vacancia de nitrógeno** (en inglés, *NV centers*) en diamante constituyen un sistema

cuántico particular que surge de la interacción entre un átomo y la red cristalina que lo rodea. En este caso, la red cristalina es la del carbono en su configuración de diamante. Allí, dos sitios de la red se modifican: en uno se sustituye un átomo de carbono por uno de nitrógeno, y en el sitio vecino queda un hueco, es decir, la ausencia de átomo. Debido a la naturaleza del nitrógeno, uno de sus electrones interactúa con los orbitales de los átomos circundantes, formando un sistema atómico efectivo.

Este tipo de configuraciones no es exclusivo del diamante: aparecen en muchos cristales transparentes y reciben el nombre de **centros de color**, ya que confieren color o tinte al material al permitir la absorción y emisión de energía entre distintos estados electrónicos de ese centro. Lo particular del centro NV en diamante es que los estados que constituyen su nivel fundamental están lo suficientemente desacoplados del entorno cristalino como para preservar su coherencia durante varios microsegundos, incluso a temperatura ambiente.

Gracias a estas propiedades, los centros NV han encontrado numerosas aplicaciones y llegaron a ser protagonistas de un hito histórico: la primera verificación experimental de la **desigualdad de Bell libre de loopholes** tanto de causalidad como estadísticas.

■ IONES Y ÁTOMOS DE A UNO

Uno de los grandes desarrollos que transformaron el mundo de lo posible en el régimen cuántico fue el **control individual de átomos, electrones y moléculas**. Poder manipular estas partículas una por una no era en absoluto evidente cuando se formuló la mecánica cuántica a principios del siglo XX. Sin embargo, hacia fines de ese siglo ya exis-

tían diversas técnicas que permitían **enfriar, atrapar y controlar átomos individualmente**.

Para atrapar y controlar un átomo es crucial contar con un método de **enfriamiento**, que reduzca o detenga su movimiento. Imaginemos un átomo libre, a temperatura ambiente, formando parte de un gas: se mueve a velocidades de cientos de kilómetros por hora, lo que hace prácticamente imposible confinarlo en una región pequeña del espacio para manipularlo. Durante los años '80, el avance de los láseres y de la electrónica condujo al desarrollo de varias técnicas conocidas como **enfriamiento láser**, que permiten reducir la temperatura de los átomos hasta cercanías del cero absoluto, dejándolos prácticamente inmóviles. La idea básica consiste en ajustar los láseres de manera que los átomos solo absorban fotones cuando, al hacerlo, entreguen parte de su

energía cinética. Así, cuando el átomo reemite, lo hace con un fotón de mayor energía, y en consecuencia se enfría.

Las técnicas de enfriamiento láser permiten alcanzar temperaturas del orden de los **mili, micro o incluso nanokelvin**. En esas condiciones, los átomos quedan detenidos en su estado fundamental de movimiento. Este es un primer paso indispensable para poder controlar con precisión tanto su posición como su velocidad, y al mismo tiempo resulta esencial para manipular con exactitud sus estados internos, ya que elimina casi por completo la incertidumbre que introduce el movimiento por efecto Doppler en el control y la medición de las energías de transición.

Además del enfriamiento, se requiere un **mecanismo de confinamiento** que permita atrapar una cantidad controlada de átomos en

una región del espacio. Para partículas cargadas, como iones o electrones, se utilizan **trampas electromagnéticas**, como la de Paul o la de Penning. Para partículas sin carga eléctrica, como los átomos neutros, la técnica más extendida es la de las **pinzas ópticas**.

Una **trampa electromagnética** es un conjunto de electrodos que permiten confinar partículas cargadas en una región del espacio mediante campos eléctricos y magnéticos. La más utilizada hoy en día en experimentos con iones es la **trampa de Paul**, que emplea un cuadrupolo eléctrico oscilante para generar un potencial efectivo en una zona del espacio, permitiendo atrapar las partículas cargadas. Al confinar más de un ion, estos se organizan en **cristales de Coulomb**, cuyas formas dependen de la geometría de los electrodos y de los potenciales aplicados. Por ejemplo, en una trampa

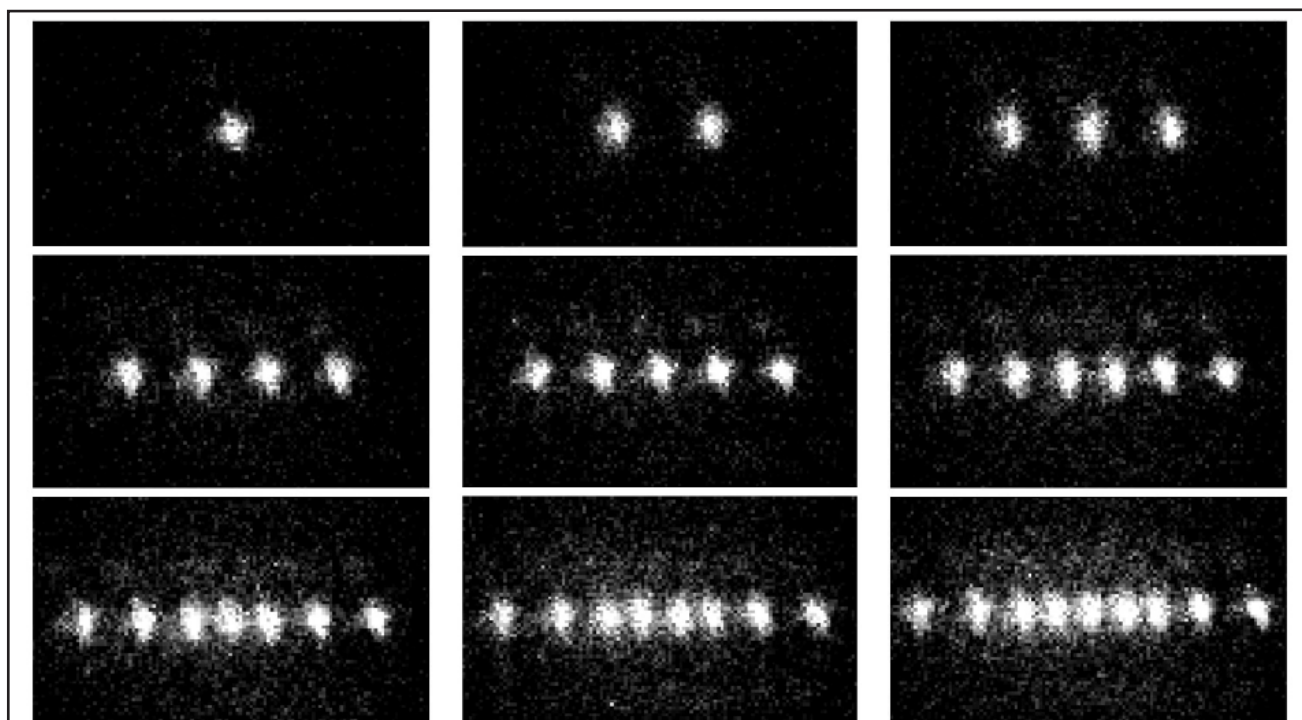


Figura 1. Secuencia de fotos captadas en una cámara CCD de la fluorescencia de iones atrapados uno a uno en las trampas electromagnéticas del LIAF, de la UBA.

anular, de dos a catorce iones pueden organizarse en estructuras bidimensionales tipo “panqueque”, mientras que en una trampa lineal forman cadenas, zigzags u otras configuraciones más complejas.

