



33. Lezione - introduzione computazione quantistica

Onde coerenti: laser olografia teletrasporto (Politecnico di Torino)

Lezione 33

Onde coerenti: laser, olografia, teletrasporto

Dr. Marco Fontana

Politecnico di Torino

Sommario

1 Computazione quantistica: principi base

2 Computazione quantistica: applicazioni

Computazione quantistica

La computazione quantistica si prefigge l'obiettivo di effettuare elaborazione di informazioni utilizzando come unità dell'informazione il quantum bit e le sue proprietà quantistiche.

La computazione quantistica quindi riunisce concetti che appartengono a diversi ambiti scientifici: **intendisciplinare**

- **meccanica quantistica:** sviluppata all'inizio del '900; controllo sperimentale raggiunto negli anni '70 (*relativamente recente*)
- **computer science:** nata nel 1936 con l'articolo di Turing dove si teorizza una macchina ideale in grado di eseguire algoritmi
- **teoria dell'informazione:** Shannon nel 1948 pubblica i primi due articoli sulla teoria dell'informazione e della comunicazione
- **crittografia:** insieme di tecniche utilizzate per rendere sicuro il passaggio di informazioni; nel 1984 Bennett e Brassard propongono il primo protocollo crittografico basato sulla meccanica quantistica

non c'era modo di sviluppare la teoria in laboratorio

senza controllo sperimentale
non c'era modo di sviluppare tecnologie come computer quantistici

solamente persone autorizzate possono decodificare e avere l'accesso

Quantum Bit

Concetto di bit quantistico

Come abbiamo visto in precedenza, il quantum bit (qubit) è uno stato quantistico rappresentabile da:

tot 3
gradi di
libertà



$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

autostati 0,1

4 gradi di libertà - $\text{Re } \alpha$ e $\text{Im } \alpha$ da 1
 $\text{Re } \beta$ e $\text{Im } \beta$ da 2
 2 gradi
 2 gradi
 utilizzata nei testi di
 comp. quant. perché in
 questo caso un po' più comodo

$$\alpha, \beta \in \mathbb{C} / |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

e' un modo di normalizzare 1 grado

realizzabile fisicamente tramite sistemi che esibiscono una proprietà misurabile la quale può assumere esclusivamente due valori, a cui sono associati i significati logici di 0 e 1.

permette di
paranebilizzare
come

Un modo equivalente per parametrizzare il qubit è il seguente:

altra
notazione

$$|\psi\rangle = e^{i\gamma} [\cos(\theta/2)|0\rangle + e^{i\phi}\sin(\theta/2)|1\rangle]$$

spostamento totale; si può vedere come sfasamento relativo tra i due contributi

3 gradi di libertà

normalizzazione
rispetto

$$|e^{i\gamma}| = 1 \quad |e^{i\phi}| = 1$$

$$\cos^2 \frac{\theta}{2} + \sin^2 \frac{\theta}{2} = 1$$

Possiamo inoltre ignorare γ in quanto rappresenta un termine di fase globale ininfluente dal punto di vista degli effetti misurabili e arriviamo all'espressione:

q bit definito
al minimo
necessario

$$|\psi\rangle = \cos(\theta/2)|0\rangle + e^{i\phi}\sin(\theta/2)|1\rangle$$

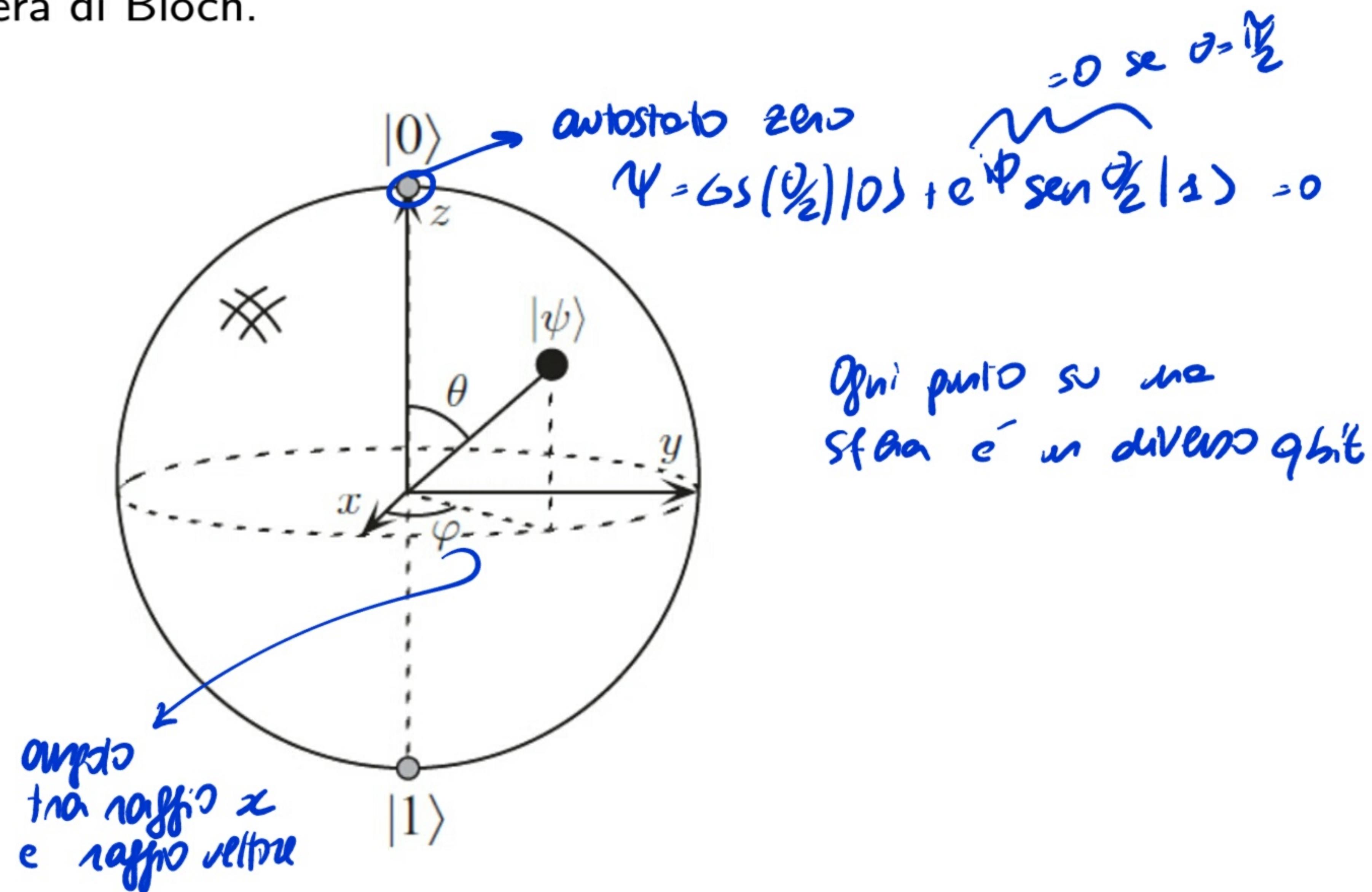
Abbiamo quindi che il qubit è descritto da 2 gradi di libertà fisicamente rilevanti.

\downarrow
 θ e ϕ

NON producono
effetti misurabili
NON contribuisce
ne alle normalizzazioni
ne all'interferenza

Rappresentazione della sfera di Bloch: possiamo rappresentare graficamente un qubit come un punto sulla sfera di Bloch.

gli angoli di θ e ϕ
individuano gli angoli
di un punto su una sfera



$$|\psi\rangle = \cos(\theta/2)|0\rangle + e^{i\phi} \sin(\theta/2)|1\rangle \quad \theta \in [0, \pi], \phi \in [0, 2\pi)$$

infiniti qbit possibili

Qbit e le loro proprietà - trasformazioni sulla sfera

Appare evidente dalla rappresentazione di Bloch che esistono **infiniti qubit**, dato che esistono infiniti punti diversi sulla sfera.

Dobbiamo però tenere a mente che nel momento in cui noi andiamo a misurare il qubit, possiamo ottenere esclusivamente due possibili valori: 0 e 1.

