

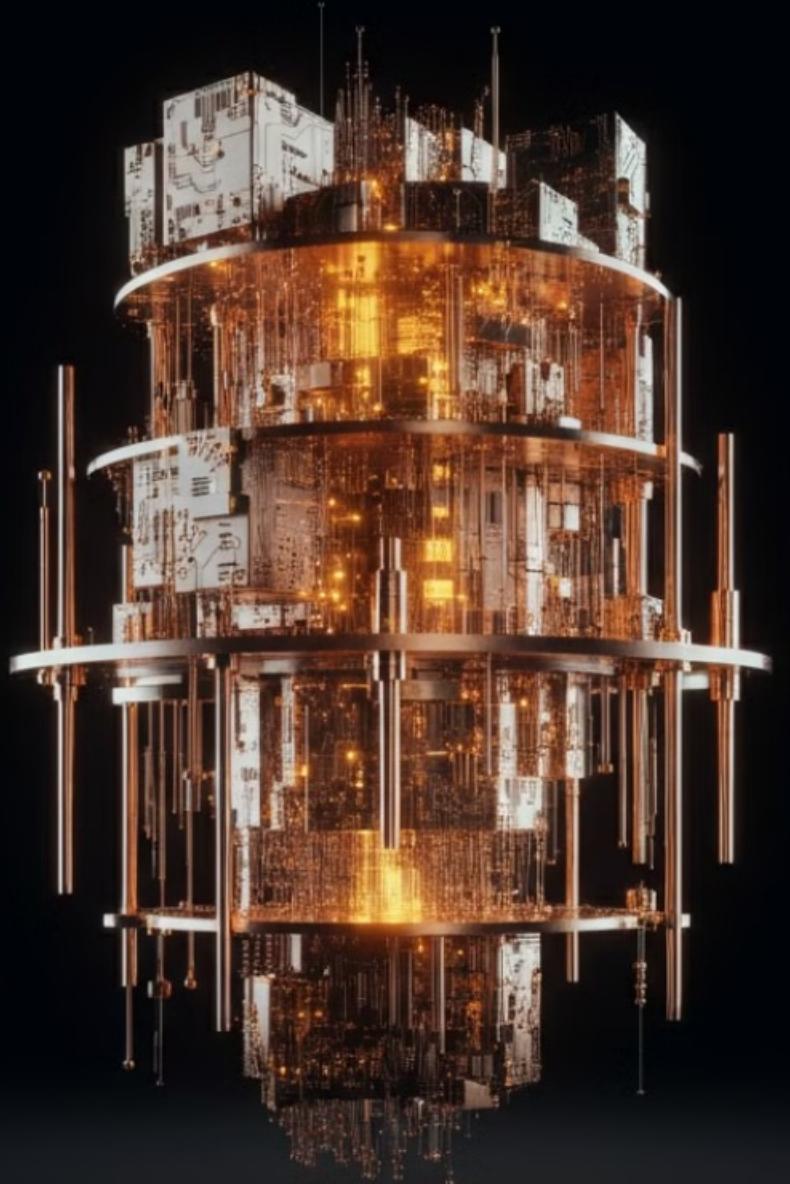
Hardware para Tecnologías Cuánticas

PARTE I: Definiciones y conceptos fundamentales

PARTE II: Implementaciones físicas de qubits

Pablo Solano

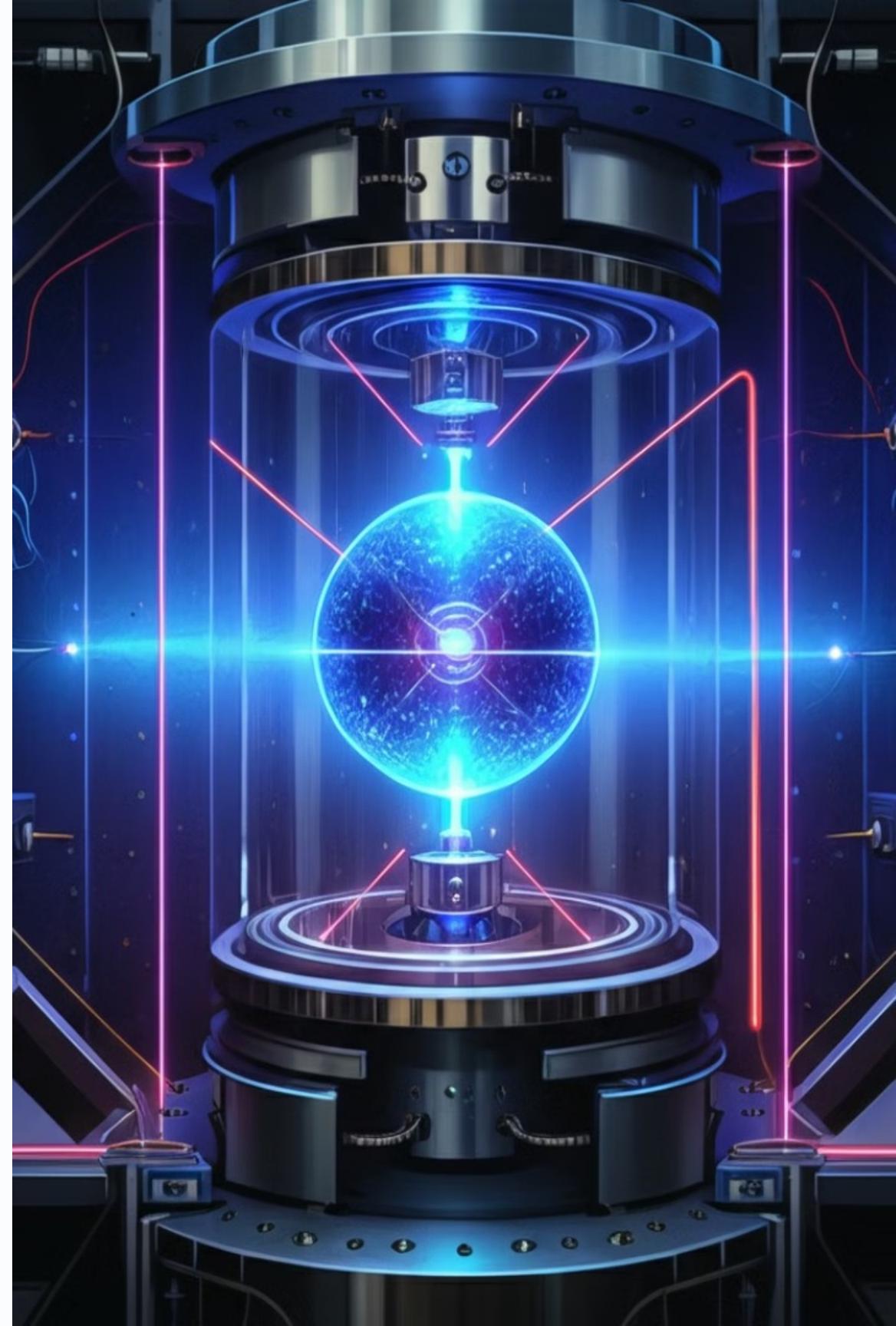
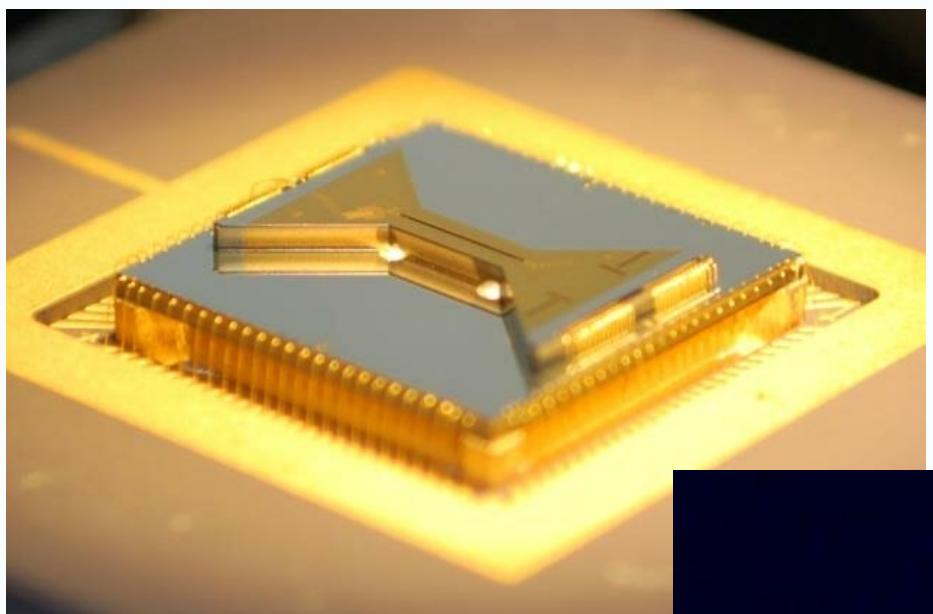
Universidad de Concepción



Qubits de iones atrapados

Descripción física

Cadena de Iones (Be^+ , Ca^+ , Yb^+)
confinados por campos eléctricos



Funcionamiento básico

1 Qubit

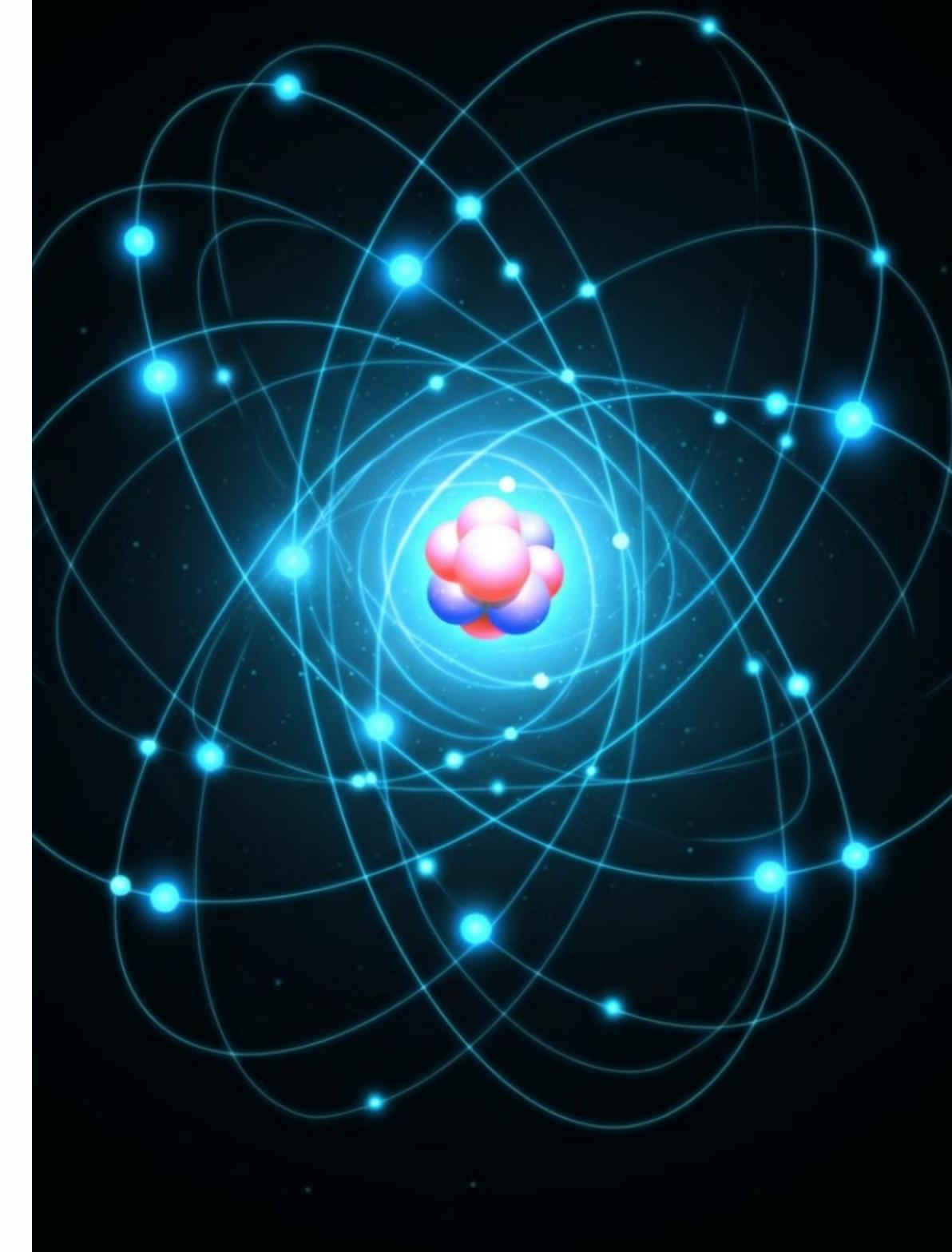
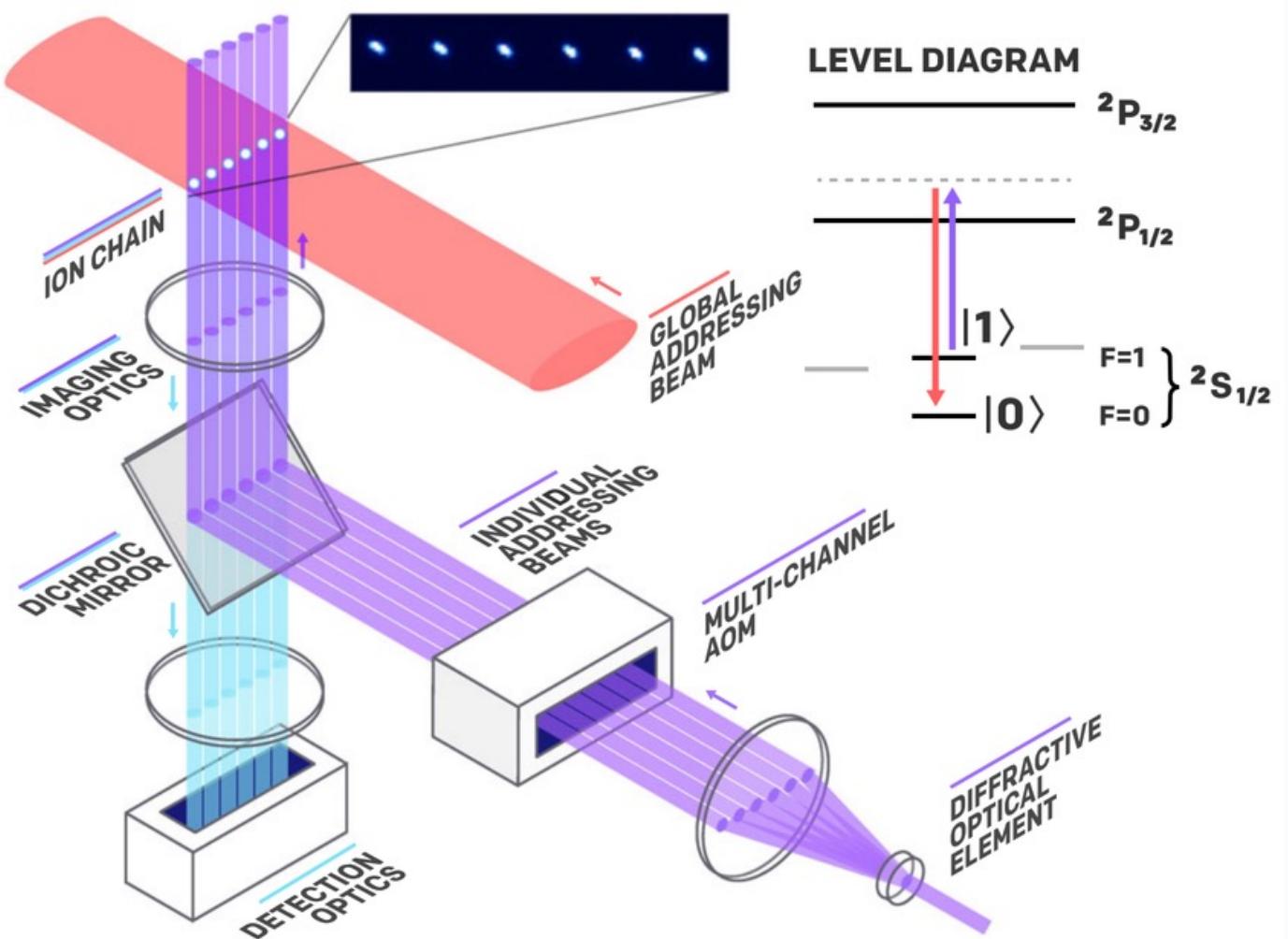
Transiciones electrónicas