Las imágenes de la **Figura 1** muestran, en todos los casos, la **fluorescencia de iones de calcio**, excitados por un láser resonante en una de sus transiciones atómicas. La separación típica entre iones es de unos pocos micrómetros y sus temperaturas están por debajo de un microkelvin. Las imágenes fueron tomadas en el Laboratorio de Iones y Átomos Fríos (LIAF) de la FCEyN, Universidad de Buenos Aires.

Estos experimentos se llevan a cabo en el interior de **cámaras de vacío**, evacuadas hasta presiones inferiores a 10^{-11} milibar, para evitar que colisiones con átomos de fondo afecten a los iones atrapados. La carga de iones se realiza de manera estocástica, mediante el calentamiento de un crisol y la foto-ionización de los átomos neutros. Controlando la velocidad de este proceso, es posible detener la carga en el momento deseado o descartar iones hasta obtener la cantidad requerida.

En el caso de **átomos neutros**, la técnica más popular es la de las **pinzas ópticas**. Estas funcionan gracias al confinamiento que produce un láser fuertemente enfocado sobre un átomo cuando su frecuencia está desintonizada respecto de una transición atómica. Si el láser tiene menor energía que la transición, el átomo experimenta una fuerza atractiva hacia la región de mayor intensidad, quedando atrapado en el foco. Como estas fuerzas son mucho más débiles que las que actúan sobre partículas cargadas, resulta más difícil cargar y operar estas trampas. Sin embargo, ofrecen una gran versatilidad: permiten reconfigurar di-

námicamente la disposición de los átomos en el espacio, generando múltiples focos mediante técnicas holográficas. Durante muchos años, esta estrategia fue más compleja y quedó relegada frente a las trampas de iones. No obstante, en los últimos tiempos ha mostrado ser igual de poderosa, o incluso más. Tanto es así que, hacia 2025, el **récord de volumen cuántico** en un cómputo lo mantiene un dispositivo basado en átomos neutros atrapados.

■ PREPARACIÓN DE QUBITS ATÓMICOS

Una vez que contamos con uno o varios **iones atrapados**, llega el momento de empezar a hacer algo interesante con ellos. Los “soportes” ya están: ahora hay que **controlarlos**. Según el **criterio 2 de DiVincenzo**, debemos ser capaces de preparar los estados elegidos. La técnica más utilizada para ello es el **bombeo óptico**.

Para ilustrar cómo funciona este método de preparación de estados, consideremos un ejemplo sencillo. Tomemos como sistema un **qubit magnético**, es decir, el estado de espín del electrón fundamental en un átomo hidrogenoide. En este caso, el espín puede tomar dos valores, “arriba” o “abajo”, que asignaremos a los estados 0 y 1 del qubit. Para definir de manera precisa qué significa arriba y abajo, se aplica un **campo magnético externo** que fija una dirección en el espacio. Este campo, además, determina la separación en energía entre los dos niveles. Después del atrapado y enfriamiento de los átomos, y una vez apagados los láseres de enfriamiento, el electrón decae aleatoriamente a uno de los dos estados de espín. El objetivo de la preparación del estado inicial es forzar controladamente al electrón a ocupar uno de estos estados de manera inequívoca, y no dejarlo al

azar. Para lograrlo, se utiliza un **láser polarizado circularmente**, propagándose en la misma dirección que el campo magnético. Este láser induce transiciones en las que el espín solo puede aumentar. Si el electrón ya está en el estado de máximo espín, el láser no tiene efecto. En cambio, si está en el estado de mínimo espín, el átomo absorberá y emitirá fotones repetidamente, hasta decaer espontáneamente al estado de máximo espín. Una vez allí, el sistema queda “bloqueado”, sin posibilidad de seguir excitándose. De este modo, tras unos pocos ciclos de absorción y emisión, el átomo queda preparado en un estado fundamental bien definido. Con ello se logra la preparación confiable del estado inicial del qubit.

■ COMPUERTAS LÓGICAS

Una vez que uno preparó los estados iniciales, debe poder hacer las operaciones unitarias que constituyan el cálculo requerido. Estas pueden separarse en dos: las de un solo qubit y las de interacción entre qubits. Las primeras son relativamente sencillas y pueden realizarse con gran fidelidad, mientras que las segundas requieren de ingenio y son aún fuente de constante desarrollo.

Para realizar una evolución unitaria de un único qubit, no hace falta más que incidir sobre el átomo con radiación electromagnética sintonizada en la transición adecuada. Si es un qubit magnético, será una onda de radio; si es un qubit reloj, será una onda en el espectro de las microondas; si es un qubit óptico, será un láser. En cualquier caso, el control de la intensidad, la sintonía y la fase de la onda permite implementar cualquier compuerta unitaria de un qubit. Adicionalmente, es necesario poder hacer estas operaciones sobre cada átomo de manera independiente. Para eso, las técnicas

de radiofrecuencia y microondas no suelen ser las más convenientes, ya que estas ondas no pueden enfocarse átomo por átomo. Para resolver esta dificultad existen dos alternativas populares: una es utilizar gradientes de campos que desentonan los qubits y permiten así direccionar el control mediante la sintonía de la onda; la otra consiste en realizar transiciones entre estos niveles de baja energía mediante un proceso Raman estimulado, en el cual se utiliza un par de láseres que están desintonizados entre sí por exactamente la frecuencia del qubit. Este conjunto de técnicas permite hoy en día realizar operaciones de un qubit con fidelidades mejores que una parte en 10^5 .

Hacer interactuar átomos o iones entre sí de manera controlada, de modo de generar una evolución unitaria conjunta, es un desafío más complejo. Tanto en el mundo de los iones como en el de los átomos existe una técnica favorita. Para entender la dificultad, hay que recordar que la extensión de un átomo es del orden de un ångström (esto es, 0,1 nanómetro), mientras que la separación típica entre dos átomos o iones en las trampas es de aproximadamente un micrón (1.000 nanómetros). Es decir, en ambos casos, los átomos y los iones están separados entre sí más de 10.000 veces su tamaño. Esto hace que sea prácticamente imposible que uno de ellos sienta la presencia del otro de manera directa; a estas distancias, la interacción natural entre dos átomos es muy débil. La idea de cómo hacer una compuerta entre iones consiste en notar que los iones están atrapados en un potencial conjunto. Su carga eléctrica hace que la posición o el movimiento de uno afecte al del otro. Es decir, a pesar de estar lejos y de que el estado electrónico de uno no influya de manera significativa sobre el del otro, el estado

de movimiento del centro de masa de cada uno sí está fuertemente acoplado al del resto. Así, uno puede pensar en el movimiento conjunto de estos iones como un canal de información para comunicar su estado electrónico. Para hacer una compuerta controlada entre iones, se acopla el estado electrónico con el de movimiento, y así se transmite la información de uno a otro. El protocolo suele comenzar enfriando ambos iones al estado fundamental de movimiento. Luego, se aplica un pulso de luz sobre uno de los iones que transfiere su estado electrónico al de movimiento. Si el átomo estaba en 0, entonces no pasa nada; si estaba en 1, entonces comienza a moverse. Al moverse, arrastra también al otro. Después se aplica un pulso sobre el segundo átomo, que lo llevará a cambiar de estado sólo si estaba en movimiento, y a no hacerlo en caso contrario. Finalmente, se invierte el primer paso para devolver a los iones a su estado de reposo. Este protocolo es una compuerta CNOT (NOT controlada), donde el estado del segundo qubit cambia dependiendo del primero.