→ ciò che combina
e come evolvono
tra loro
ed interagiscono

I differenti coefficienti che identificano i qubit hanno due effetti principali:

- determinano la probabilità di ottenere 0 o 1
- determinano l'evoluzione del qubit e la sua interazione con altri qubit

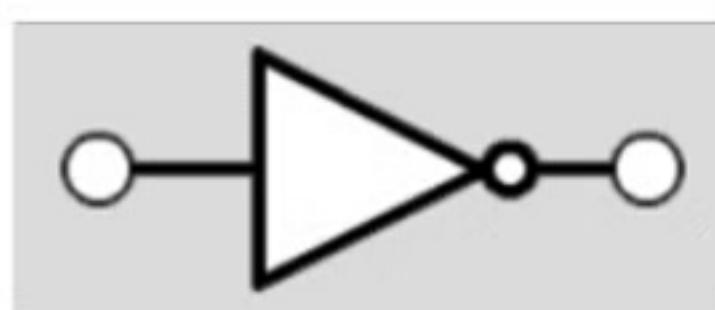
La ricerca nel campo della computazione quantistica si occupa di identificare schemi con i quali potere sfruttare le caratteristiche del qubit per l'elaborazione e la trasmissione di informazione.

"MANIPOLARE" I QBIT - passare da un qbit ad un altro

Nella **computazione classica**, la manipolazione di uno o più qubit è effettuata attraverso componenti chiamate **porte logiche**. Considerando il caso più semplice (un qubit in input, un qubit output), nella computazione classica l'unica possibile porta logica con azione non triviale sul bit è la seguente:

NOT

clamis:



INPUT	OUTPUT
0	1
1	0

per modificare un bit:

- s dispositivo che lascia inalterato
- s scambia (NOT)

ma saranno anche oo porte logiche

Porte logice
matrice

questo update
a clamis,
ma di qbit se
ne hanno oo
→ si possono
mentre i
geniali d e β

Nella **computazione quantistica**, la porta NOT può essere rappresentata tramite una matrice:

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad X |\psi\rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta \\ \alpha \end{bmatrix}$$

Infatti abbiamo che:

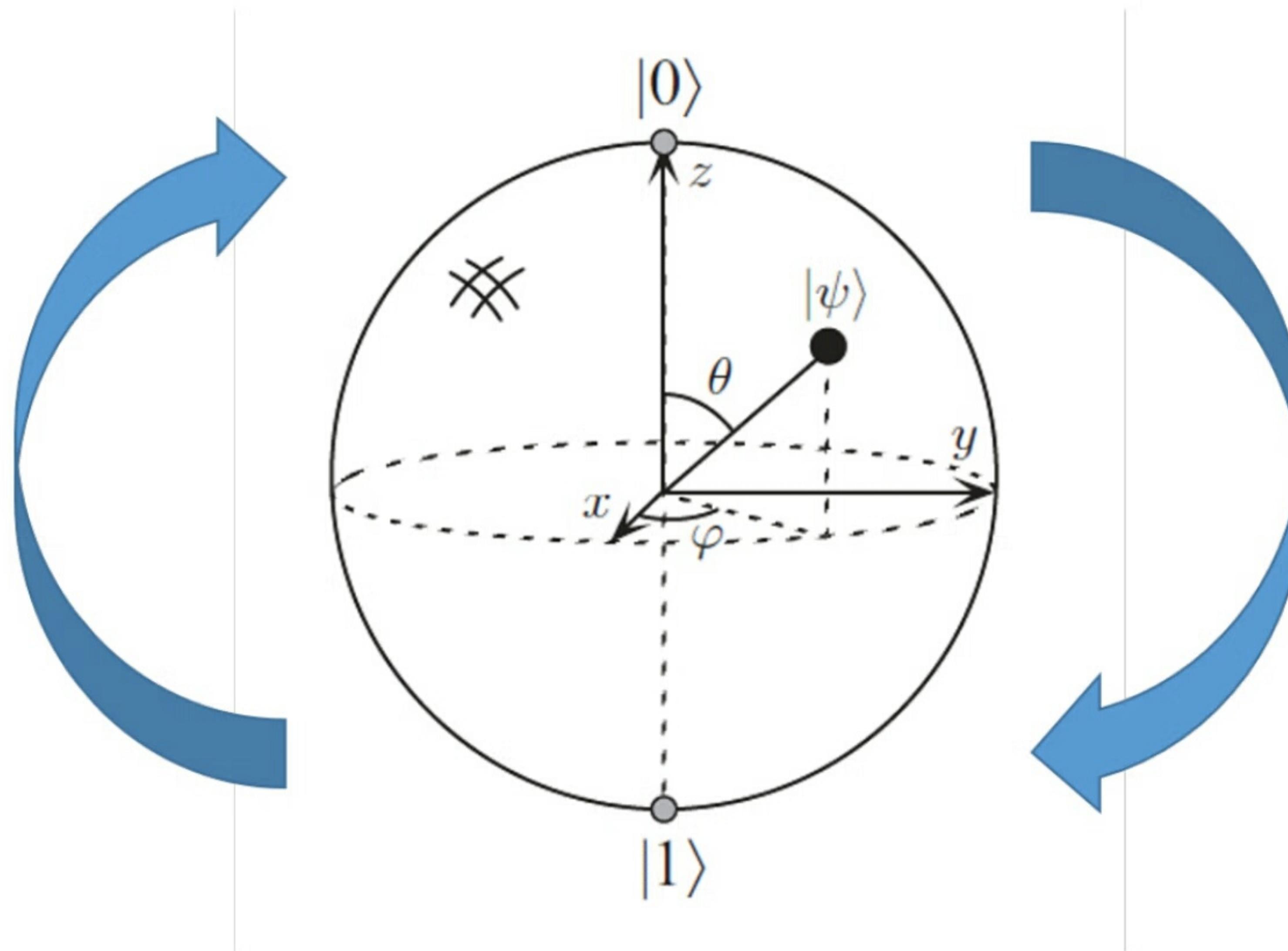
$$X |0\rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = |1\rangle$$

$$X |1\rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = |0\rangle$$

Scambie
la componente
di sopra e
quelle di sotto

operator che dell'autostato
che dell'autostato fornisce l'autostato
e ricevere
mento M.Q. e quindi
rappresentabile qbit come
un vettore
→ oggetto che prende in vettore → e fornisce in alto
rappresentabile che opera sullo spazio vettoriale di riferimento

La porta NOT in ambito quantistico è chiamata X in quanto corrisponde a una rotazione di π attorno all'asse x nella rappresentazione dei qubit tramite sfera di Bloch.



$$X |0\rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = |1\rangle \quad X |1\rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = |0\rangle$$

notazione
intorno x
(quando chiamate così)

A differenza del caso classico, esistono nella computazione quantistica **infinite porte logiche**, rappresentabili come matrici 2×2 a elementi complessi.

L'unico requisito che deve rispettare una matrice U che rappresenta una porta logica a

singolo qubit è l'**unitarietà**:

*Si vuole conservare il corretto calcolo di probabilità:
il collegamento con M.Q. e quindi deve lo stesso sia 1*

$$U^\dagger U = 1$$

matrice identica

dove U^\dagger rappresenta la matrice **aggiunta** di U (il complesso coniugato della trasposta).

Il requisito di unitarietà è necessario per preservare la normalizzazione degli stati che rappresentano il qubit (e quindi l'interpretazione probabilistica) come output della porta logica; infatti abbiamo che:

$$|\psi\rangle \Rightarrow |\psi'\rangle = U|\psi\rangle$$

$$\langle\psi'| |\psi'\rangle = \langle\psi| U^\dagger U |\psi\rangle = \langle\psi| 1 |\psi\rangle = \langle\psi| |\psi\rangle$$

Nota: le matrici che consentono a Bob di recuperare lo stato di Alice tramite teletrasporto quantistico (vedi lezioni sul teletrasporto quantistico) sono unitarie!

Possiamo anche visualizzare la conservazione della normalizzazione degli stati da parte di operatori unitari tramite la rappresentazione matriciale.