2 Control

Con láseres.

3 Lectura

Por fluorescencia.





Puertas lógicas



Puertas de qubit único

Pulsos láser.



Puertas de entrelazamiento

Interacción por modos vibracionales (Mølmer-Sørensen, CNOT)
Alta conectividad.



Actores y pros/contras

Actores

IonQ

Quantinuum

(Honeywell+Cambridge Quantum)

Pros

Tiempos de coherencia muy largos.

Alta fidelidad

Medidas muy precisas.

Contras

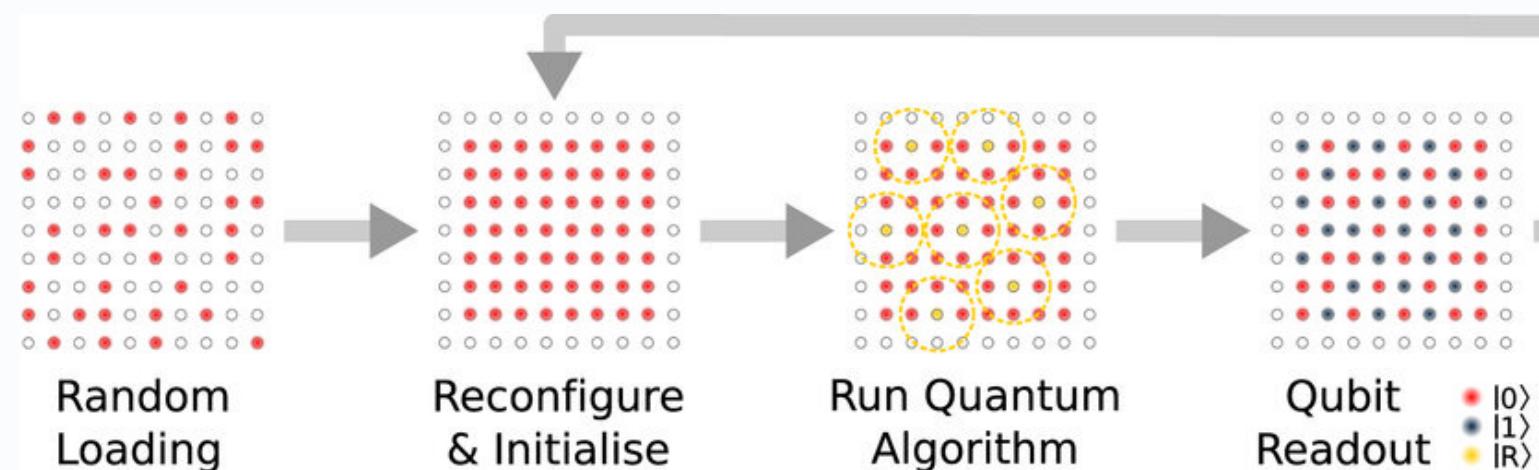
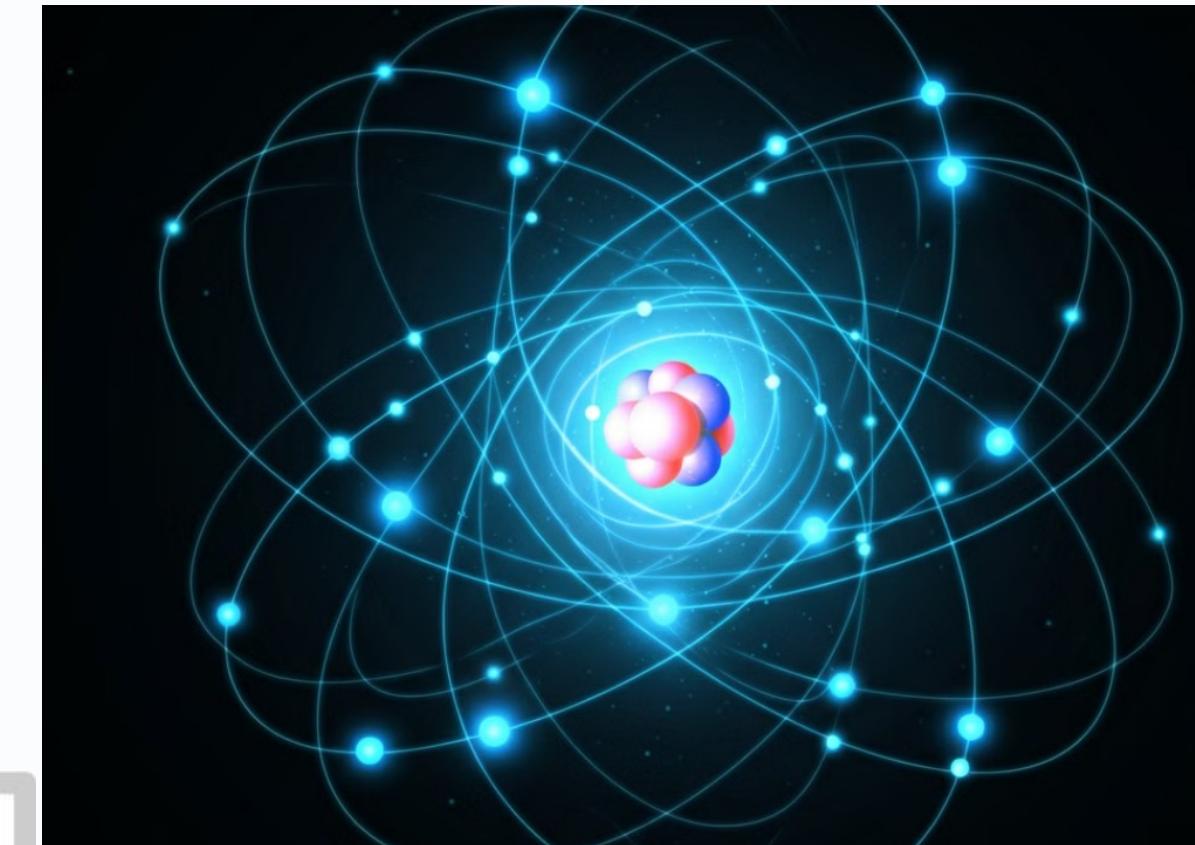
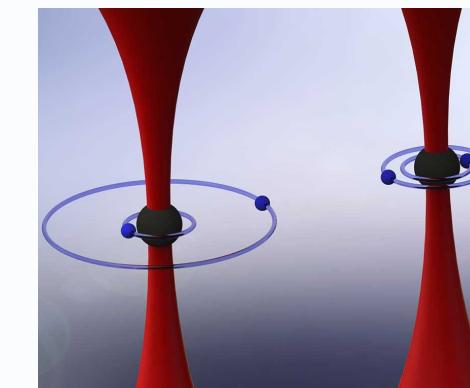
Difícil escalar a miles de iones.

Átomos neutros (Rydberg y redes ópticas)

Descripción física

Arreglo de átomos neutros
(Rb, Cs, Sr) confinados por láseres

Los átomos neutros se mantienen en redes
o pinzas ópticas.



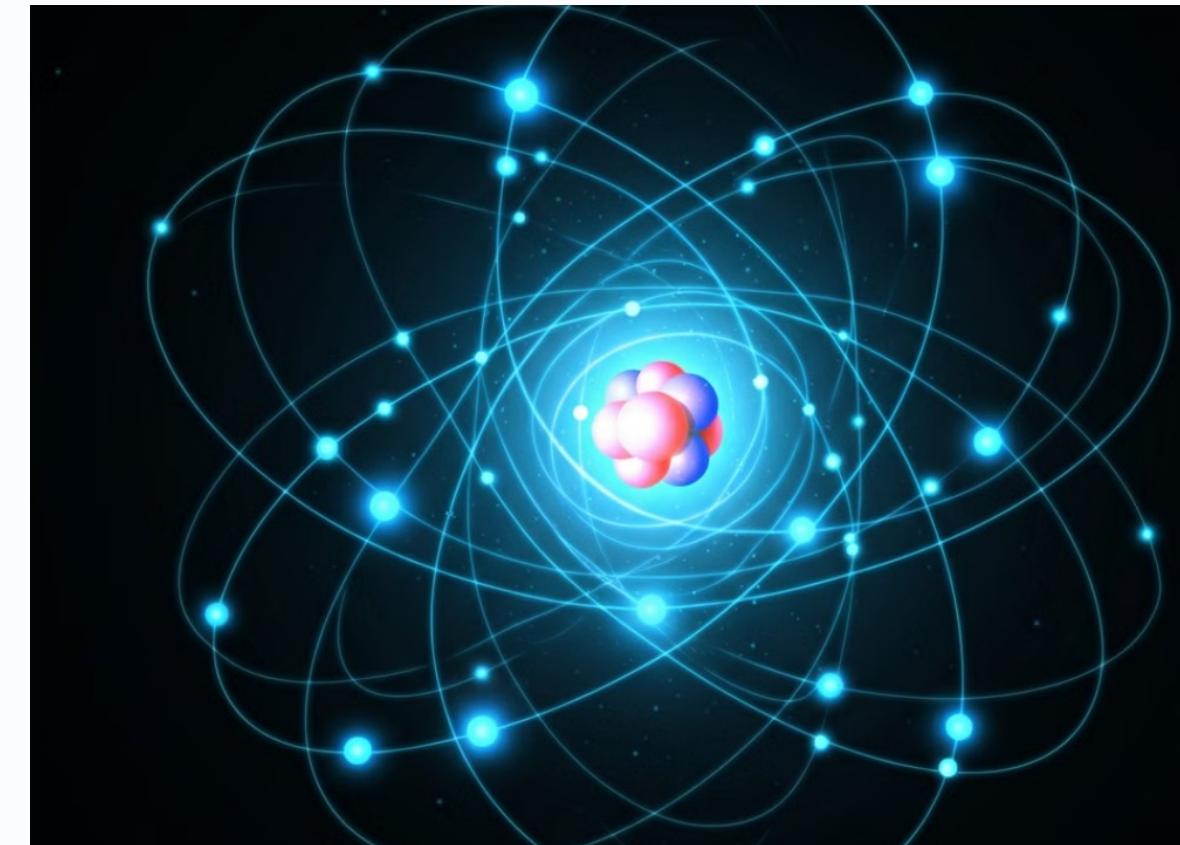
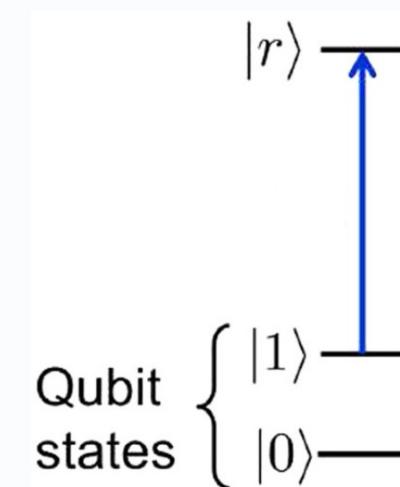
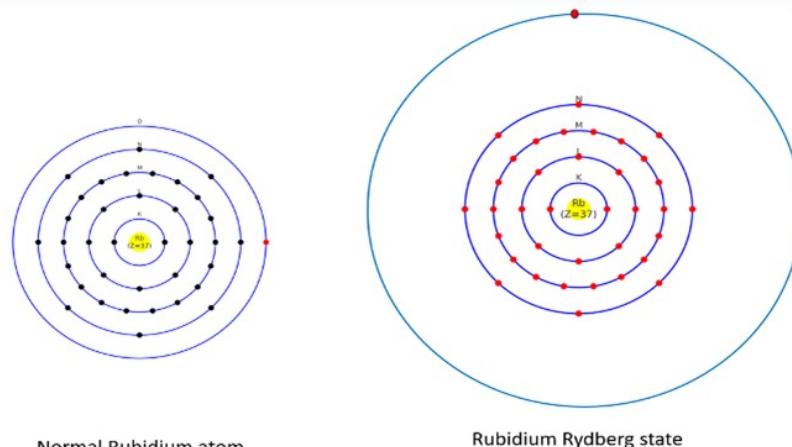
Átomos neutros (Rydberg y redes ópticas)