La compuerta que acabamos de describir es una versión simplificada de las que se utilizan en la práctica. En los últimos 30 años se han desarrollado diversos algoritmos que mejoran la fidelidad de estas compuertas, llegando a precisiones por debajo de una parte en 10^4 para compuertas entre un par de iones. Sin embargo, realizar esas operaciones de modo controlado y repetible para muchos iones requiere de un control detallado que todavía es difícil de conseguir.

En el campo de los átomos neutros, la técnica estrella para hacer que átomos distantes interactúen lleva el nombre de **compuerta de Rydberg**. Esta consiste en excitar al electrón de valencia a un orbital altamente

excitado, con números cuánticos principales entre 30 y 50. Este electrón tiene entonces un radio orbital mucho mayor, que puede acercarse al micrón y así sentir a otro átomo en la cercanía. La dificultad de este método es que el átomo también se vuelve sensible a cualquier campo externo, y por muchos años fue un gran desafío superar fidelidades del 95 %. Sin embargo, el desarrollo de la técnica ha llevado en los últimos diez años a que estas compuertas logren fidelidades comparables a las obtenidas con iones.

■ DETECCIÓN DE QUBITS ATÓMICOS

La última de las tareas fundamentales en la computación cuántica con átomos o iones es la **medición del estado de los qubits**. En este caso, la técnica más utilizada es la **fluorescencia dependiente del estado**. La idea básica es simple: si el átomo o ion se encuentra en uno de los dos estados que definen el qubit, responderá a un láser resonante emitiendo muchos fotones que pueden ser detectados; si está en el otro estado, permanecerá en silencio. Así, el problema de distinguir entre los estados 0 y 1 se traduce en observar la presencia o ausencia de fluorescencia.

Sin embargo, en muchos sistemas atómicos los dos estados del qubit tienen la misma respuesta óptica y fluorescen igual. Para resolver esto se recurre a un procedimiento llamado **shelving** (que podríamos traducir como cajoneo, ya que la palabra “estanteo” no existe en castellano). El esquema funciona de la siguiente manera: se elige un **estado auxiliar**, típicamente un estado electrónico de vida larga que no fluoresce bajo la acción del láser de detección. Antes de medir, se aplica una secuencia que transfiere uno de los estados del qubit (por ejemplo, el $|1\rangle$) a este

estado auxiliar. Entonces, cuando se ilumina el átomo con el láser de detección, solo el otro estado del qubit (el $|0\rangle$) produce fluorescencia. De esta forma, la fluorescencia observada indica inequívocamente que el qubit estaba en $|0\rangle$, mientras que la ausencia de fluorescencia corresponde a que estaba en $|1\rangle$. Como la emisión de cada ion o átomo puede producir cientos o miles de fotones, la señal es muy robusta y puede detectarse con eficiencias cercanas al 100 %. Este mecanismo ha convertido a la fluorescencia dependiente del estado en la técnica estándar de medición en computación cuántica con iones atrapados y también en muchos sistemas de átomos neutros.

■ DESAFÍO: COHERENCIA Y FIDELIDAD

Los primeros 20 años del siglo XXI evidenciaron una auténtica carrera por alcanzar altos grados de coherencia y fidelidad en la realización de compuertas lógicas con iones, átomos y otros sistemas cuánticos. Una carrera que, durante varios años, vinieron ganando los sistemas cuánticos naturales. En los primeros años los iones estuvieron a la cabeza, pero hoy los átomos, con sus compuertas de Rydberg, se han puesto codo a codo. Conseguir altos grados de coherencia implica obtener un sistema atómico que preserve los estados cuánticos inalterados por suficiente tiempo, de modo tal que sea posible realizar cálculos, es decir, durante lapsos más largos que los necesarios para efectuar una cierta cantidad de compuertas.

Para lograr mayor coherencia se han utilizado diversas estrategias. Por un lado, la búsqueda del soporte físico ideal: uno que ya por sí mismo conserve bien los estados, como por ejemplo los estados tipo reloj, insensibles a fluctuaciones magnéticas externas. Por otro lado, el de-

sarrollo de técnicas para aislar artificialmente el sistema del entorno, por ejemplo, apantallando campos espurios o diseñando sistemas de estabilización que compensen variaciones externas de temperatura y de campos que afectan a los átomos. Finalmente, se utilizan técnicas dinámicas que permiten deshacer la influencia del ruido externo. Estas últimas, conocidas en general como **desacople dinámico**, fueron inicialmente desarrolladas para resonancia magnética nuclear, y luego adaptadas y ampliadas por la comunidad de la computación cuántica.

Por otra parte, para realizar cómputo cuántico es necesario que las compuertas lógicas se ejecuten con gran precisión. A esta precisión la llamamos **fidelidad**, una medida de qué tan fiables son las operaciones realizadas. La construcción de computadoras cuánticas prácticas requiere operaciones con muy alta fidelidad. ¿Qué tan alta? Es aún una cuestión de debate y depende del protocolo de computación y de corrección de errores empleado, pero es seguro decir que se necesitan fidelidades superiores al 99,9%, es decir, compuertas correctas en más de 999 de cada 1.000 intentos. Difícil, pero no imposible: de hecho, ya se han alcanzado tanto en iones como en átomos neutros.

La dificultad de lograr compuertas de alta fidelidad radica en dos aspectos fundamentales. El primero es la estabilidad de los láseres, ondas o campos de control utilizados: un desafío principalmente tecnológico o ingenieril, pero que llevó años superar y continúa siendo perfeccionado. El segundo es que cada protocolo físico con el que se implementa una compuerta lógica tiene limitaciones propias de la interacción o del mecanismo empleado. La búsqueda y el desarrollo de nuevos protocolos que permitan com-

puertas de mayor fidelidad sigue siendo hoy uno de los frentes más activos. Un ejemplo de esto último son las compuertas lógicas realizadas mediante **transiciones Raman**. En ellas, la transición entre dos niveles se logra mediante la absorción de un fotón de un haz y la emisión en un segundo haz. La diferencia de energía entre estos dos fotones debe coincidir exactamente con la diferencia de energía entre los estados del qubit. Mantener estos láseres estables en frecuencia, potencia y enfoque sobre los átomos o iones constituye parte del desafío técnico. Además, para que estas compuertas funcionen, ambos láseres deben tener frecuencias cercanas, aunque no tanto a otra transición atómica. Cuanto más cerca están, más fuerte es la interacción, pero también mayor la probabilidad de error: si están demasiado sintonizados, en lugar de realizarse el proceso de dos fotones requerido, el átomo puede absorber solo un fotón y cambiar de estado aleatoriamente. Este balance entre sintonía e infidelidad impone un límite fundamental a las compuertas Raman, que depende de cada átomo y de la transición utilizada.