La norma del generico qu-bit si calcola come:

$$\langle \psi | \psi \rangle = [\alpha^* \quad \beta^*] \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

ma ^è ^{metà} del prodotto scalare complesso
^{normalizzato}

A seguito di una trasformazione U , abbiamo:

$$|\psi\rangle = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \Rightarrow |\psi'\rangle = U \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$$

^{un nuovo qbit}

Calcoliamo la norma del nuovo qu-bit:

$$\langle \psi' | \psi' \rangle = [\alpha^* \quad \beta^*] U^\dagger U \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \langle \psi | \psi \rangle$$

$$\underbrace{\text{se } U^\dagger U}_{\text{è}} = 1$$

Unitarietà garantisce che i qu-bit trasformati mantengono normalità = 1
 → Si conserva il prodotto scalare complesso e la probabilità quantistica

Principali porte logiche quantistiche a singolo qubit

tra le principali

NOT gate

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad X |\psi\rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta \\ \alpha \end{bmatrix}$$

Rotazione
sulle sfere
di Bloch
intorno all'asse
y

Y gate

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \quad Y |\psi\rangle = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i\beta \\ i\alpha \end{bmatrix}$$

1/1
2

Z gate

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad Z |\psi\rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ -\beta \end{bmatrix}$$

mischia;
antimischia
 α e β

Hadamard gate

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad H |\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \alpha + \beta \\ \alpha - \beta \end{bmatrix}$$

Sistemi a 2 qubit

SISTEMI DI QUBIT 2 qubit (es. rotori entangled)

Stati di base per il qubit A e il qubit B:

$$|0\rangle_A = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}_A \quad |1\rangle_A = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}_A \quad |0\rangle_B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}_B \quad |1\rangle_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}_B$$

Definiamo la notazione utilizzata convenzionalmente per la computazione quantistica:

$$|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}_A \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{A,B}$$

$$\rightarrow \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{A,B} \equiv |00\rangle$$

normalmente scritto nei testi di computazione quantistica

$$|0\rangle_A \otimes |1\rangle_B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}_A \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{A,B}$$

$$\rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{A,B} \equiv |01\rangle$$

generalmente sempre messo le virgolette di prodotto tensoriale \otimes

rifinito allo stato B
rifinito allo stato A

$$|1\rangle_A \otimes |0\rangle_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}_A [1 \quad 0]_B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}_{A,B} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{A,B} \equiv |10\rangle$$

$$|1\rangle_A \otimes |1\rangle_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}_A [0 \quad 1]_B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{A,B} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{A,B} \equiv |11\rangle$$

Si rappresentano porte logiche che agiscono su più qubit tramite matrici unitarie di dimensione maggiore.

Ad esempio, l'operatore CNOT che agisce su due qubit nel modo seguente:

$$|00\rangle \rightarrow |00\rangle ; \quad |01\rangle \rightarrow |01\rangle ; \quad |10\rangle \rightarrow |11\rangle ; \quad |11\rangle \rightarrow |10\rangle$$

$$U_{CNOT} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Sistemi a qubit multipli

a 3 qubit

Seguendo lo stesso approccio, si possono costruire sistemi di qubit multipli, descrivibili nello spazio vettoriale generato dal prodotto tensoriale delle basi computazionali.

Sistema di N qubit

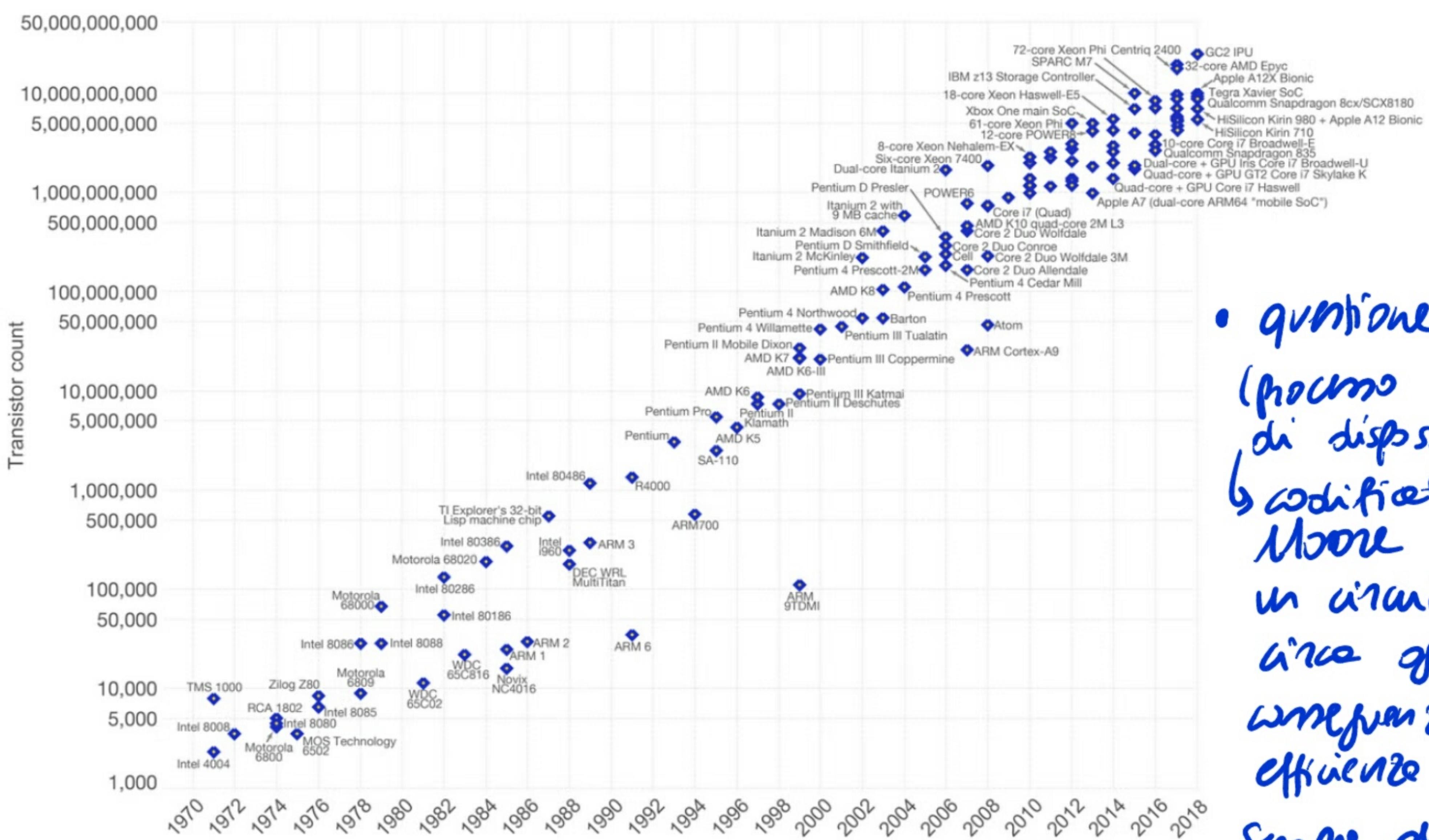
$$|\psi\rangle = \sum_{i_1, i_2, \dots, i_N} \alpha_{i_1, i_2, \dots, i_N} |\psi\rangle_{i_1} \otimes |\psi\rangle_{i_2} \dots \otimes |\psi\rangle_{i_N}$$

Esempio: stati di base per un sistema a 3 qubit:

	$ 000\rangle$	$ 001\rangle$	$ 010\rangle$	$ 011\rangle$
<i>Omissione simbolo X</i>	$ 100\rangle$	$ 101\rangle$	$ 110\rangle$	$ 111\rangle$

Motivazioni per la computazione quantistica

- il processo di miniaturizzazione della attuale tecnologia ha raggiunto scale dimensionali talmente piccole da portare all'emergere di fenomeni di confinamento quantistico



Legge di Moore; <https://ourworldindata.org/uploads/2019/05/Transistor-Count-over-time-to-2018.png>

Motivazione pratica, applicative della computazione quantistica

- questione di ordine pratico
(numero di progresso tecnologico
di dispositivi tecnologici)
↳ codificata nelle leggi di
Moore - i transistori in
un circuito integrato raddoppiano
circa ogni 18 mesi e di
conseguenza aumenta la sua
efficienza computazionale.

to-2018.png

Se sempre di più, ma nello stesso
volume → transistor sempre
più piccoli - neode o confine tra
meccanica classica e quantistica

- computazione basata su proprietà quantistiche potrebbe rendere intrinsecamente più efficiente la simulazione di sistemi quantistici
- la computazione quantistica costituisce da un lato una spinta verso l'esplorazione teorica della meccanica quantistica e dall'altro lato un test sperimentale per la meccanica quantistica
- le peculiari proprietà dei sistemi fisici permettono di sviluppare algoritmi completamente nuovi, i quali potenzialmente potrebbero permettere di risolvere alcuni problemi più velocemente (potenziali applicazioni in chimica, intelligenza artificiale, servizi finanziari, fisica delle alte energie...)