Descripción física

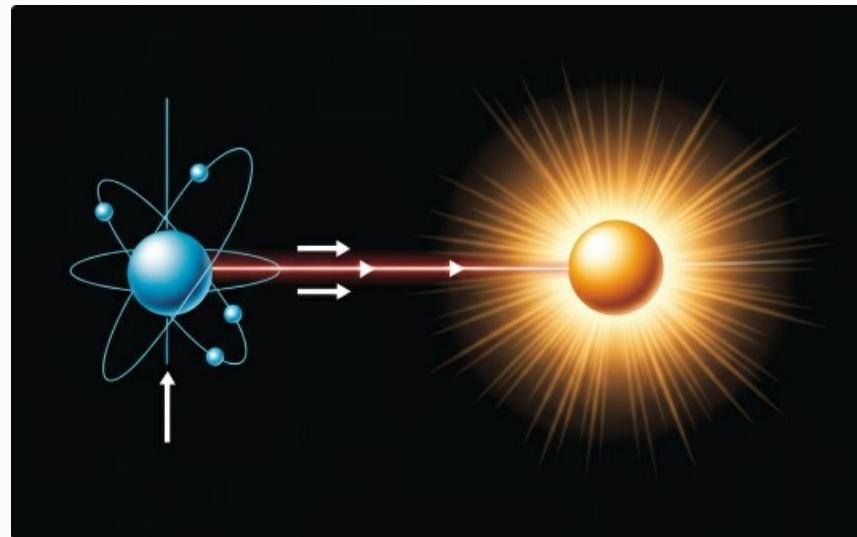
Arreglo de átomos neutros
(Rb, Cs, Sr) confinados por láseres

Los átomos neutros se mantienen en redes o pinzas ópticas.

Los átomos se excitan a estados de Rydberg para lograr interacciones fuertes.

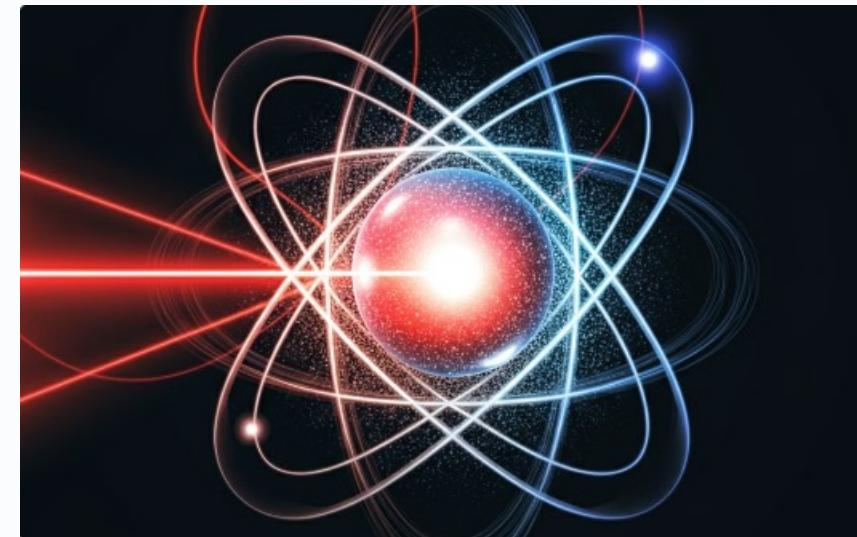


Funcionamiento de átomos neutros



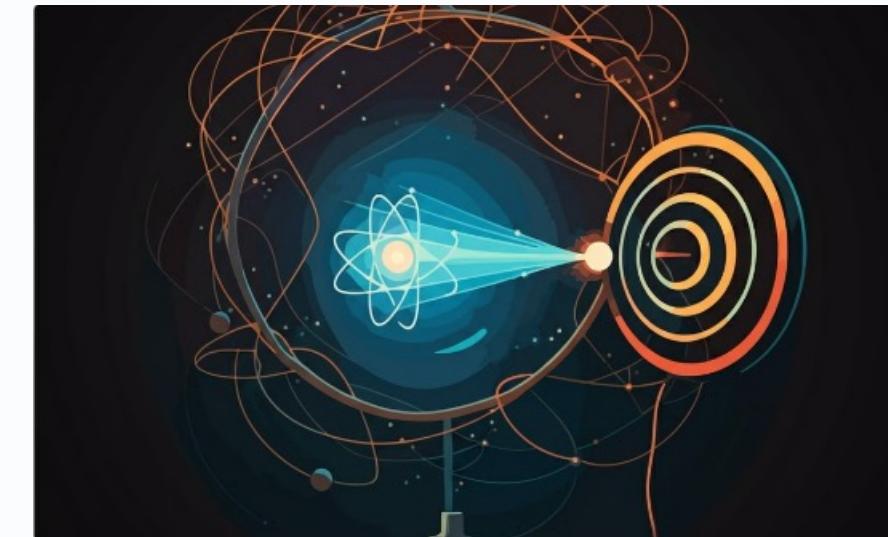
Estados Fundamentales

Los átomos neutros se encuentran en dos estados: el estado fundamental ($|0\rangle$) y el estado excitado ($|1\rangle$).



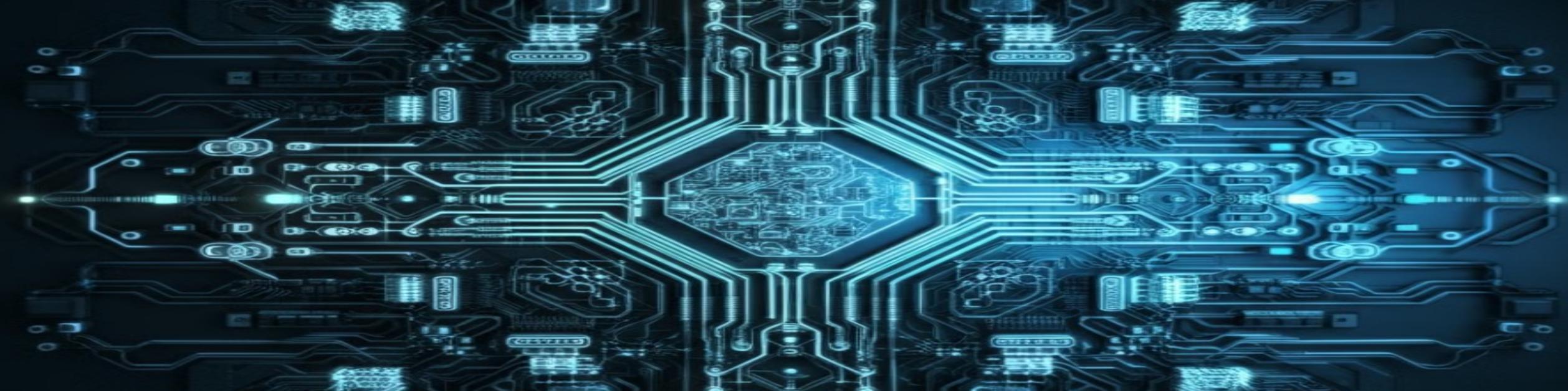
Control por Láser

Los átomos se controlan mediante pulsos de láser muy precisos, que pueden cambiar el spin del electrón.



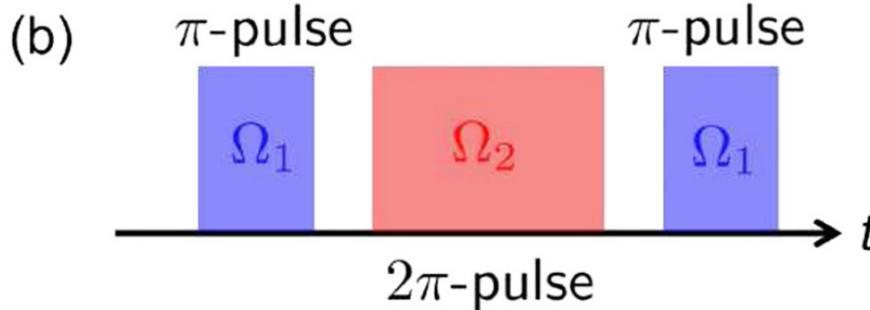
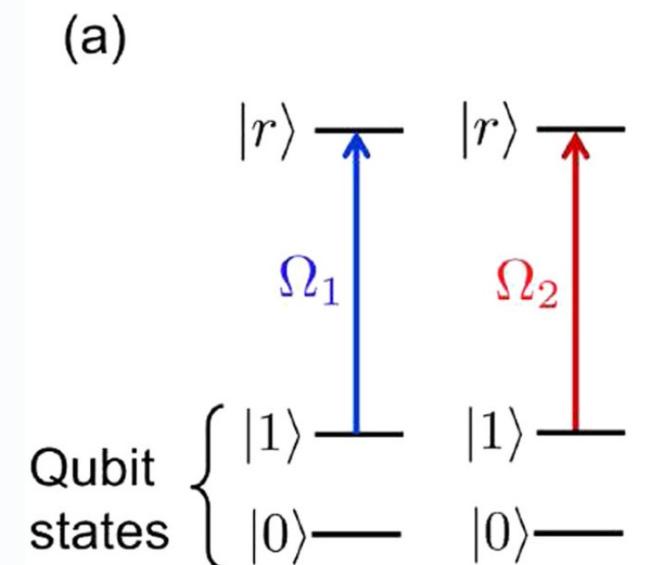
Lectura por Fluorescencia

La lectura del estado del átomo se realiza mediante la detección de la fluorescencia emitida por el átomo.



Puertas de qubit único

Pulsos láser.



(c)

$$\begin{aligned} |00\rangle &\rightarrow |00\rangle \\ |01\rangle &\rightarrow -|01\rangle \\ |10\rangle &\rightarrow -|10\rangle \\ |11\rangle &\rightarrow -|11\rangle \end{aligned}$$



Puertas de entrelazamiento

Bloqueo de excitación cuando un átomo vecino ya está excitado.

La interacción NO es de todos con todos.

Actores y pros/contras

Actores

ColdQuanta (Infleqtion), Pasqal, QuEra

Pros

Escalable en 2D/3D.

Contras

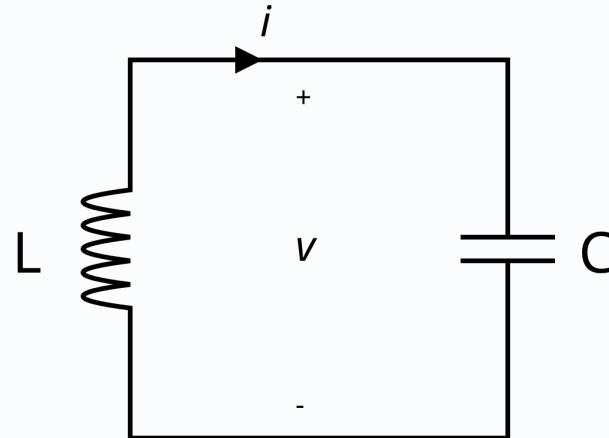
Sistemas ópticos muy exigente.