Aun así, se han logrado compuertas con fidelidades aceptables para el cómputo cuántico, y la búsqueda constante de nuevas transiciones atómicas que permitan operaciones cada vez más precisas sigue en pleno desarrollo.

■ DESAFÍO: ESCALABILIDAD

Una vez resuelto el desafío de la coherencia y la fidelidad, aparece un nuevo reto: el de la **escalabilidad**. Resulta que el camino para extrapolar lo que se hace con dos, tres o seis qubits hacia decenas o cientos de qubits no es pavimentado por los logros anteriores, sino que requiere ingenio y astucia. Requiere resolver varios desafíos abiertos aún, e

incluso, a veces, visitar los pasos anteriores para poder avanzar mejor. Un claro ejemplo de esto se dio hacia los años cercanos a 2010. Por esa época, un par de plataformas, en particular la de iones atrapados, había sido muy exitosa en realizar cómputo cuántico con 2 y hasta 6 u 8 qubits. Varios grupos de investigación y grandes laboratorios nacionales se embarcaron entonces en el proyecto de escalar estos sistemas a cientos de qubits. En esta dirección, muchos cambiaron sustancialmente sus sistemas de atrapado de iones y átomos por otros que, en principio, podrían atrapar no unos pocos átomos, sino cientos. Todos fracasaron rotundamente. Se vieron frente a la imposibilidad de realizar operaciones básicas que ya habían dominado años atrás.

Este fracaso al intentar integrar y multiplicar todo de golpe llevó a la comunidad a repensar la estrategia y avanzar más despacio: tomar lo conocido y avanzar con pasos incrementales seguros. Un ejemplo interesante de esto es el desarrollo del **CCD cuántico para iones**. La idea era construir trampas de iones que trabajaran de modo similar a los chips CCD (**charge coupled device**) utilizados en cámaras fotográficas. En estos chips, la luz se recibe y se transforma en carga eléctrica en una región separada en forma de cuadrícula. Luego, esta carga es movida por la cuadrícula hasta una zona donde se digitaliza y se transfiere al sistema de almacenamiento. De manera análoga, uno podía mover iones en trampas segmentadas y llevarlos de un lado a otro, trasladando así la memoria cuántica entre lugares de guardado y zonas de procesamiento. Una gran idea. Al querer implementar la idea del CCD cuántico aparecieron varios desafíos insospechados. Hasta entonces, las trampas de iones habían sido construidas

con piezas relativamente grandes, fabricadas en tornerías de precisión, a veces de tamaño milimétrico, pero que, en definitiva, estaban siempre bastante lejos de los iones. Al intentar miniaturizar las trampas, la comunidad experimentó con diversas técnicas de microfabricación, como las utilizadas en la industria de semiconductores, y se encontró con un sinfín de problemas: desde la rotura de materiales por los campos eléctricos fuertes, la carga de los dieléctricos por los láseres utilizados, hasta extrañas interacciones de los iones con las superficies de los metales cercanos. Un problema tan difícil y esquivo de resolver durante años que recibió el nombre de **calentamiento anómalo**, una manera elegante de decir: “no tenemos ni idea de qué está pasando, pero esto no funciona”.

Luego de los primeros fracasos estrepitosos, varios grupos aprendieron la lección y abordaron el problema de la escalabilidad paso a paso, delimitando las dificultades hasta resolverlas. Además, varios de estos desarrollos pasaron de la academia al sector privado o a proyectos nacionales, donde pudieron ser abordados con más paciencia, tiempo y recursos de los que normalmente se dispone en el mundo académico. Hoy día, tanto en iones como en átomos neutros, ya existen dispositivos capaces de realizar cómputo cuántico en un poco más de 100 qubits con gran fidelidad.

Sin duda, el desafío de pasar de 100 a 1.000, o de ahí a 10.000 qubits —en definitiva, a cantidades potencialmente útiles para la computación cuántica— traerá nuevas sorpresas y desconciertos que requerirán de gran ingenio y perseverancia para ser resueltos.

■ LA ACTIVIDAD EN EL LABORATORIO DE IONES Y ÁTOMOS FRÍOS DE LA FCEYN, UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

El Laboratorio de Iones y Átomos Fríos, ubicado en el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (FCEyN-UBA) y el IFIBA, representa un polo experimental pionero en la física cuántica de Argentina. La actividad central del grupo se enfoca en el confinamiento y enfriamiento de iones individuales, típicamente de calcio, utilizando trampas electromagnéticas de Paul en cámaras de ultra-alto vacío. Mediante la aplicación de técnicas avanzadas de enfriamiento láser, el equipo logra reducir la temperatura de estas partículas a millonésimas de grado por encima del cero absoluto. Al detener su movimiento casi por completo, podemos aislar a los iones de las perturbaciones del entorno y manipular sus estados cuánticos internos con un nivel de precisión asombroso, convirtiéndolos en qubits naturales excepcionales. Una de las líneas de investigación más originales y destacadas del laboratorio es **el estudio de la interacción de estos átomos atrapados con haces de luz estructurada**, como los vórtices ópticos que transportan momento angular orbital. El uso de esta luz “retorcida” abre mecanismos novedosos para excitar transiciones atómicas que normalmente estarían prohibidas, habilitando nuevas vías para el control coherente y la codificación de información cuántica. A través de este dominio sobre sistemas atómicos individuales, en el LIAF no solo abordamos preguntas fundamentales de la óptica cuántica sino que trabajamos directamente en la arquitectura del hardware cuántico. Las plataformas que diseñamos y operamos actúan como procesadores y simuladores cuánticos elementales, capaces de ejecutar compuer-

tas lógicas, explorar la dinámica del entrelazamiento y estudiar la decoherencia en tiempo real.

Más allá de los avances estrictamente científicos, la actividad del LIAF cumple un rol estratégico fundamental: la formación de recursos humanos altamente especializados en tecnologías cuánticas experimentales. El trabajo diario en el laboratorio exige un ecosistema interdisciplinario donde confluyen la óptica de extrema precisión, la electrónica de control rápido, el desarrollo de software instrumental y la física atómica de frontera. Esta labor integral forja a una nueva generación de científicos e ingenieros con capacidades técnicas únicas en la región. Con su trabajo, el grupo demuestra que es factible desarrollar hardware cuántico y realizar investigación experimental de punta en Argentina, consolidando la presencia del país en el mapa global de la segunda revolución cuántica.