Pensare e
possibili
algoritmi quantistici
→ scoprire nuovi
dettagli

fine anni ('70) ←
diceva che i
computer classici
non fossero
efficieni a simolare
modelli quantistici;
potrebbe essere
molto più efficace
usare un computer
che si basa sulle
stesse proprietà



<http://www.science.nus.edu.sg/newshub/2509-new-artscience-museum-exhibit-illustrates-quantum-computing>

SITUAZIONE ATTUALE

Nonostante le promettenti caratteristiche della computazione quantistica, l'effettiva implementazione tecnologica è ancora allo stato embrionale e richiede enormi sforzi da parte dei ricercatori. Infatti, è molto complesso ideare e fabbricare dei sistemi che permettano di rispettare i requisiti di un computer quantistico.

• realizzazione qubit

Requisiti di un computer quantistico

nella realizzazione

- i qubit devono essere facilmente controllabili (dall'utente e non...)
- i qubit devono essere isolati dall' ambiente esterno, in modo da non subire modificazioni casuali e incontrollabili (limitare la decoerenza quantistica) perdita di donne di capacità originale ai fenomeni
- la tecnologia con cui vengono fisicamente implementati i qubit deve essere scalabile

↳ industrializzabile

che permette miglioramento metodi di produzione futuro

Esistono attualmente tre principali architetture di computer quantistici:

- **trappole ioniche:** il qubit è implementato tramite due differenti stati elettronici di uno ione ioni singoli che hanno due livelli energetici a cui si associano zero e uno
- **quantum dot:** all'interno dei quantum dot (regioni di materiale semiconduttore con confinamento nanometrico) è possibile isolare e controllare singoli elettroni liberi, utilizzando il loro stato di spin come qubit
- **superconduttori:** il qubit è implementato attraverso elementi di circuiti basati su materiali superconduttori

↳ hanno portato a computer quantistici attualmente più avanzati

Computer quantistici

Architettura basata su trappole ioniche

Trappole ioniche sono utilizzate per isolare e controllare ioni, il cui stato quantistico può venire controllato tramite l'utilizzo di laser.

- isolare ioni
- controllare livello energetico
che assume e le
passaggio fra i due
livelli

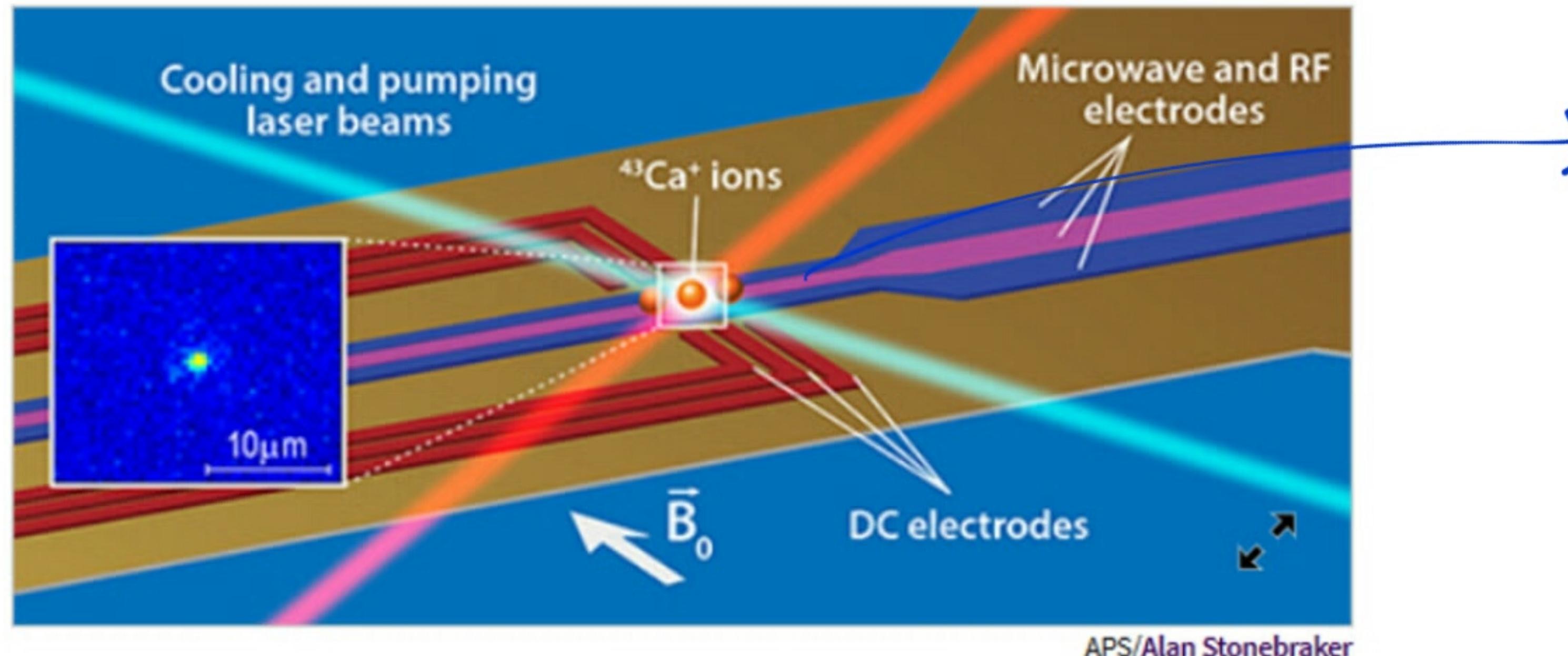
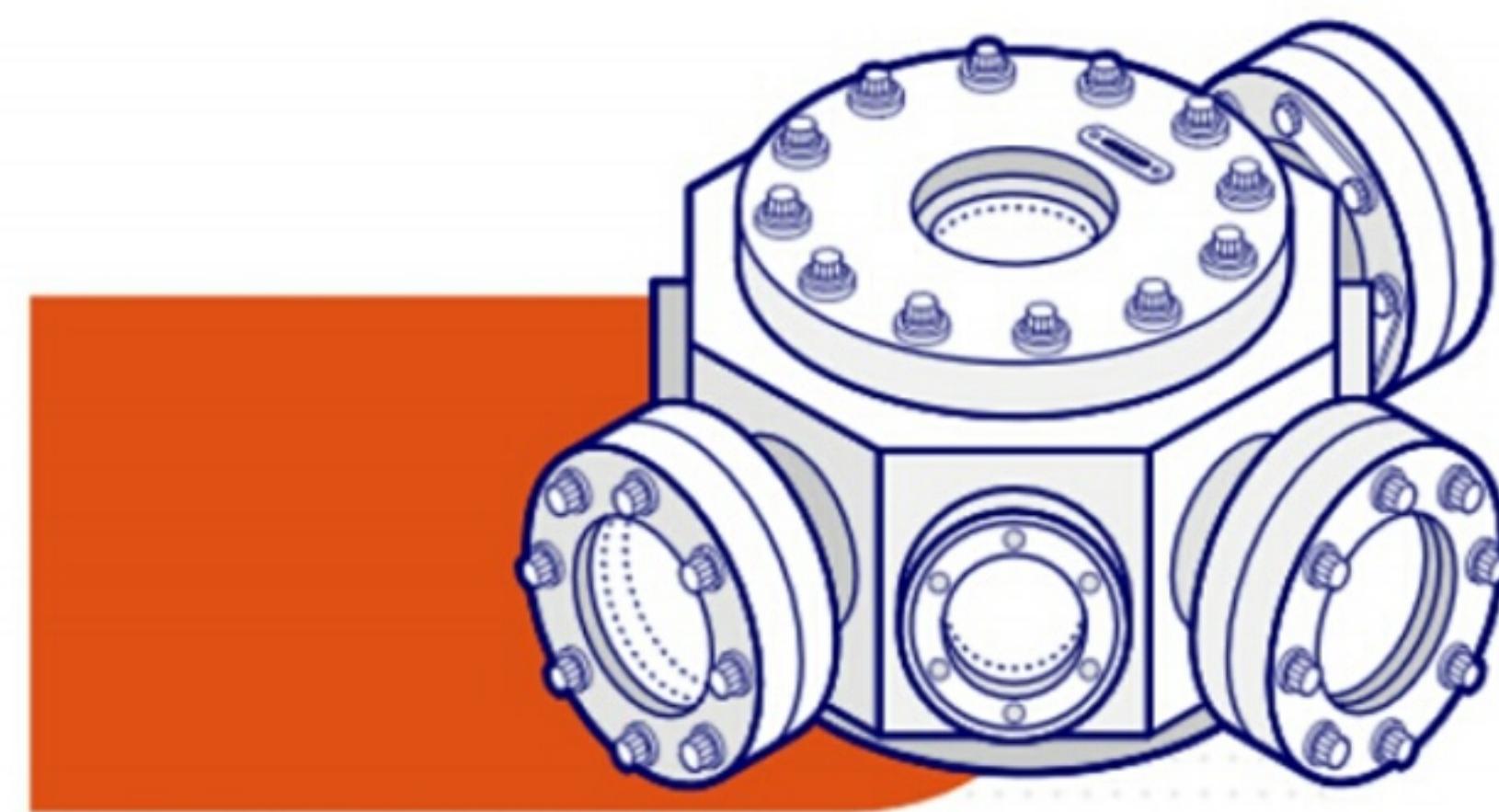