Qubits superconductores

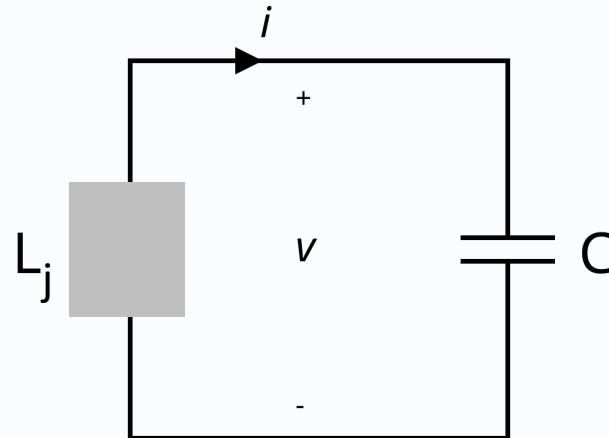
Circuitos superconductores no presentan resistencia eléctrica

Y trabajan típicamente a ~ 10 mK .

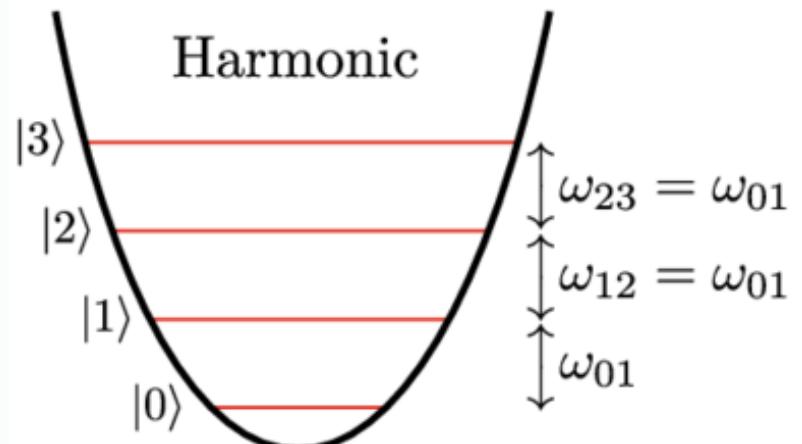
Circuito LC



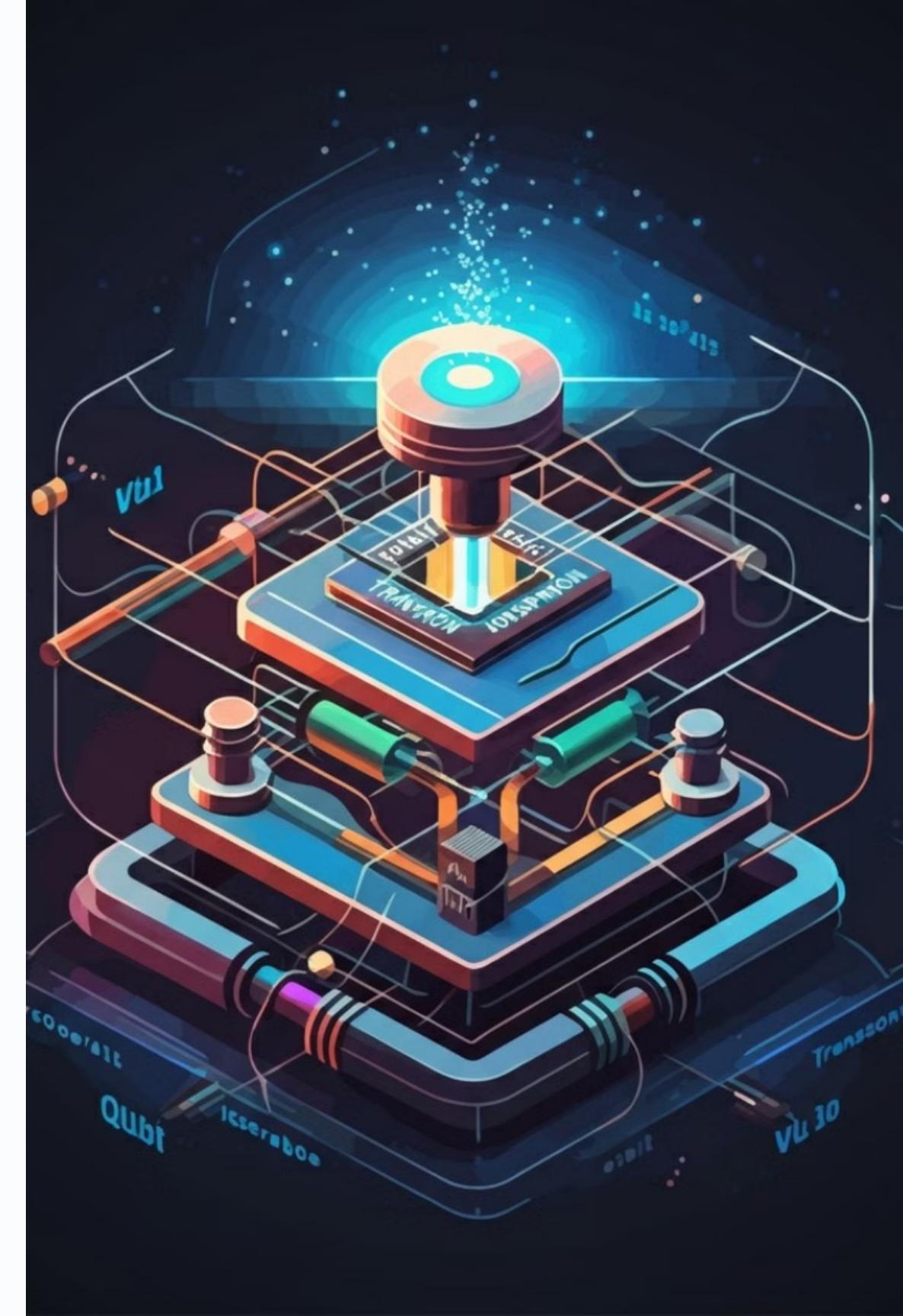
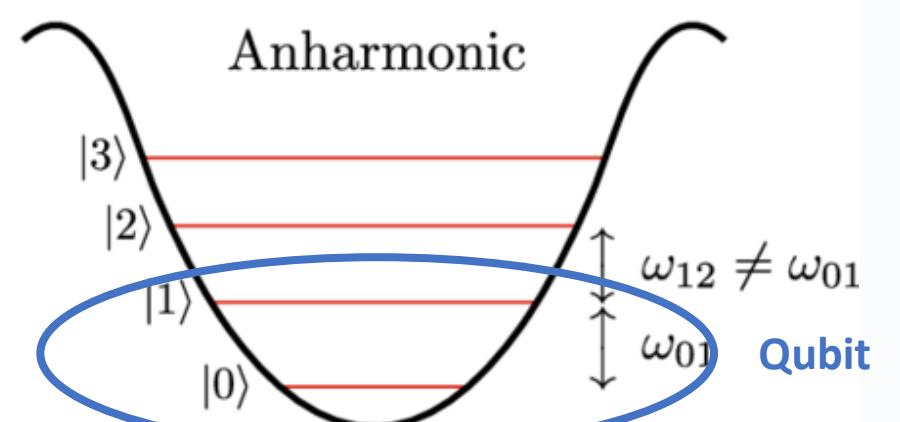
Circuito LC no lineal



Harmonic

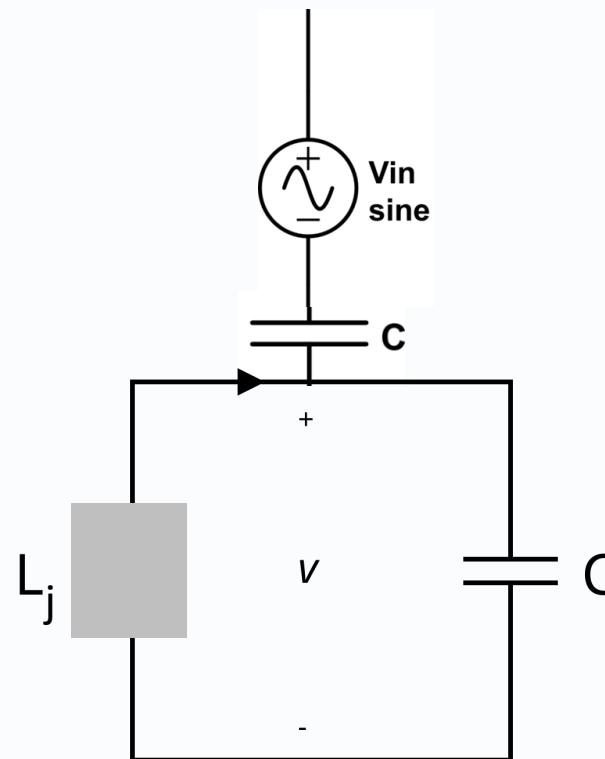


Anharmonic



Operaciones básicas

Control: Señales de microonda



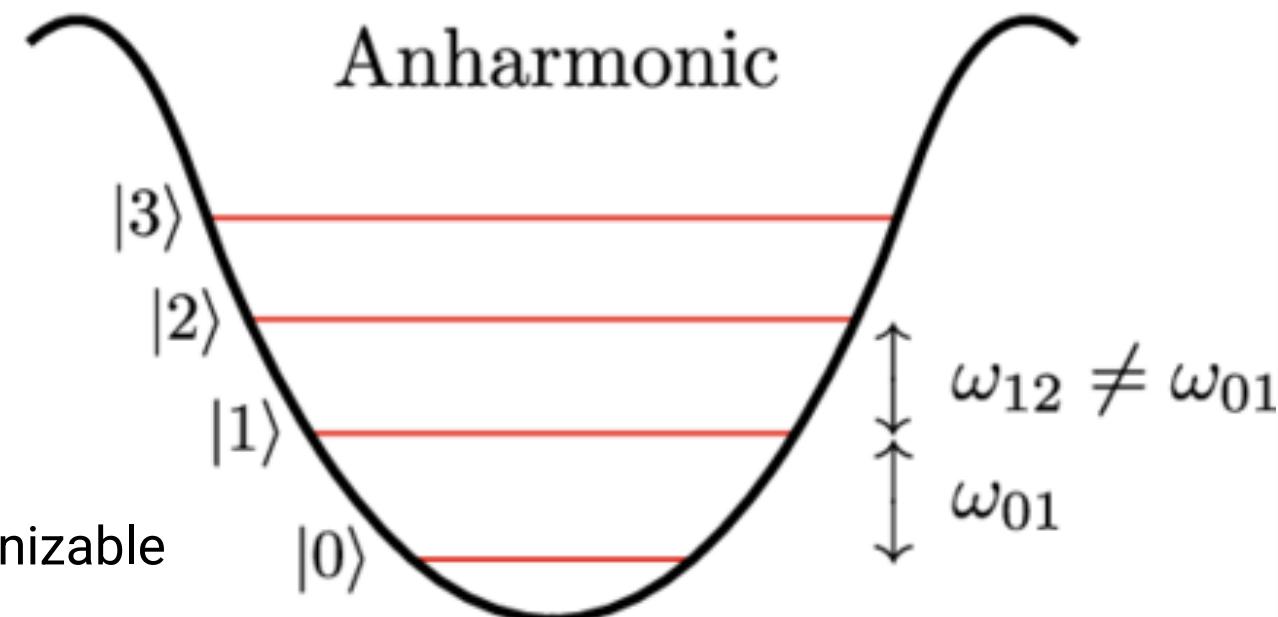
Amplitud

Modificada por campos externos (interacción resonante).