■ QUBITS ARTIFICIALES

■ EL DESCUBRIMIENTO

El Premio Nobel de Física 2025 fue otorgado a Michel Devoret, John Clark y John Martinis por la demostración de la cuantización de los niveles de energía de un circuito eléctrico en 1985. Este fue un salto cualitativo en cuanto a probar experimentalmente que objetos macroscópicos (constituidos por miles de millones de átomos) pueden comportarse de acuerdo a las leyes de la mecánica cuántica. De hecho, los grados de libertad que los describen permiten describirlos como átomos artificiales donde aparecen niveles de energía discretos. Estos pueden absorber y emitir fotones en “cuantos” pero además, se pueden usar algunos de estos niveles, dos de ellos, para formar un qubit. Esta unidad de procesamiento cuántica puede ser controlada, generando transiciones de un nivel a otro y superposiciones

entre los dos estados, a partir de señales eléctricas alternas enviadas al circuito. Es difícil describir hasta qué punto este descubrimiento abrió las puertas de un nuevo mundo para la electrónica moderna, el mundo de los circuitos cuánticos. Para dar un ejemplo divertido, es fácil pensar en este átomo artificial accesible a todo momento, en un chip, listo para acoplarse a fotones en cavidades electromagnéticas o a otros átomos artificiales. Comparado con los átomos reales que deben ser atrapados en trampas ópticas, los circuitos cuánticos ofrecen interesantes ventajas. En particular la tuneabilidad de los parámetros que fijan las energías, los acoplamientos, etc, pueden ser elegidas en el momento del diseño y la fabricación.

■ CIRCUITOS CUÁNTICOS SUPERCONDUCTORES

Los circuitos cuánticos combinan componentes electrónicos tradicio-

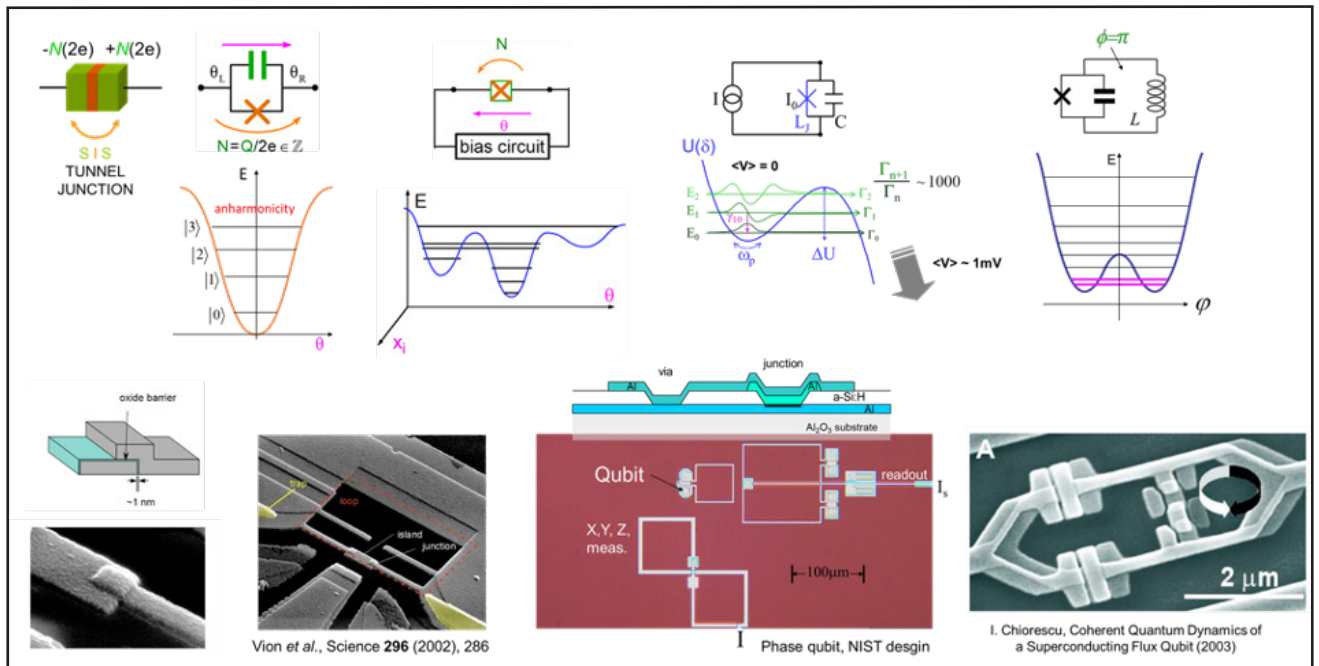


Figura 2. (panel superior) Juntura Josephson y diferentes combinaciones de componentes que dan lugar a niveles de energía característicos. (panel inferior) Fabricación de una juntura Josephson e imágenes de diferentes qubits superconductores de la primera generación: Quantronium, Phase qubit y Flux qubit. Estos evolucionaron en el transmon y el fluxonium.

nales como capacitores e inductores con un elemento esencial, que es no-disipativo y no-lineal: la juntura Josephson (ver **Figura 2**). Una juntura Josephson está fabricada a partir de dos materiales superconductores separados por una delgada barrera túnel (típicamente un óxido). Es por esta razón que hablamos de circuitos cuánticos superconductores. Para proteger los niveles de energía, típicamente en el orden de los GHz, los mismos tienen que ser enfriados a muy bajas temperaturas, del orden de los milikelvin en criostatos de dilución. Además, tienen que estar aislados del ruido electromagnético y magnético. Se pueden hacer distintas arquitecturas de circuitos, lo que en los años recientes ha dado

lugar a diferentes “familias” de circuitos superconductores (ver **Figura 2**). Entre ellas, el transmon, es una arquitectura sencilla (una juntura Josephson en paralelo con un gran capacitor) que se ha popularizado como la opción elegida por algunas de las compañías más importantes (Google e IBM) en su carrera por construir una computadora cuántica comercial. El fluxonium es otra de las arquitecturas que está siendo estudiada recientemente como candidata para superar al transmon. Si bien estos circuitos tienen muchos niveles de energía, es común referirse a ellos como qubits en cuanto a que se elige un sweet spot de operación donde los niveles de más baja energía se separan suficiente de los

otros como para poder trabajar con ellos sin involucrar a los demás. Por supuesto, al operar los qubits dentro de procesadores cuánticos, una de las fuentes de error es el “derrame” o leakage fuera del espacio computacional, que significa poblar niveles más allá del $|1\rangle$ y el $|0\rangle$ del qubit.

■ OPERACIÓN Y LECTURA

Una vez que se fabrica un qubit superconductor, hay que resolver dos puntos importantes, de nuevo de acuerdo a los criterios antes mencionados: definir la estrategia para hacer operaciones, es decir, implementar compuertas y además, leer el estado del sistema, es decir medir la probabilidad de encontrar al sistema