Figure 1: Qubits made of a trapped $^{43}\text{Ca}^+$ ion. RF and dc electrodes provide a trapping field for the ions, which are cooled by laser beams (blue) to microkelvin temperatures. A combination of laser pumping and microwave signals can deterministically prepare the qubit in a $|0\rangle$ or $|1\rangle$ state, and the state can be read out by monitoring its fluorescence (only $|1\rangle$ states result in the fluorescence, similar to that shown in the inset). Further logical gate operations can be carried out by applying various combinations of microwave pulses. The scheme yields preparation and readout errors of less than 0.07% and logic-gate errors of less than 10^{-6} .

PRL 113, 220501 (2014)

Esistono proposte di computer quantistici commerciali basati su trappole ioniche (<https://ionq.co/>).



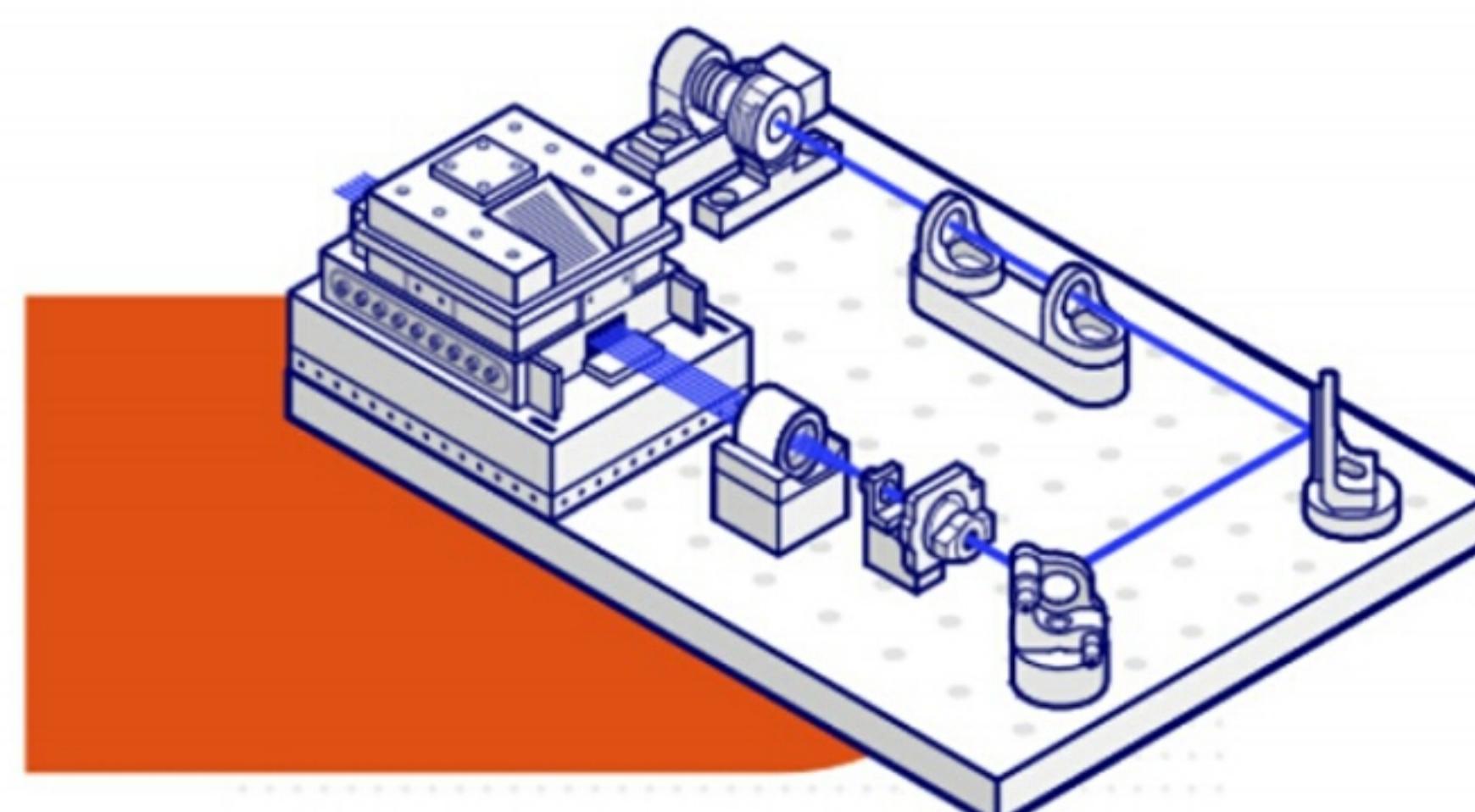
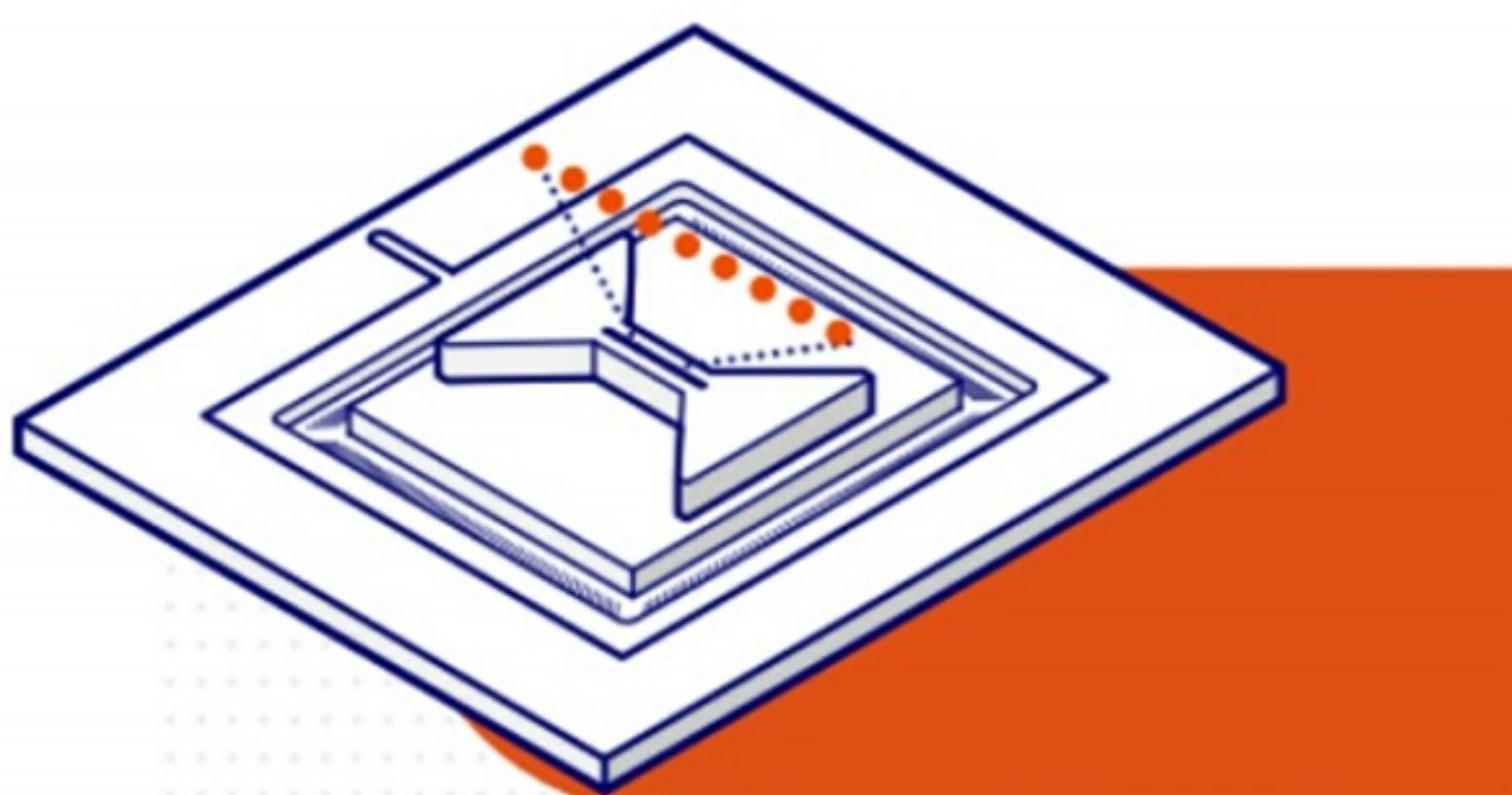
Flexible Ion Trap Technology