Fase

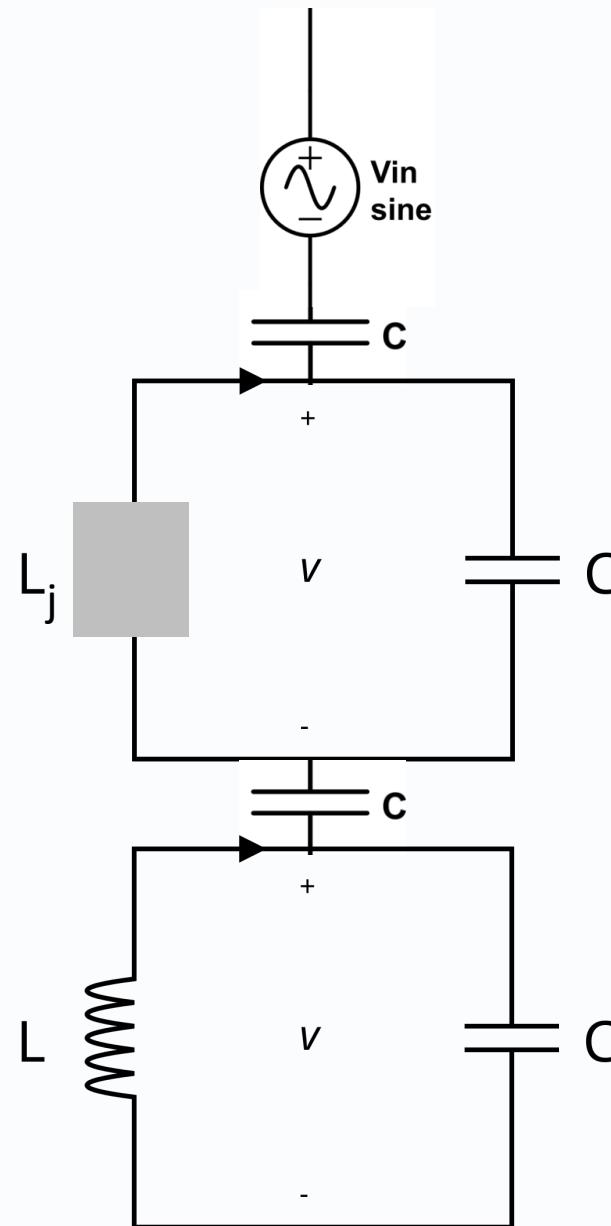
Modificada por diferencias de energía entre los estados (interacción fuera de resonancia)

El qubit es sintonizable

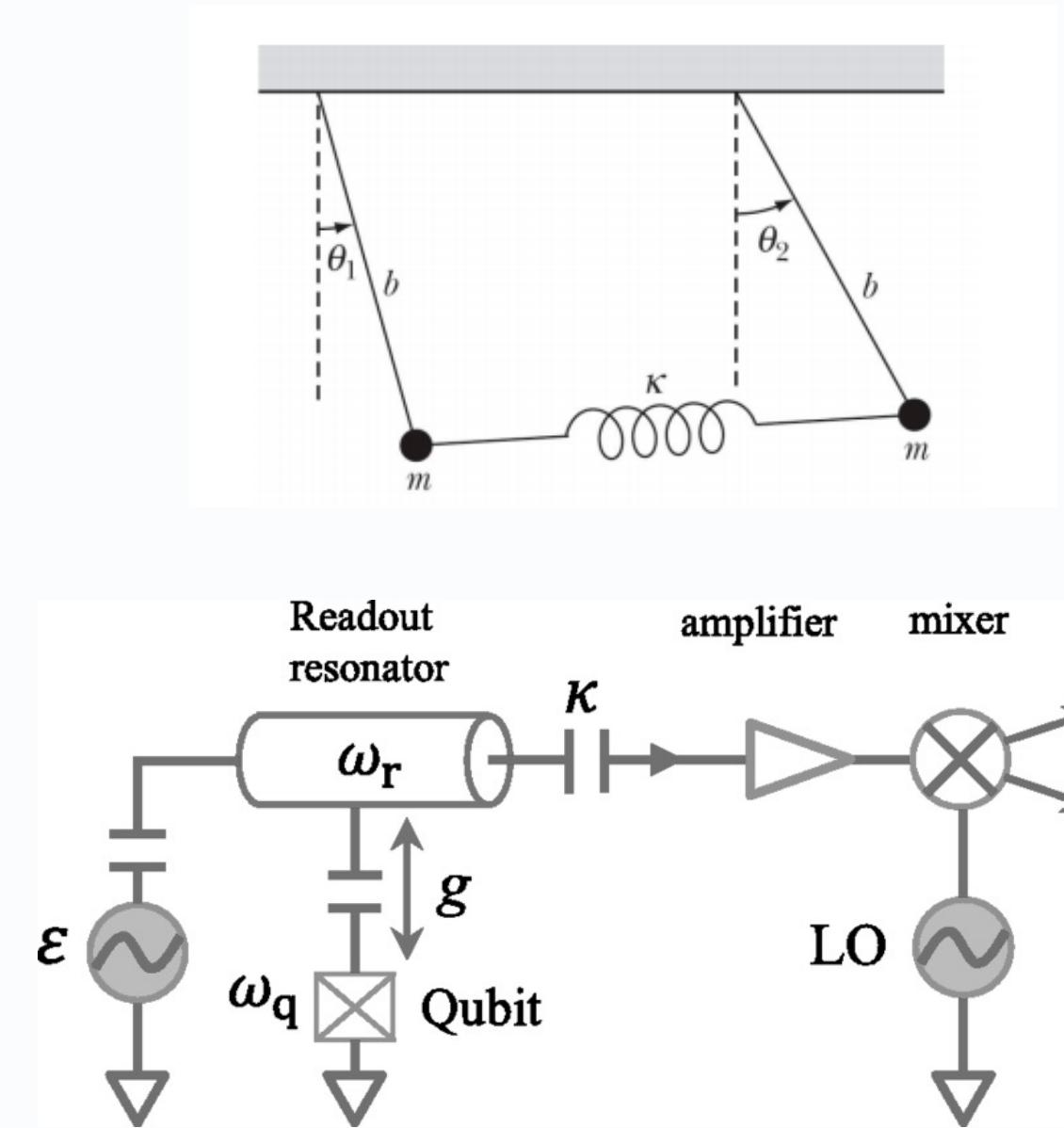


Operaciones básicas

Lectura: Oscilador acoplado



Análogo





Puertas lógicas



Puertas de qubit único

Pulsos de microondas.

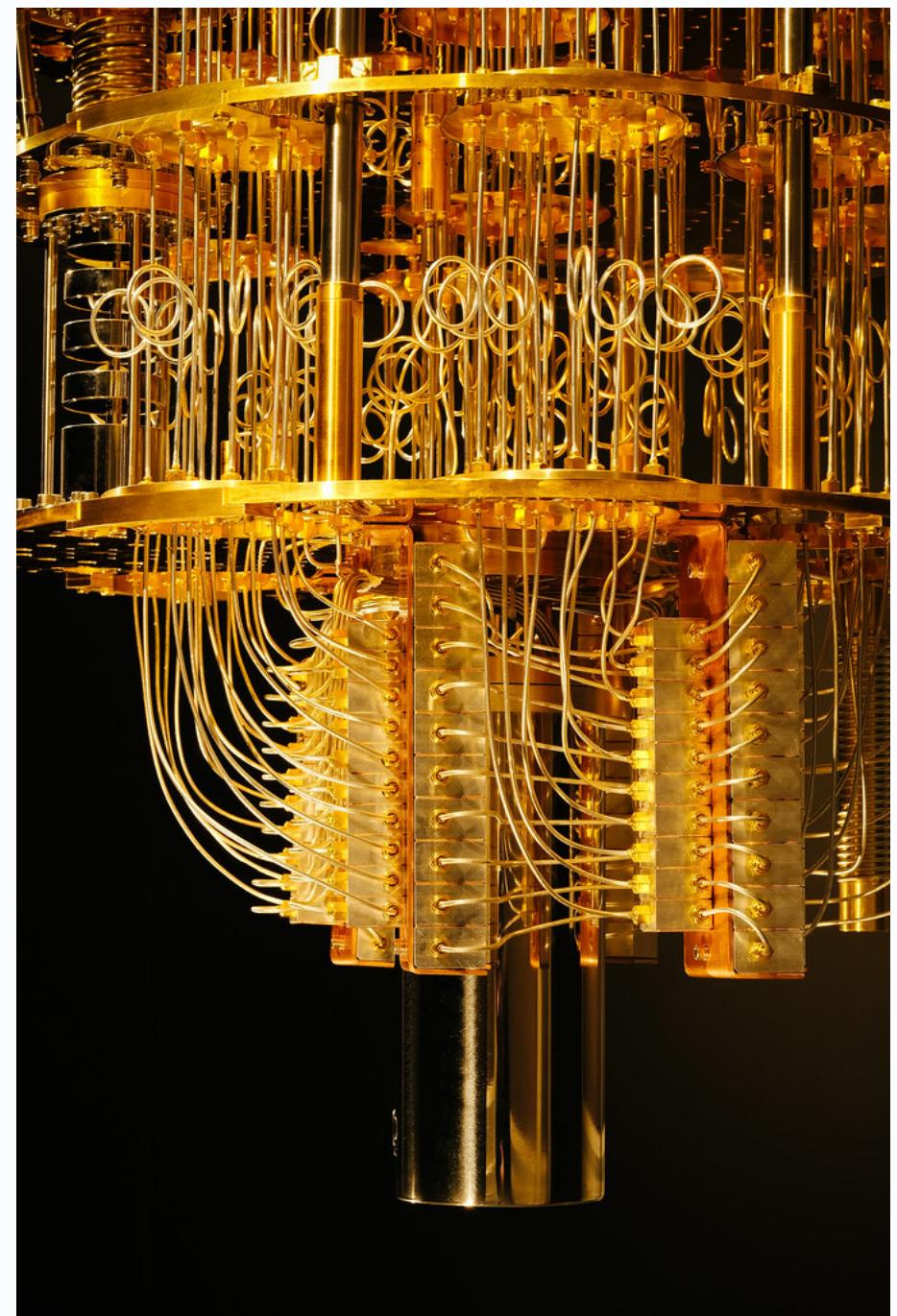
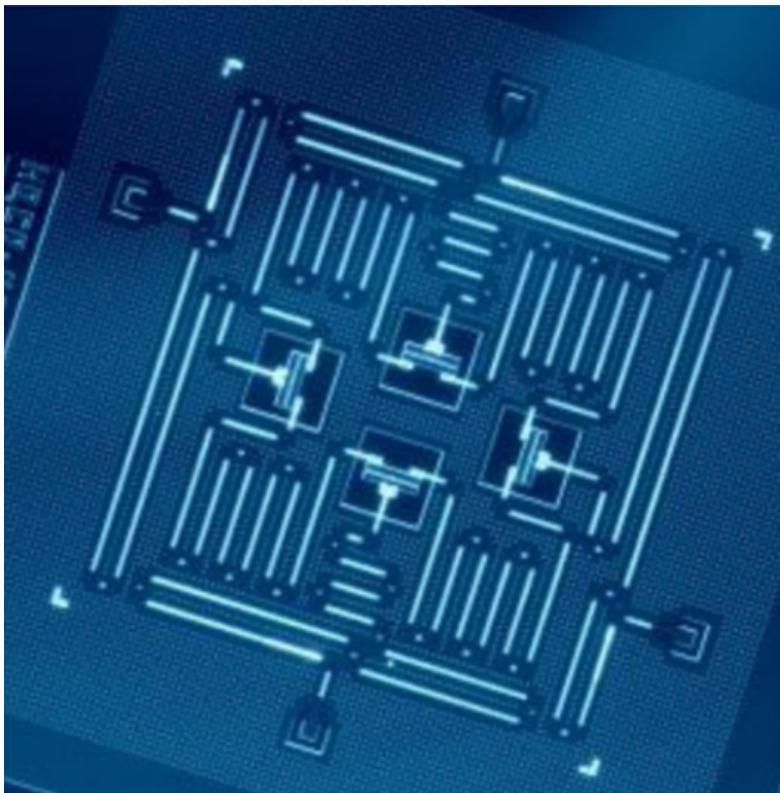
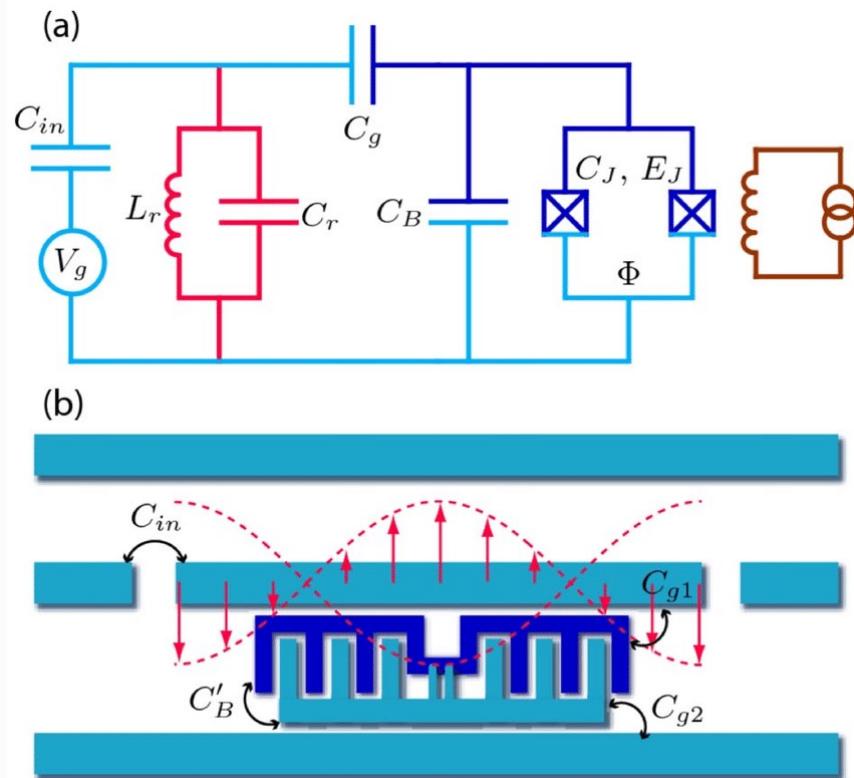


Puertas de entrelazamiento

Resonadores acoplados
Conectividad entre vecinos

¿Cómo se ven los qubits superconductores?