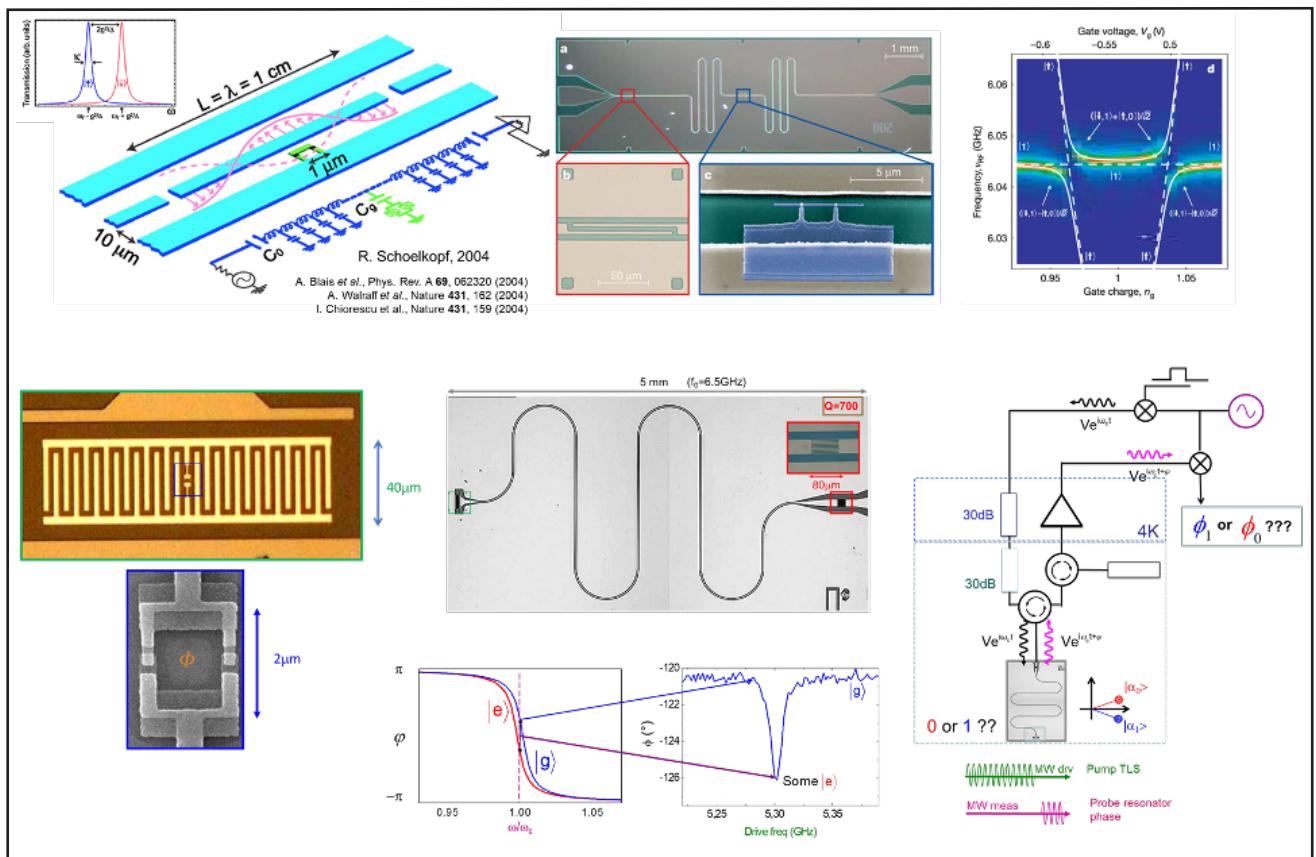


Figura 3. (panel superior) Primera realización de acoplamiento fuerte en electrodinámica cuántica de circuitos: un qubit superconductor tipo Quantronium acoplado a un resonador microondas. El cruce evitado es el efecto del intercambio coherente de excitaciones. (panel inferior) Realización de cQED con un transmon acoplado a un resonador microondas. En un régimen dispersivo, la frecuencia del resonador depende del estado del qubit y por lo tanto la fase de la señal reflejada guarda la información del estado del qubit. De esta manera se puede realizar la espectroscopía del mismo.

en $|1\rangle$ o $|0\rangle$ luego de una operación o una secuencia de operaciones. Respecto al segundo aspecto, para la lectura del estado del sistema se utilizan hoy en días las herramientas de la electrodinámica cuántica de circuitos (cQED, por circuit quantum electrodynamics) que no es otra cosa que acoplar el qubit en tanto que átomo artificial a una cavidad electromagnética de modo que la frecuencia de la misma se vuelve dependiente del estado del qubit. En este sentido, al mandar una señal para medir la cavidad, la señal reflejada o transmitida da cuenta (su amplitud o su fase) del estado del sistema, como una suerte de puntero al "0" o al "1". Esta aguja se diseña de modo que la discriminación se puede realizar con gran fidelidad. Esta es otra de las grandes ventajas de los circuitos cuánticos como plataforma para la computación cuántica. Ver **Figura 3**.

Respecto al primer punto, en la mayoría de los casos las compuertas se implementan mandando pulsos microondas resonantes con la frecuencia del qubit. La duración de estos pulsos genera rotaciones del qubit pensado como una flecha en el espacio de Hilbert mapeado en una esfera. El polo norte corresponde al $|0\rangle$ y el polo sur al $|1\rangle$. Una rotación de 90 grados, lleva al sistema del $|0\rangle$ al ecuador, donde se encuentra en un estado superposición ($|1\rangle+|0\rangle$). Estos pulsos son análogos a los que se emplean en resonancia magnética nuclear, y a los que se describieron antes para los qubits "naturales". Las rotaciones a lo largo de diferentes ejes se pueden lograr eligiendo la fase adecuada de los pulsos. Típicamente estos pulsos son de decenas de nanosegundos y hoy en día las compuertas son muy eficientes, se habla de una fidelidad del 99,99%, en el sentido que la evolución de los estados cuánticos dada por la implementación experi-

mental es prácticamente indistinguible de la evolución ideal dada por una matriz unitaria que se puede escribir en el cuaderno. Existe una estrategia alternativa para realizar compuertas utilizando transiciones Landau-Zener, mayormente útiles para el caso en que la frecuencia de los qubits es muy pequeña.

■ COMPUERTAS DE DOS QUBITS

La implementación de algoritmos cuánticos útiles requiere de la capacidad de poder realizar compuertas de un qubit y de dos qubits o compuertas entrelazantes. Existen diferentes maneras en la que esto se realiza en la práctica, por ejemplo, dos qubits pueden compartir un capacitor. Esto hace que las fluctuaciones cuánticas de la carga de un qubit A generen fluctuaciones del campo eléctrico en el otro qubit B que modifican su energía y recíprocamente, B sobre A. También pueden acoplarse dos qubits mediante un "acoplador", por ejemplo un circuito resonante que intercambia fotones con cada uno de ellos y los acopla de forma efectiva. Encontrar la mejor arquitectura para compuertas entrelazantes es un problema muy interesante. En particular en un procesador cuántico donde hay que conectar muchos qubits. Uno de los desafíos es que si el acoplamiento es muy fuerte, los niveles de energía individuales de los qubits se ven muy modificados por lo que aparece cross-talk, esto significa que se efectúan rotaciones indeseadas del qubit B aunque se esté enviando la señal al qubit A. Por otro lado, si el acoplamiento es muy débil, las compuertas de entrelazamiento se vuelven muy lentas; el tiempo de intercambiar cuantos de excitación depende de este acoplamiento.