In an ultra-high vacuum chamber,^⑤ we dynamically deploy and trap atomic qubits on a silicon chip using electromagnetic fields. This allows our quantum cores to adjust their configuration in software, and scale to handle potentially hundreds of qubits without new hardware.



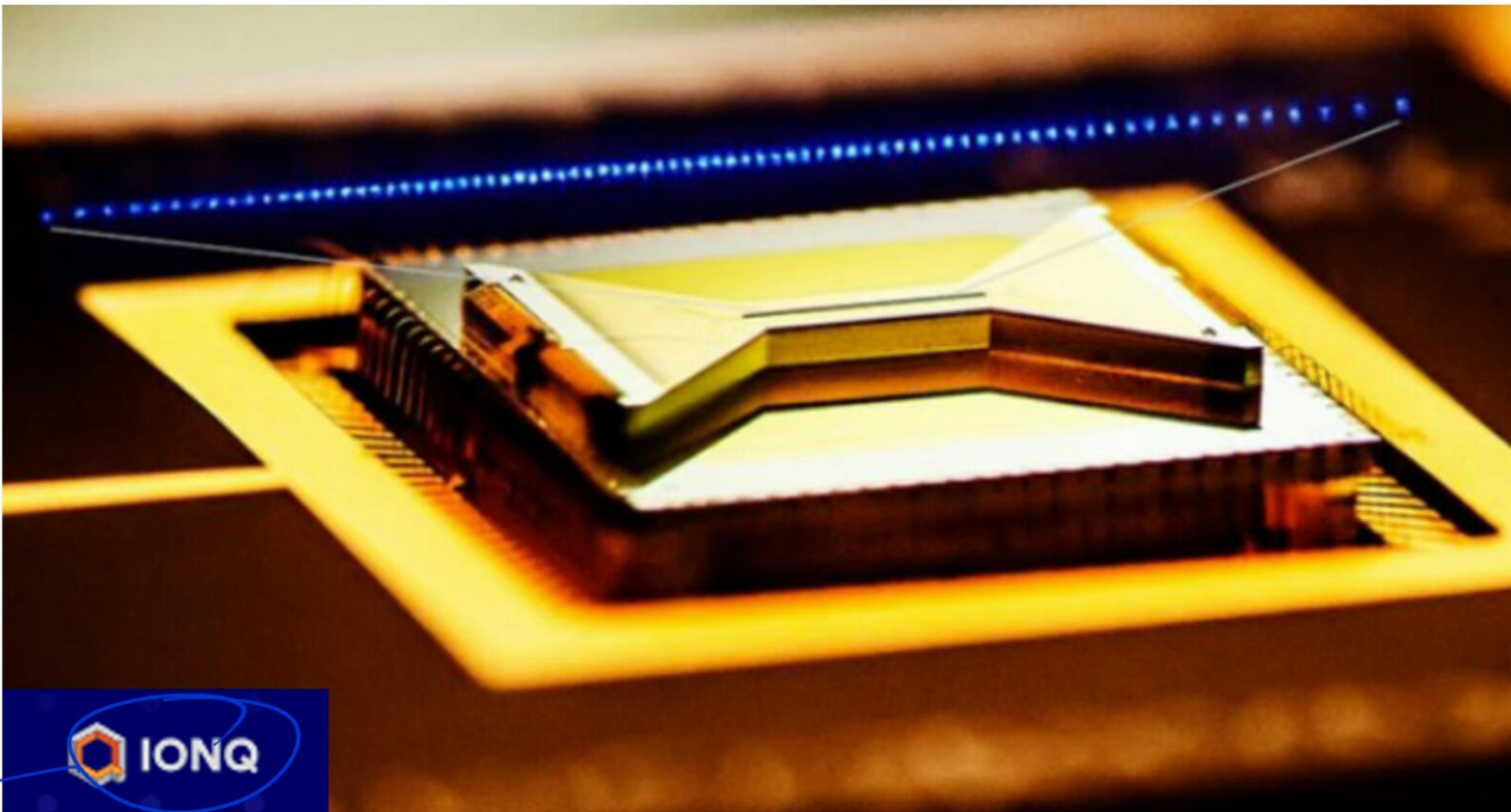
Atomic Precision

Unlike other systems that try to simulate the behavior of atomic particles, IonQ quantum cores compute using many identical ytterbium atoms.^⑥ As in ytterbium atomic clocks, isolating individual atoms reduces error and improves stability.



Laser Control

Precise lasers store information on our atomic qubits, perform logical operations, and connect them together in a quantum process called entanglement.^⑦ With no fixed wires, the IonQ system can connect any two qubits with a single laser operation, increasing accuracy.