Transmon qubit



Actores y pros/contras

Actores

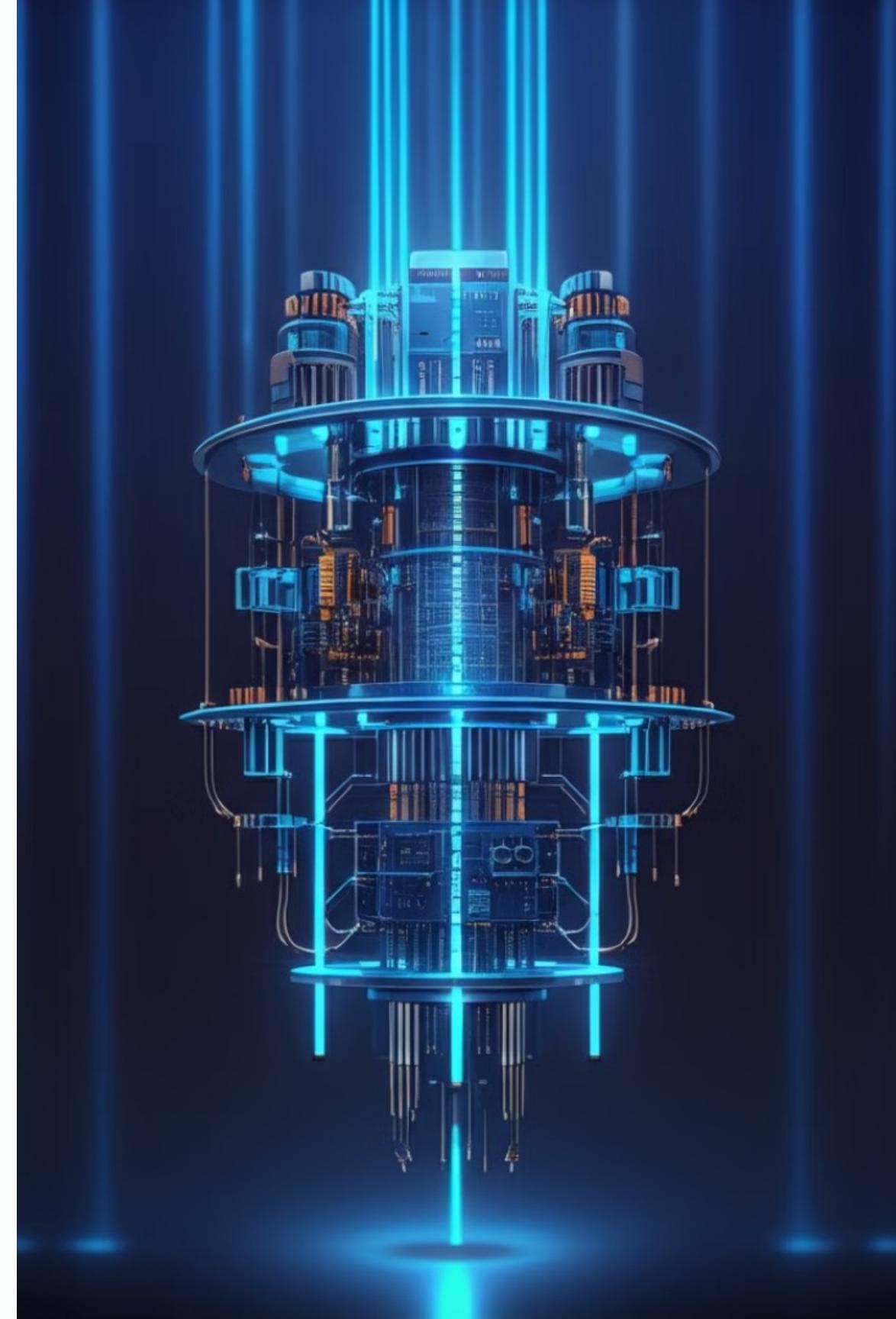
IBM, Google, Rigetti,
Amazon, D-Wave

Pros

Tecnología
relativamente
madura, que permite
implementar cientos
de qubits.

Contras

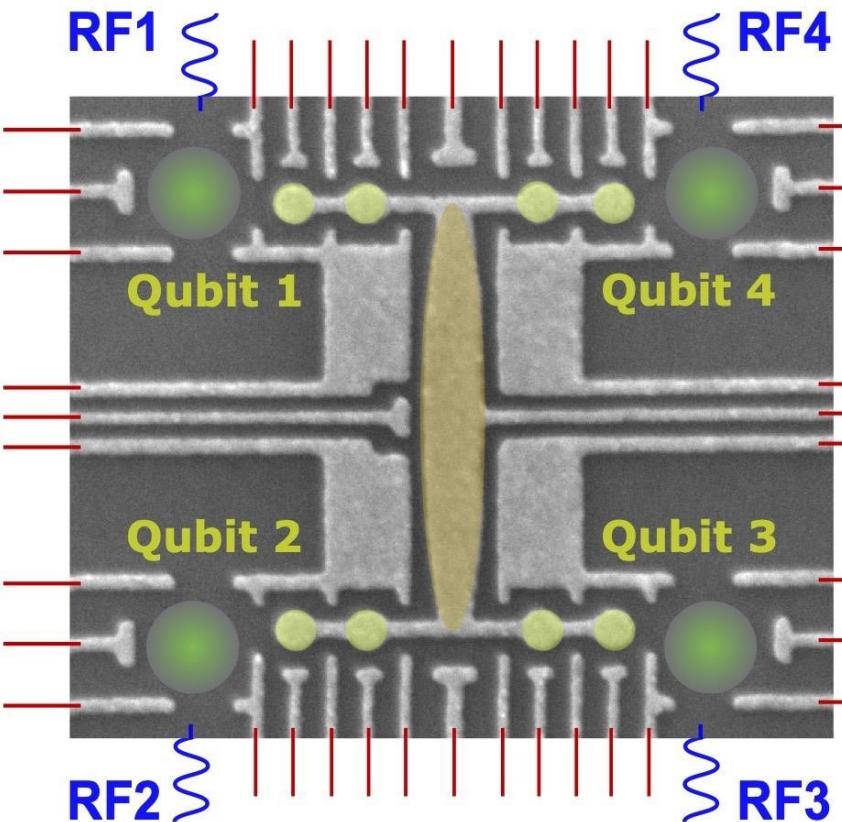
Limitaciones de
coherencia y ruido, lo que
exige técnicas de
corrección de errores muy
sofisticadas.



Qubits de espín en semiconductores

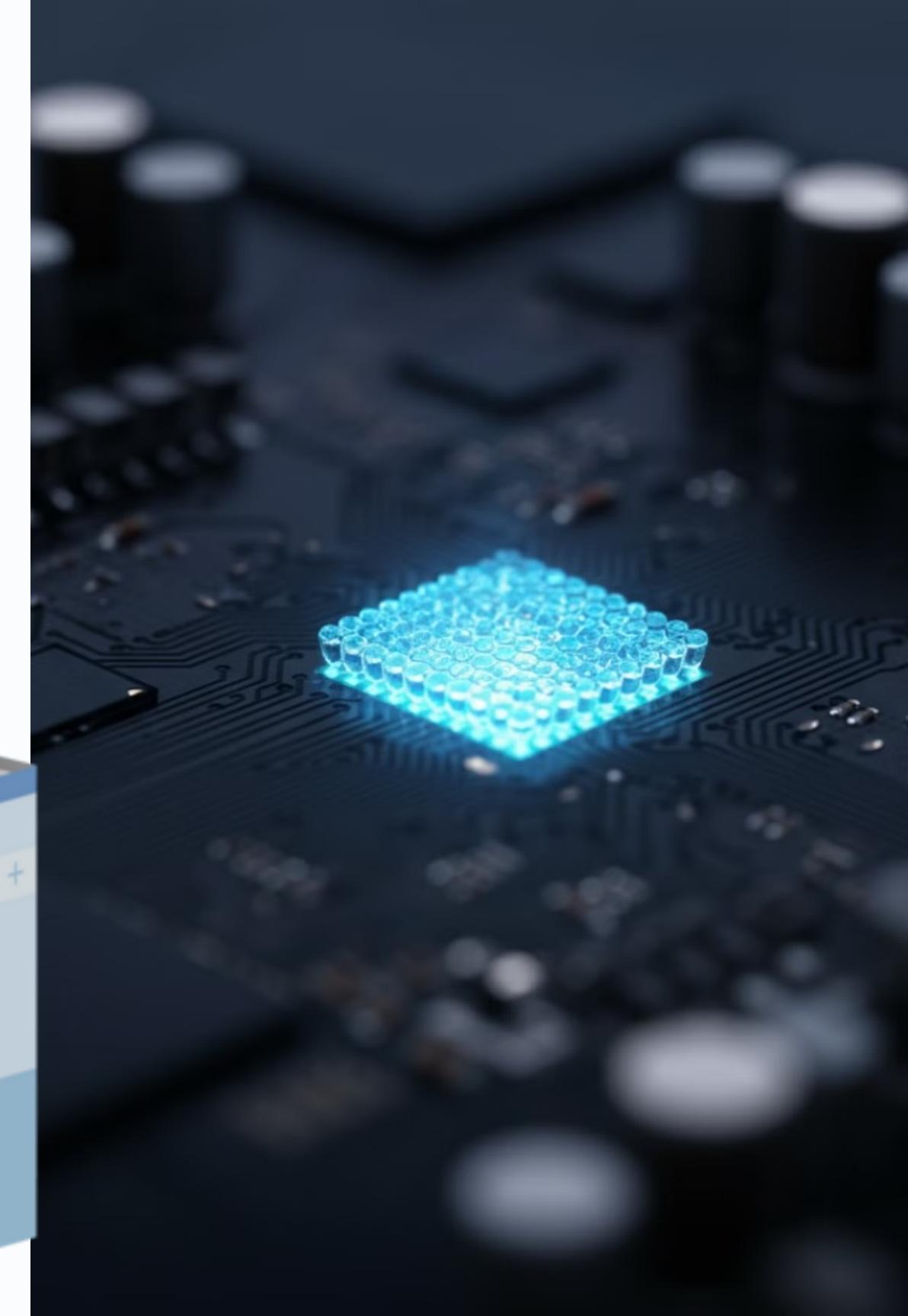
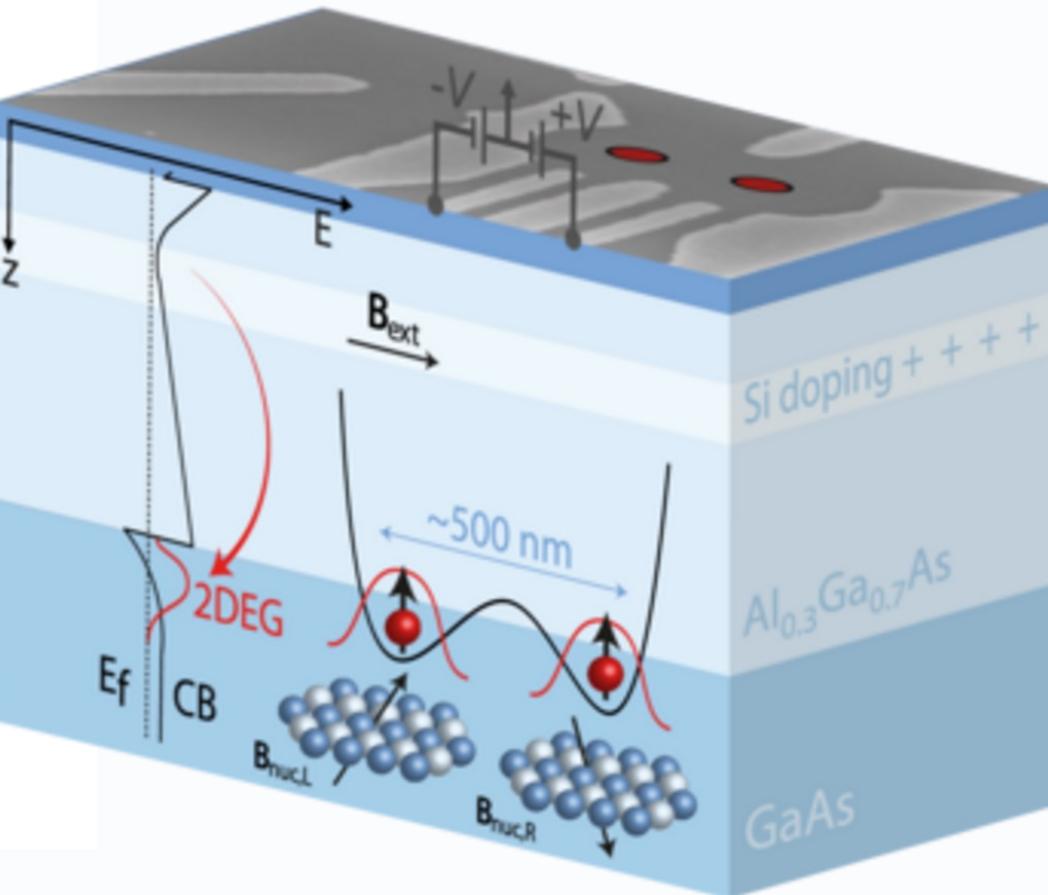
Descripción física

Electrones/agujeros en puntos cuánticos (Si, GaAs).