Esto muestra también una de las particularidades de los procesadores de qubits superconductores: los

acoplamientos son de a dos. Hoy en día, la elección de topología de conectividad de los qubits va de la mano del código de corrección de errores que se quiere implementar. Esto quiere decir que se implementan mediciones adicionales en un conjunto de qubits (un estabilizador) que dan información sobre la ocurrencia de un error (un síndrome). Sabiendo que hubo un error, y qué tipo de error, este se puede corregir. El conjunto de síndromes que se miden y los errores que se corrigen forman "un código de corrección de errores". Entre los más populares encontramos al Surface Code, que es el de Google en su último procesador Willow. La corrección de errores permite que la información cuántica de un qubit lógico esté más protegida que la de las unidades físicas independientes.

■ COHERENCIA Y FIDELIDAD

Uno de los desafíos de los qubits superconductores (y de cualquier plataforma de tecnologías cuánticas en general) es aumentar la coherencia. Con los grandes progresos que se han hecho, los mejores qubits superconductores tienen tiempos de vida y de coherencia en el rango de 0,5-1,0 ms. Considerando que las compuertas de un qubit son del orden de las decenas de nanosegundos y las de dos qubits de centenas de nanosegundos, se pueden llevar a cabo cientos de compuertas antes de que se pierda la coherencia. Esto ha permitido la demostración de algoritmos cuánticos complejos, la demostración de supremacía cuántica, la implementación de simuladores cuánticos de sistemas de muchos cuerpos. Aunque todavía hay mucho para mejorar, el progreso ha sido alentador. Recientemente, por ejemplo, un cambio en los materiales y el proceso de fabricación de los transmons permitió alargar el tiempo de vida a los milisegundos.

■ PERSPECTIVA

Es un momento muy alentador. Desde la perspectiva más modesta, a nivel investigación en el laboratorio hay varias ventanas abiertas:

1. Encontrar otras plataformas de qubits que sean ventajosas: esto se puede hacer usando otras arquitecturas, otros materiales, sistemas híbridos que combinan superconductores y semiconductores.
2. Explorar compuertas alternativas: esto es interesante ya que se pueden buscar métodos no-mainstream para mejorar los tiempos y la fidelidad de las compuertas tanto para un como para dos qubits.
3. Una computadora cuántica se vuelve útil porque hay algoritmos cuánticos que resuelven problemas mejor que una computadora clásica. Pero esto significa que hay que tener una mente cuántica para pensar nuevos algoritmos cuánticos (o sea, hay que pensar como una computadora cuántica, no traducir un algoritmo clásico a una versión cuántica). Y esto nadie sabe hacerlo y es fundamental.
4. Hay mucho trabajo también para probar esos algoritmos en las computadoras cuánticas reales, lo que significa traducir las instrucciones del algoritmo a la acción real (voltajes que se prenden, etc) en la plataforma experimental.

■ LA ACTIVIDAD EN EL GRUPO DE TEORÍA DEL SÓLIDO Y EL GRUPO DE CIRCUITOS CUÁNTICOS EN BARILOCHE

En el Centro Atómico Bariloche, el Grupo de Teoría de Sólidos sostiene

una sólida y extensa tradición en el modelado de sistemas cuánticos complejos y dispositivos de materia condensada. En el marco de la segunda revolución cuántica, su labor resulta fundamental para comprender y optimizar los bloques fundamentales del hardware cuántico. Las investigaciones del grupo abarcan desde el diseño conceptual de circuitos cuánticos hasta el estudio de sistemas forzados y con disipación.

En estrecha sinergia con estos desarrollos teóricos, el Grupo de Circuitos Cuánticos asume el enorme desafío de materializar estas propuestas en hardware físico. Este grupo experimental, operando en las instalaciones del Instituto Balseiro y la CNEA, se dedica al diseño, la fabricación y el control de qubits superconductores. Trabajando en regímenes de temperaturas cercanas al cero absoluto mediante criostatos de dilución (ver **Figura 4**), y empleando técnicas avanzadas de electrodinámica cuántica de circuitos, el equipo busca manipular y leer los estados cuánticos a través de pulsos de microondas. Esta capacidad tecnológica para fabricar y medir átomos artificiales es única en la física experimental del país, sentando las bases concretas para el ensamblaje de procesadores cuánticos locales.

La actividad del Grupo de Circuitos Cuánticos de Bariloche incluye también la implementación de detectores de fotones basados en resonadores microondas fabricados con materiales superconductores desordenados como aluminio granular (ver **Figura 4**). Recientemente se demostró un umbral de detección de fotones en banda teleco del orden de 1.000 fotones. Estamos en la carrera hacia el detector de fotón único!.

También hay proyectos para el desarrollo de circuitos cuánticos híbridos, basados en materiales nue-

vos que combinan superconductores y semiconductores.

■ A MODO DE CIERRE:

Argentina tiene potencial en el hardware cuántico y en el desarrollo de procesadores cuánticos. En particular, en este artículo se consideraron en detalle las plataformas de circuitos cuánticos en Bariloche y de manipulación de iones atrapados en Buenos Aires. A estas capacidades se suman grupos especializados en fotónica en La Plata, la UBA, y CI-TEDEF, y laboratorios de resonancia magnética en Córdoba y Bariloche. Los avances en estas líneas han ido de la mano de investigación teórica capaz de modelar las plataformas experimentales en diversos puntos del país, incluyendo el AMBA, Bariloche, Córdoba, Corrientes y Rosario. Esperamos que todos estos potenciales puedan desarrollarse y expandir las capacidades cuánticas nacionales, un desafío que solo es factible en un marco de políticas científicas sostenidas en el tiempo y que permitan no solo avances en equipamiento y formación de personal calificado sino también su permanencia estable en el país.

■ GLOSARIO

Qubit: Unidad básica de información cuántica. Es un sistema físico que posee dos estados distinguibles, cuyos estados cuánticos pueden ser superposiciones lineales de ambos.

Qutrit: Sistema cuántico de tres niveles distinguibles. Generalización natural del qubit.

Qudit: Sistema cuántico de dimensión arbitraria d . Un qubit corresponde al caso $d=2$.

Espacio de estados (espacio de Hilbert): Estructura matemática que contiene todos los posibles estados cuánticos de un sistema. Su dimen-