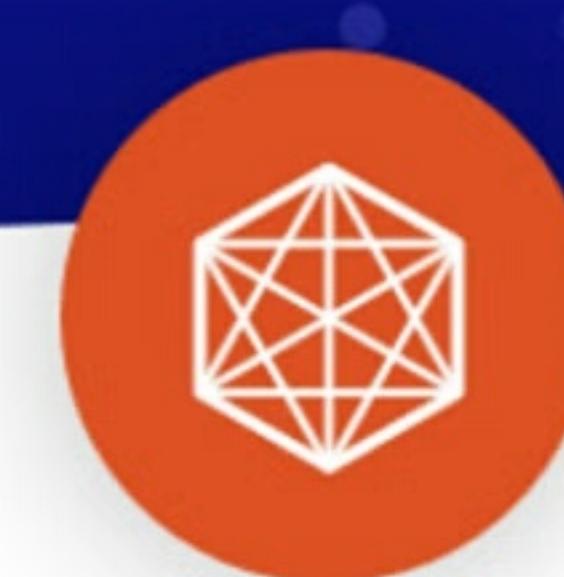


ditta



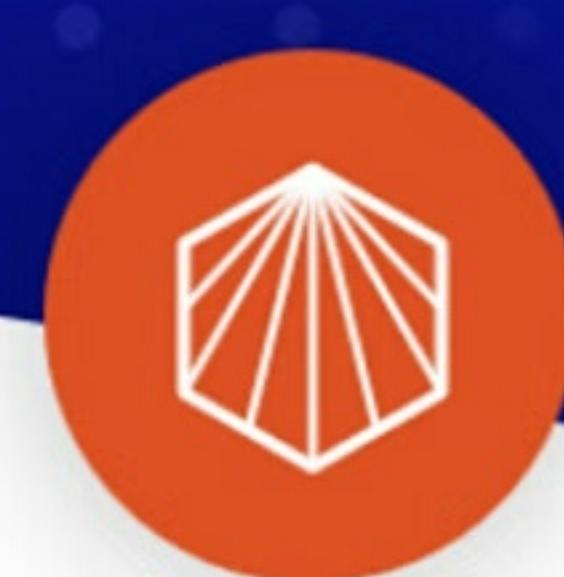
Powerful

Program length:
>60 two-qubit gates



Connected

Fully-connected qubits: **11**
Addressable pairs: **55**



Precise

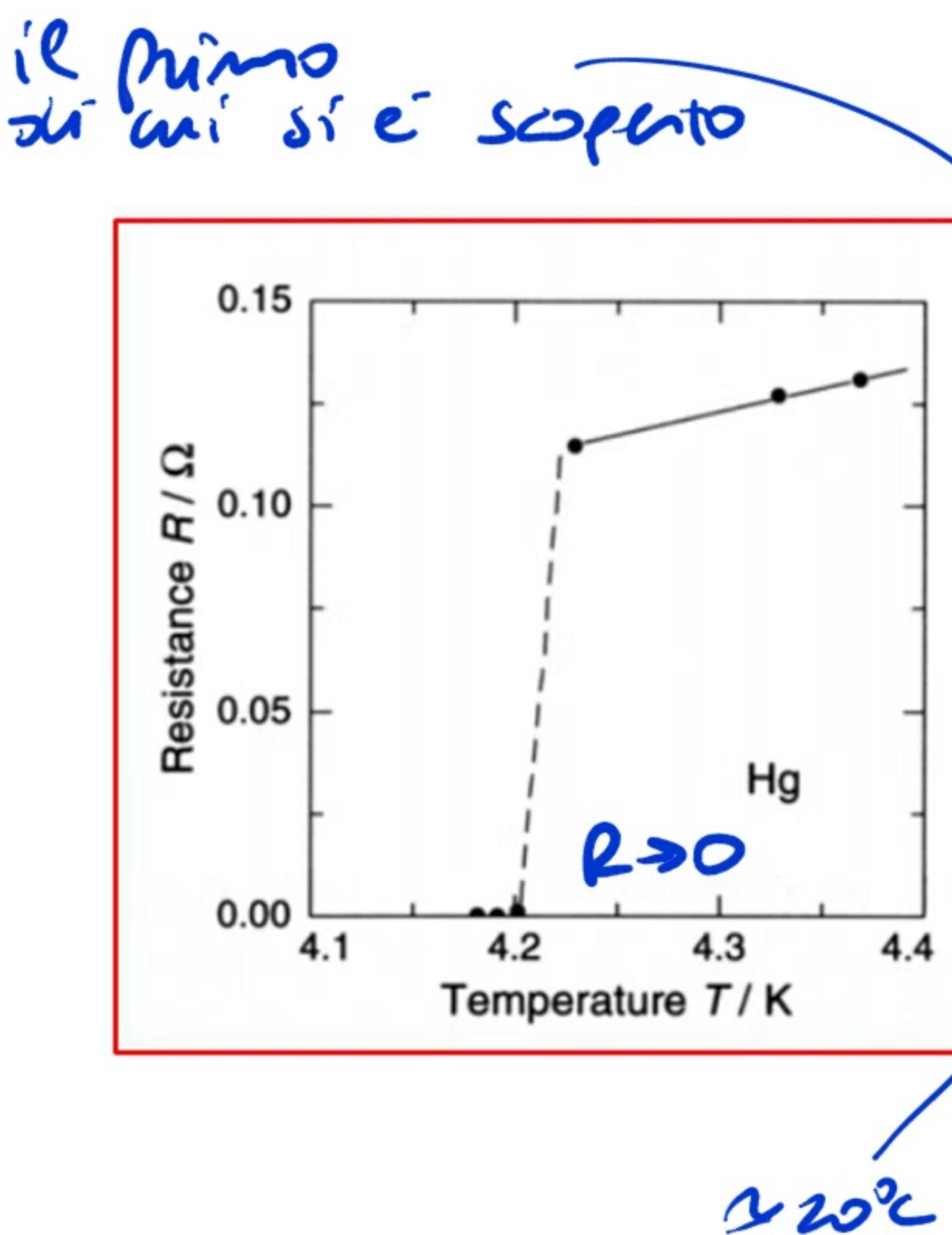
One-qubit gate error: **<0.03%**
Two-qubit gate error: **<1.0%**

Computer quantistici

Architettura basata su superconduttori

Esistono diversi approcci che permettono di implementare fisicamente qubit a partire da dispositivi che utilizzano materiali **superconduttori**.

Sono definiti superconduttori i materiali che, al di sotto di una certa temperatura critica, hanno **resistenza elettrica pari a 0**. In sostanza, si ha corrente senza alcuna perdita di potenza.