Spin como qubit

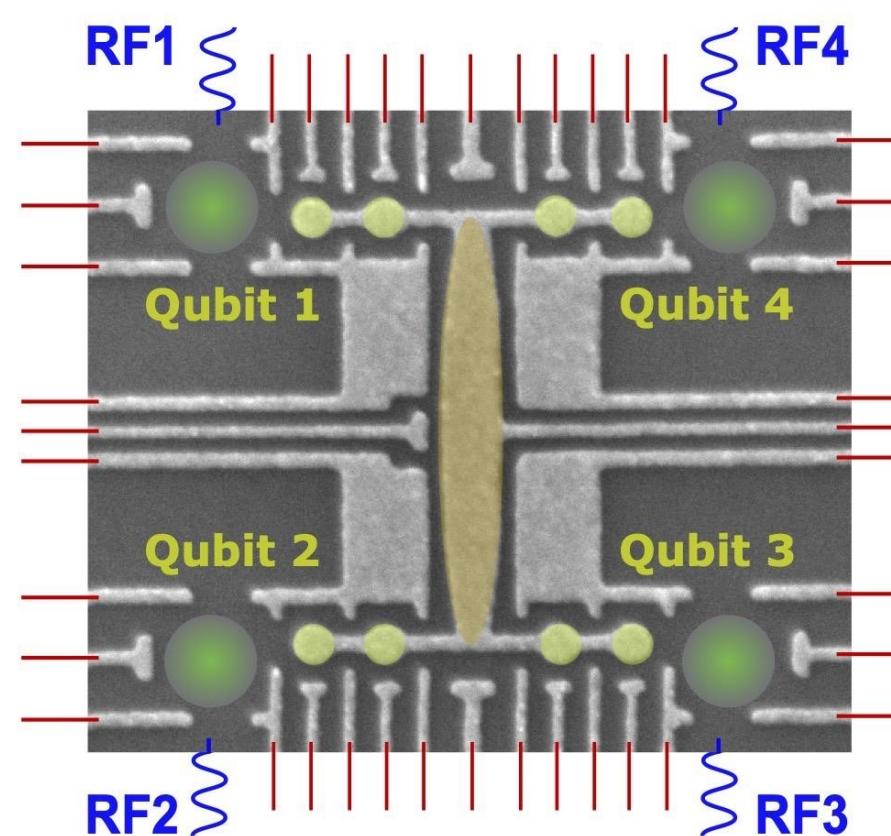
Spin como $| \uparrow \rangle = | 0 \rangle, | \downarrow \rangle = | 1 \rangle$.



Funcionamiento básico

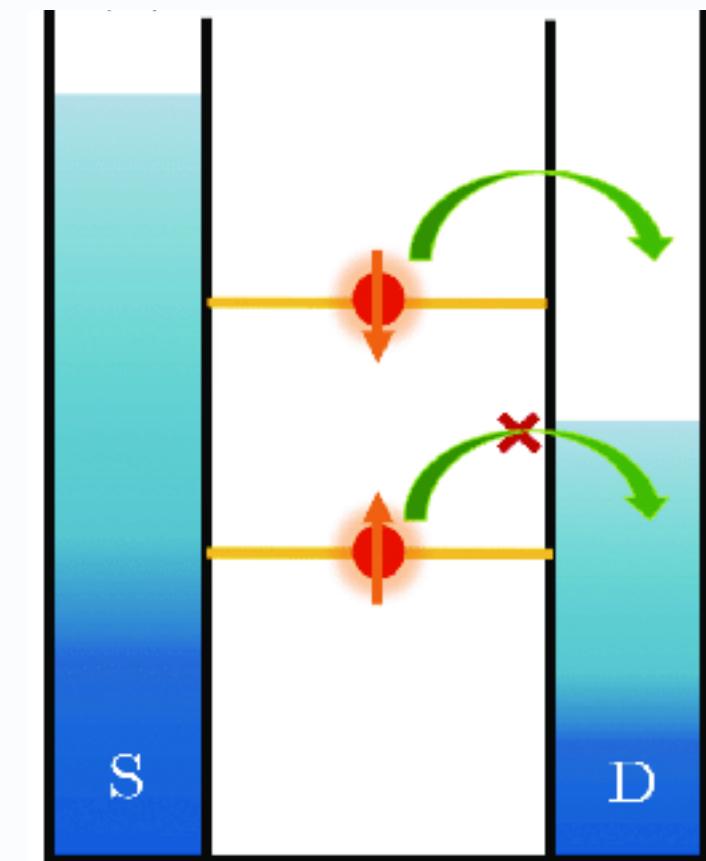
Control

Los qubits de espín se controlan mediante pulsos de microondas y campos magnéticos.



Lectura

La lectura se puede realizar mediante tunelado o dispersión óptica.



Puertas lógicas



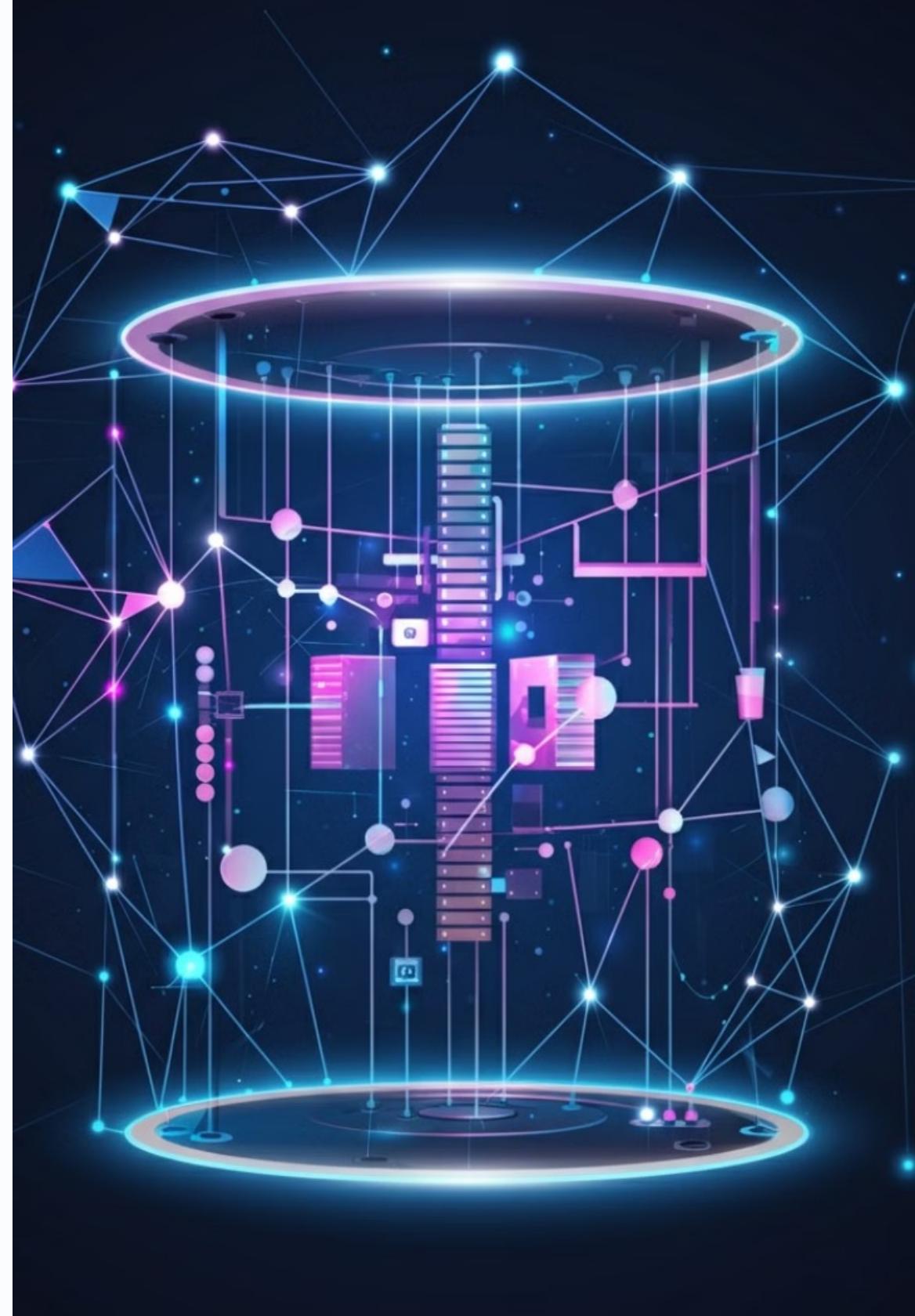
Puertas de qubit único

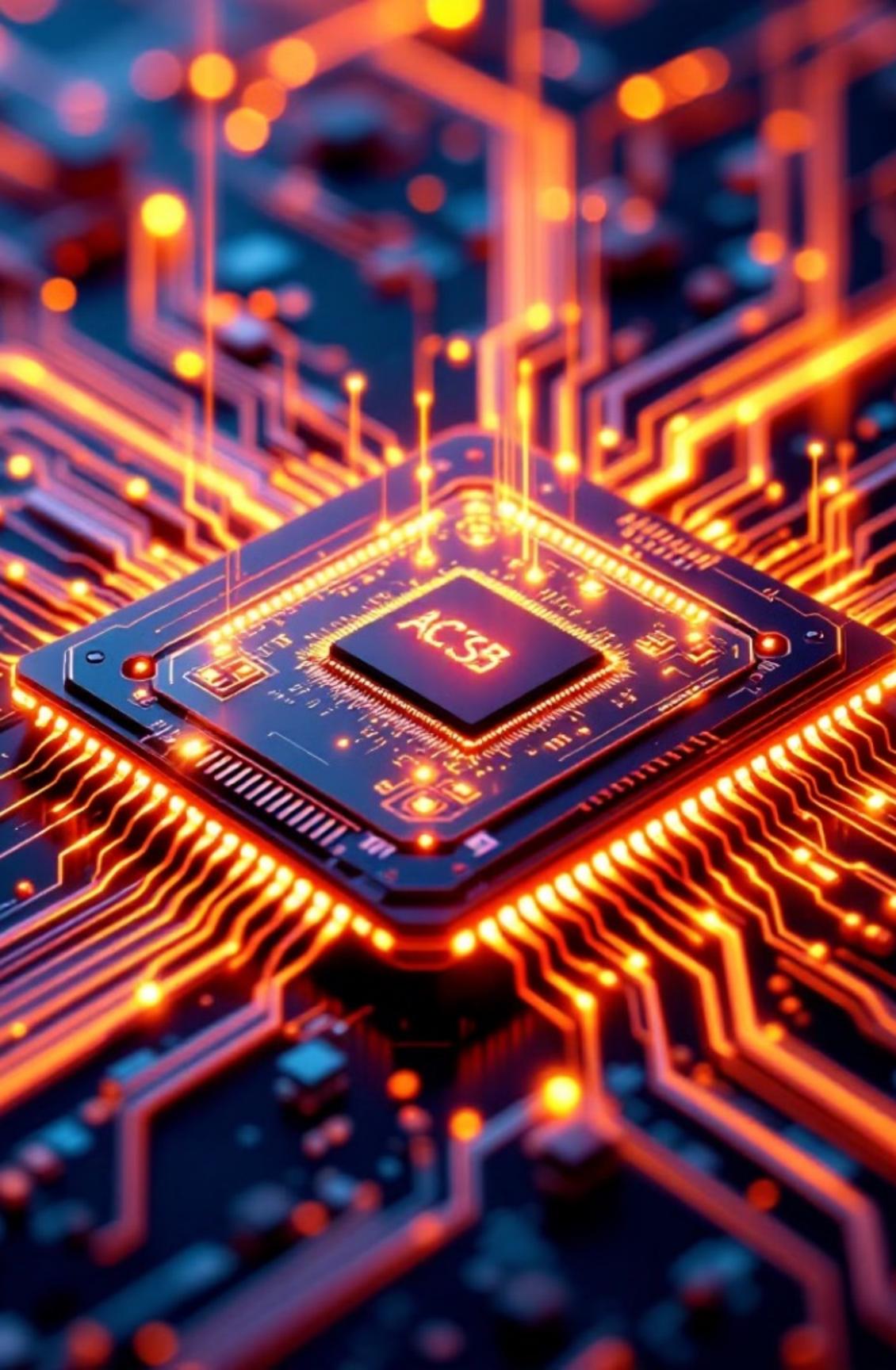
Microondas o pulsos ópticos



Puertas de entrelazamiento

Interacciones de intercambio (spin-spin)





Actores y pros/contras

Actores

Intel, Quobly, HRL (General Motors + Boing)

Pros

Potencial escalabilidad en la infraestructura de semiconductores.