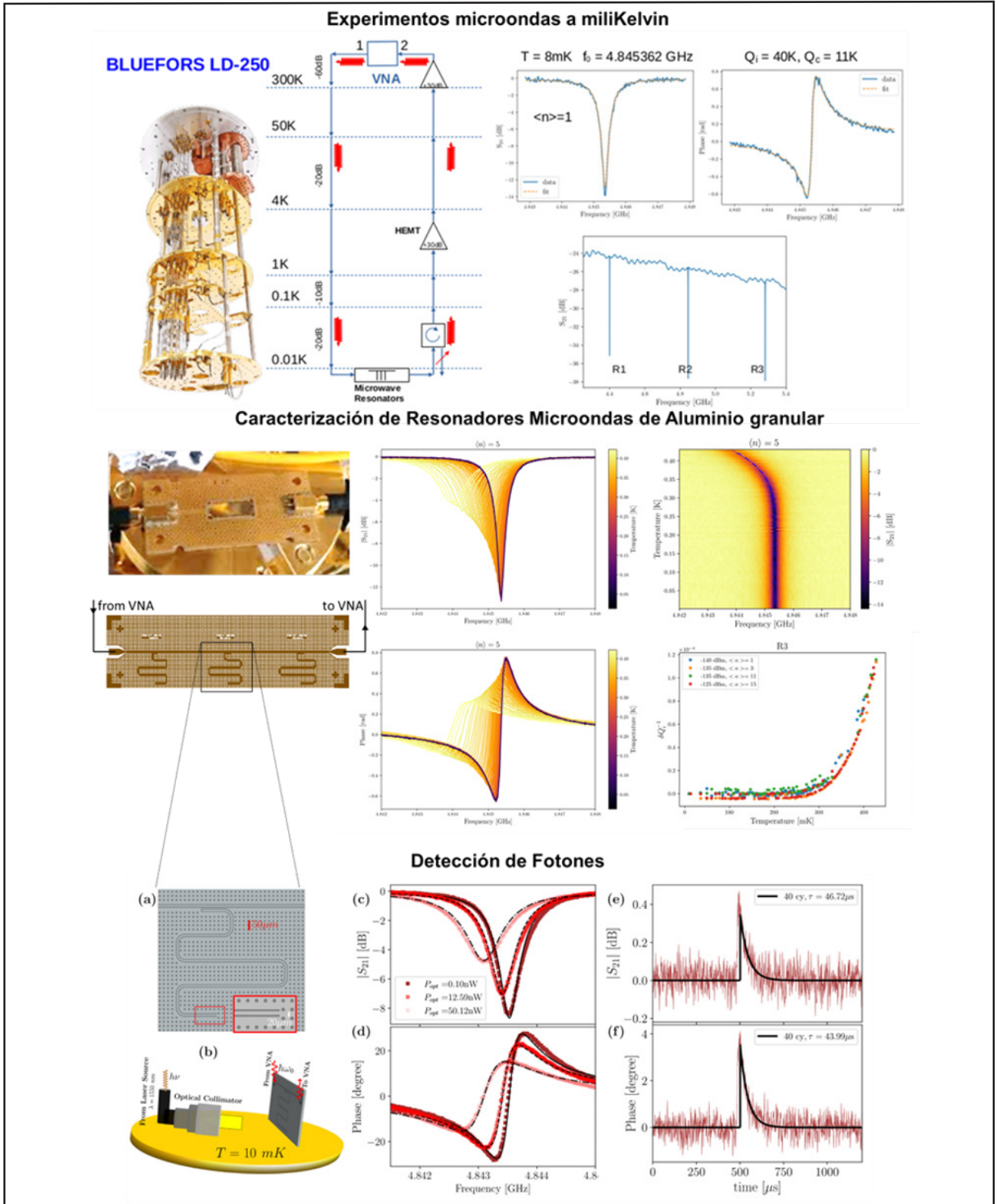


Figura 4. Experimentos microondas a temperaturas de miliKelvin en el Grupo de Circuitos Cuánticos Bariloche: En Bariloche se fabrican y caracterizan resonadores superconductores para diferentes aplicaciones. Por un lado para el read-out de qubits superconductores en cQED. Por otro lado, para la detección de fotones en el NIR. Se ve la respuesta de los resonadores (amplitud y fase del coeficiente de transmisión) en función de la temperatura. De esto se extrae el comportamiento del factor de calidad. En el panel inferior se muestra el primer prototipo de detector de fotones en banda teleco bajo irradiación continua a potencias bajas e irradiación pulsada. Se tiene un umbral de detección de 1.000 fotones.

sión determina la cantidad de estados distinguibles mediante mediciones ideales.

Entrelazamiento: Correlación cuántica entre subsistemas que no puede describirse como una combinación de estados independientes. Según varios autores, es un recurso central para la ventaja cuántica.

Operador unitario: Transformación que preserva la norma del estado cuántico y describe la evolución temporal reversible de sistemas aislados.

Decoherencia: Proceso por el cual un sistema cuántico pierde sus propiedades de superposición debido a la interacción no controlada con el entorno.

Regla de Born: Postulado de la mecánica cuántica que establece que la probabilidad de obtener un resultado en una medición es igual al cuadrado del módulo del coeficiente correspondiente en la superposición.

Computación cuántica adiabática: Modelo en el cual el cómputo se realiza mediante una evolución lenta y controlada del Hamiltoniano del sistema.

Computación cuántica basada en la medición: Modelo donde el cómputo se implementa a partir de un estado altamente entrelazado inicial y una secuencia de mediciones locales adaptativas.

Corrección cuántica de errores: Conjunto de técnicas que permiten detectar y corregir errores sin destruir la información cuántica codificada.

■ BIBLIOGRAFÍA

- Arute F., Arya K., Babbush R., et al. (2019) Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature* 574: 505–510.
- Blais A., Huang R. S., Wallraff A., Girvin S. M., Schoelkopf R. J. (2004) Cavity quantum electrodynamics for superconducting electrical circuits: An architecture for quantum computation. *Physical Review A* 69: 062320.
- Blais A., Grimsom A. L., Girvin S. M., Wallraff A. (2021) Circuit quantum electrodynamics. *Reviews of Modern Physics* 93: 025005.
- Bluvstein D., Evered S. J., Geim A. A., et al. (2023) Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays. *Nature* 626: 58–65.
- Cirac J. I., Zoller P. (1995) Quantum computations with cold trapped ions. *Physical Review Letters* 74: 4091–4094.
- Crowley K. D., McLellan R. A., Dutta A., et al. (2023) Disentangling Losses in Tantalum Superconducting Circuits. *Physical Review X* 13: 041005.
- Devoret M. H., Martinis J. M., Clarke J. (1985) Measurements of Macroscopic Quantum Tunneling out of the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction. *Physical Review Letters* 55: 1908–1911.
- Devoret, M. H. (1997) Quantum fluctuations in electrical circuits. Chapter 10 in “Quantum Fluctuations”; Reynaud, S., Giacobino, E., Zinn-Justin, J. eds. Elsevier Science. Amsterdam.
- DiVincenzo, D. P. (2000) The Physical Implementation of Quantum Computation. *Fortschritte der Physik* 48: 771–783.
- Doherty M. W., Manson N. B., Delaney P., Jelezko F., Wrachtrup J., Hollenberg L. C. (2013) The nitrogen-vacancy colour centre in diamond. *Physics Reports* 528: 1–45.
- Fowler A. G., Mariantoni M., Martinis J. M., Cleland A. N. (2012) Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation. *Physical Review A* 86: 032324.
- Koch J., Yu T. M., Gambetta J., Houck A. A., Schuster D. I., Majer J., Blais A., Devoret M. H., Girvin S. M., Schoelkopf R. J. (2007) Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box. *Physical Review A* 76: 042319.
- Krantz P., Kjaergaard M., Yan F., Orlando T. P., Gustavsson S., Oliver W. D. (2019) A quantum engineer’s guide to superconducting qubits. *Applied Physics Reviews* 6: 021318.
- Nielsen M. A., Chuang I. L. (2010) “Quantum Computation and Quantum Information”. Cambridge University Press. Cambridge.
- Saffman M., Walker T. G., Mølmer K. (2010) Quantum information with Rydberg atoms. *Reviews of Modern Physics* 82: 2313–2363.