Contras

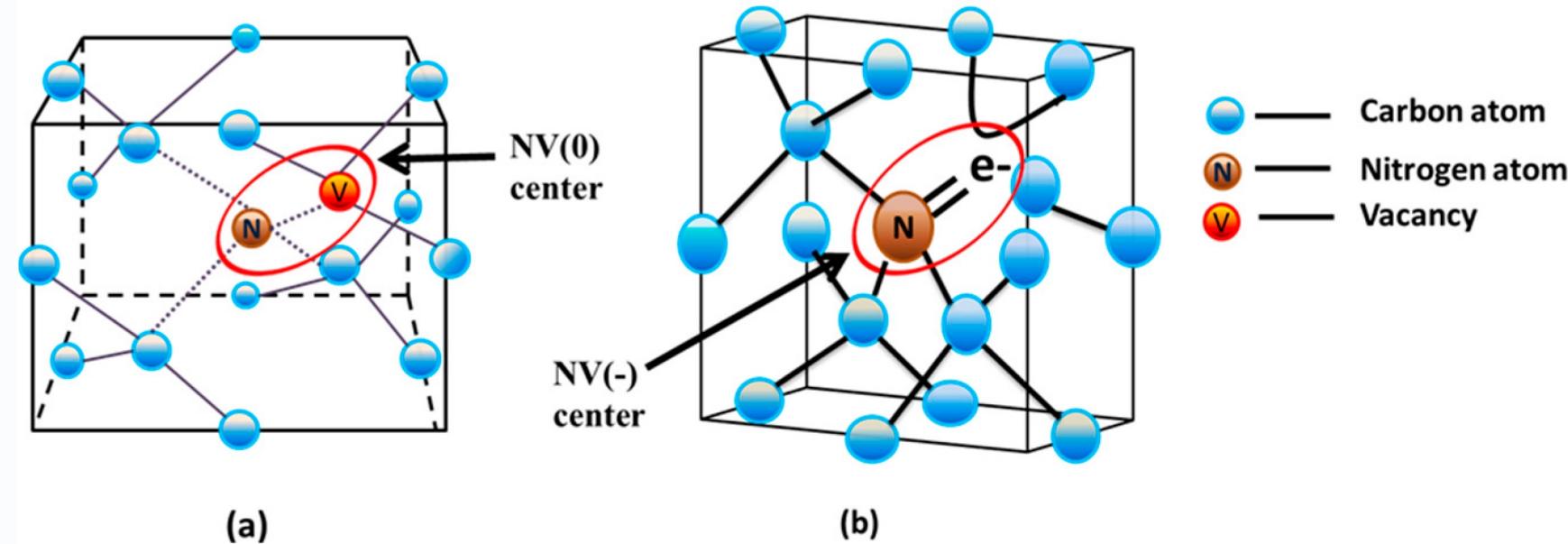
Tiempos de coherencia aún cortos, ingeniería muy compleja.



Defectos en sólidos (NV centers)

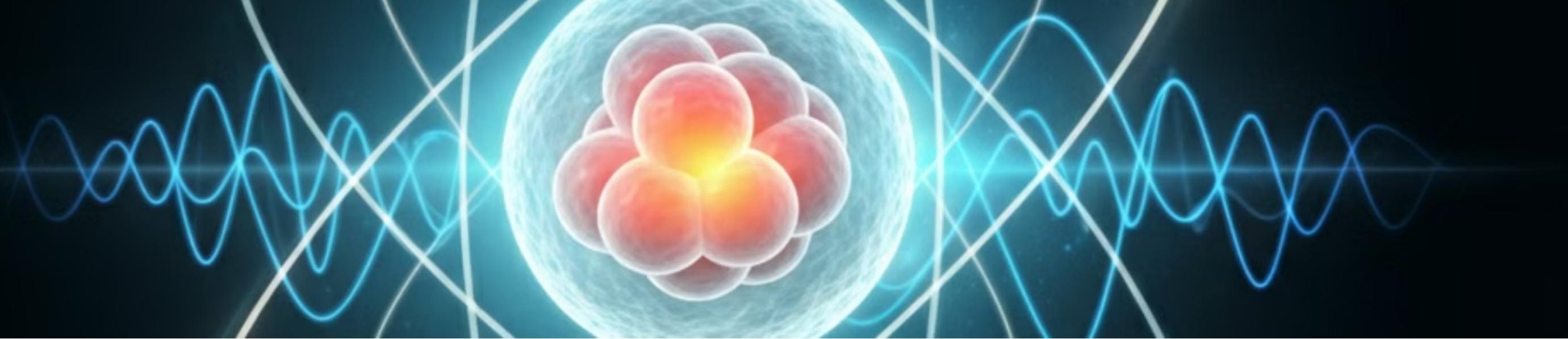
Descripción física

Un centro NV es un defecto puntual en la red cristalina del diamante.



Spin como qubit

Spin como $| \uparrow \rangle = | 0 \rangle, | \downarrow \rangle = | 1 \rangle$.



Lectura

La lectura se realiza mediante tunelado o dispersión óptica.



Puertas de qubit único

Microondas o pulsos ópticos

Sensores cuánticos

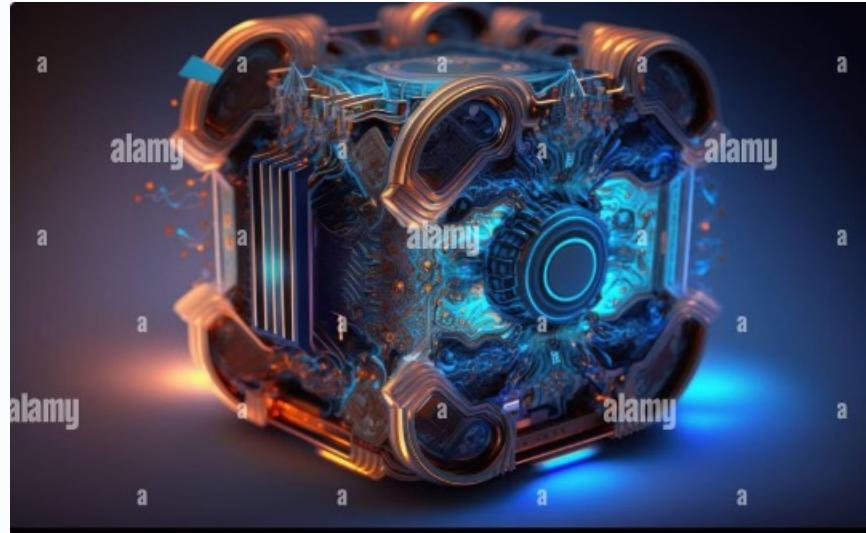
Magnetometría de alta sensibilidad para aplicaciones médicas y científicas.



Puertas de entrelazamiento

Interacciones de intercambio (spin-spin)

Actores y pros/contras



Actores

Quantum Brilliance, SaxonQ

Pros

Operan cerca de temperatura ambiente, excelentes en sensado.



Contras

Escalado complejo, fidelidades de compuerta relativamente bajas.



Qubits fotónicos

Descripción física

Codificación en polarización, fase o tiempo de llegada de fotones.



Lectura con detectores de fotones individuales



Entrelazamiento

Requiere no-linealidades o protocolos de medición.

Actores y pros/contras

Actores

PsiQuantum, Xanadu

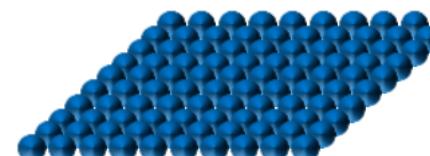
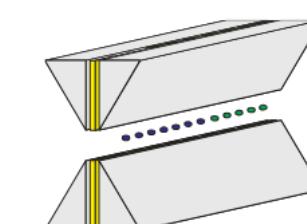
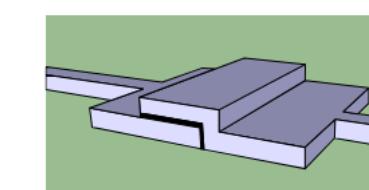
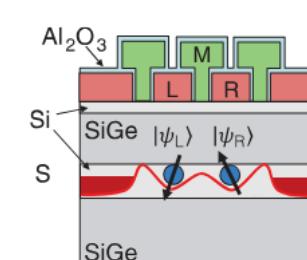
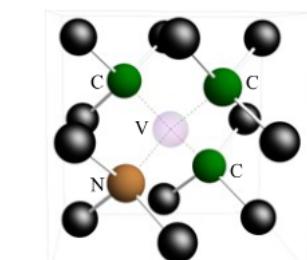
Pros

Coherencia larga, operación a temperatura ambiente.

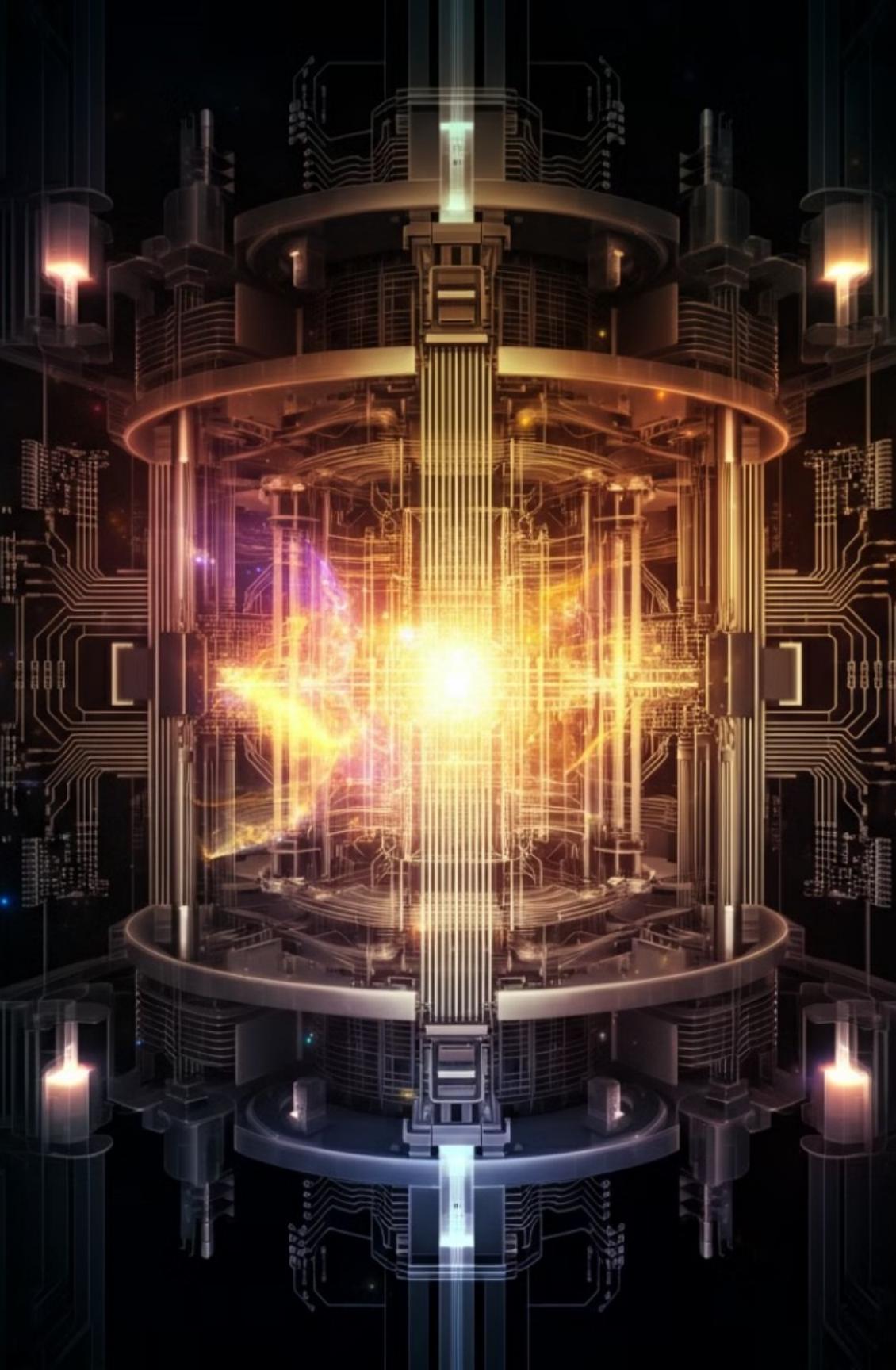
Contras

Difícil generar fuentes fotónicas puras y puertas de dos qubits confiables.



	atoms	electrons superconducting & spins			photons
					
cold atoms	trapped ions	superconducting	silicon	NV centers	photons
qubit size	about 1 μm space between atoms	about 1 μm space between atoms	$(100\mu)^2$	$(100\text{nm})^2$	$<(100\text{nm})^2$
best two qubits gates fidelities	99.5%	99.94%	99.68% (IBM Egret 33 qubits)	>99% (SiGe)	99.2%
best readout fidelity	95%	99.99%	99.4%	99% (SiGe)	98%
best gate time	$\approx 1 \text{ ns}$	0.1 to 4 μs	20 ns to 300 ns	$\approx 5 \mu\text{s}$	10-700 ns
best T_1	$> 1 \text{ s}$	0,2s-10mn	100-400 μs	20-120 μs	2.4 ms
qubits temperature	< 1mK 4K for vacuum pump	<1mK 4K cryostat	15mK dilution cryostat	100mK-1K dilution cryostat	4K to RT 4K-10K cryostats for photons gen. & det.
operational qubits	1,180 (Atom Computing)	32 (IonQ and Quantinuum)	433 (IBM) 176 (China)	12 (Intel) in SiGe	5 (Quantum Brilliance)-10 216 modes GBS (Xanadu)
scalability	up to 10,000	<100	1000s	millions	100s 100s-1M

(cc) Olivier Ezratty, 2023. RT = room temperature.



Cierre y perspectiva

Múltiples caminos

No hay un ganador claro en la carrera por la computación cuántica.

Crecimiento y desafíos

La computación cuántica está en rápido crecimiento, pero enfrenta grandes retos de ingeniería y física fundamental.

Invitación a explorar

Mientras más física aprendan, más detalles podrán entender de cada una de las plataformas.