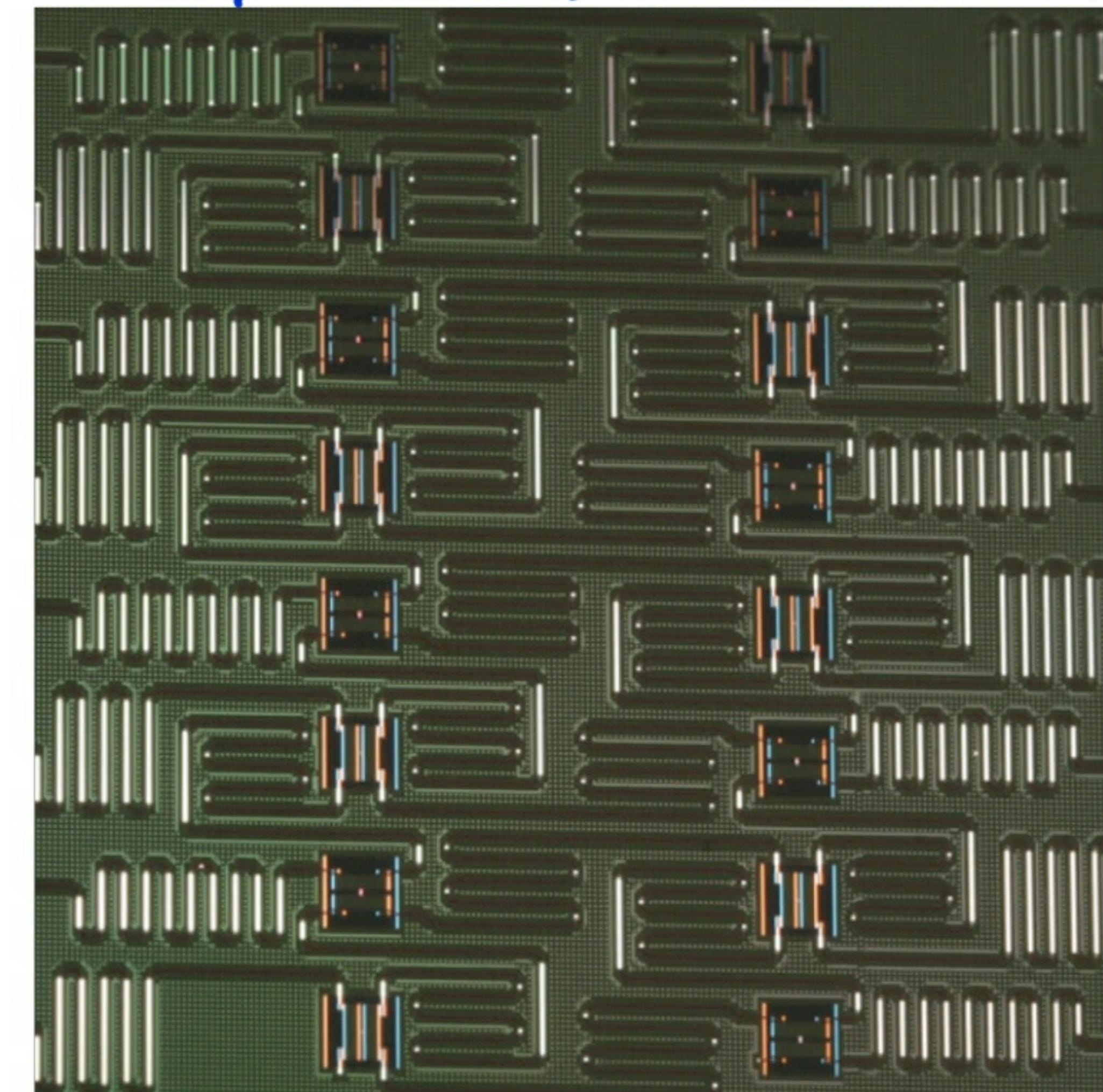
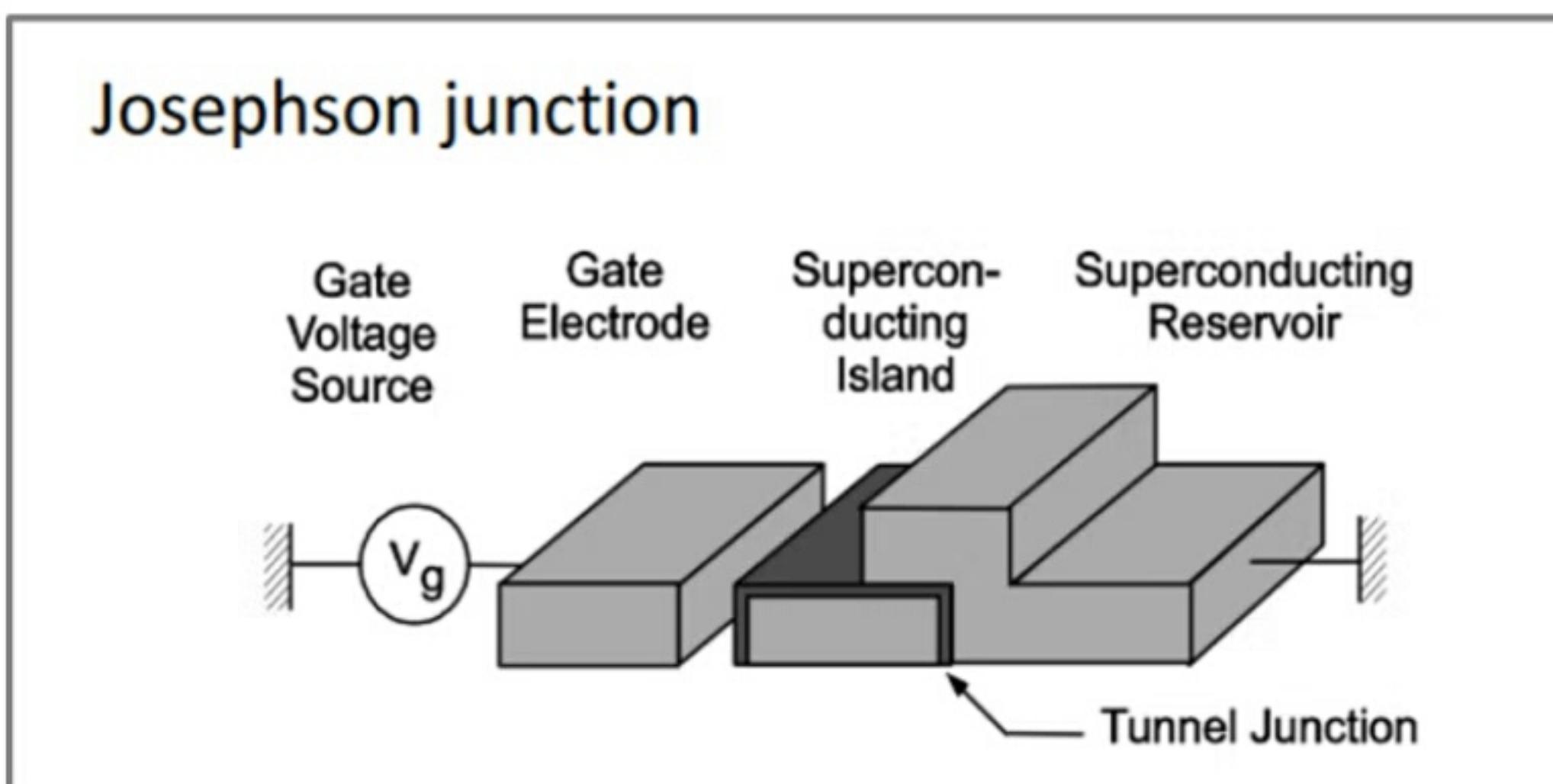
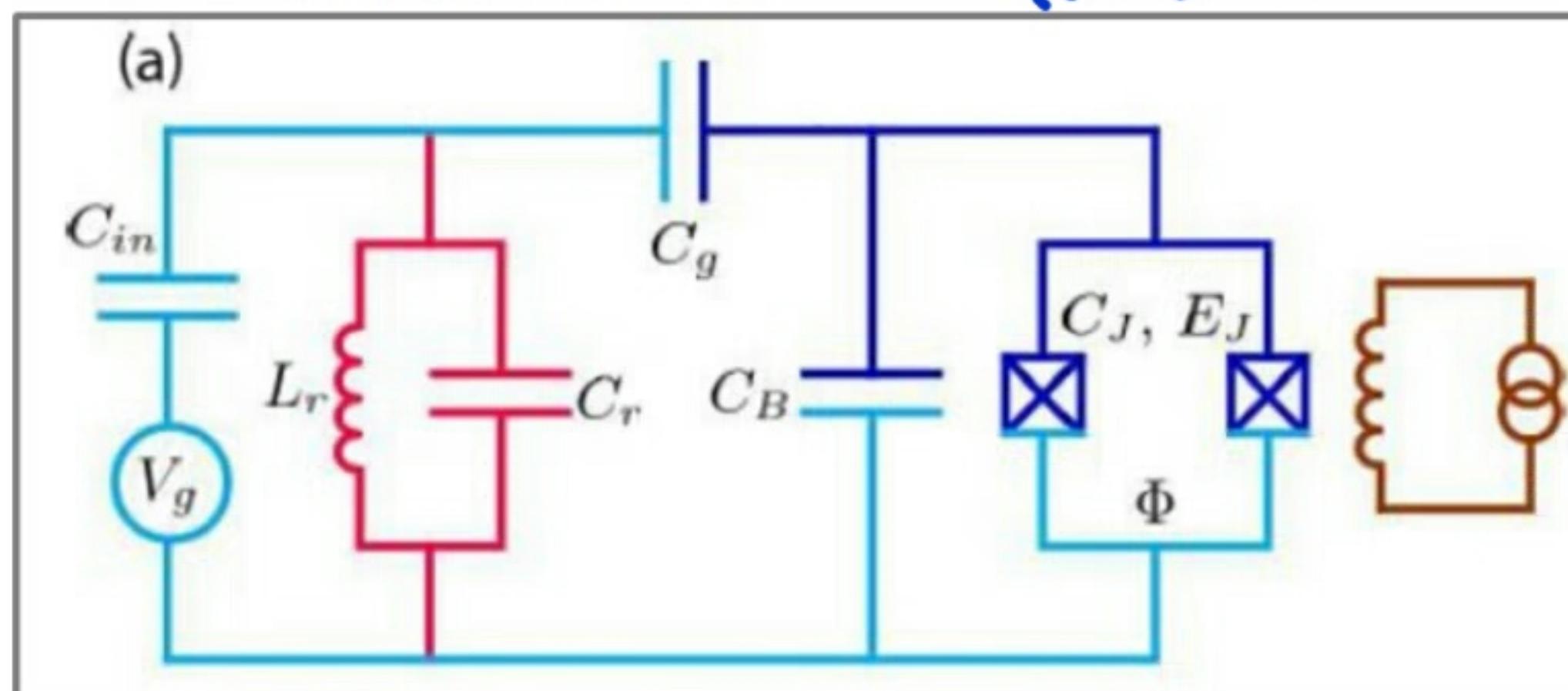


discende da
proprietà
quantistiche
delle matrice

Element	T_c (K)	Element	T_c (K)	Element	T_c (K)
Al	1.19	Nb	9.2	Tc	7.8
Be	0.026	Np	0.075	Th	1.37
Cd	0.55	Os	0.65	Ti	0.39
Ga	1.09	Pa	1.3	Tl	2.39
Hf	0.13	Pb	7.2	U	0.2
Hg	4.15	Re	1.7	V	5.3
In	3.40	Rh	0.0003	W	0.012
Ir	0.14	Ru	0.5	Zn	0.9
La	4.8	Sn	3.75	Zr	0.55
Mo	0.92	Ta	4.39		
Compound	T_c (K)	Compound	T_c (K)	Compound	T_c (K)
Nb ₃ Sn	18.1	MgB ₂	39	UPt ₃	0.5
Nb ₃ Ge	23.2	PbMo ₆ S ₈	15	UPd ₂ Al ₃	2
Cs ₃ C ₆₀	19	YPd ₂ B ₂ C	23	(TMTSF) ₂ ClO ₄	1.2
Cs ₃ C ₆₀	40	HoNi ₂ B ₂ C	7.5	(ET) ₂ Cu[Ni(CN) ₂]Br	11.5
High- T_c superconductor	T_c (K)	High- T_c superconductor	T_c (K)		
La _{1.83} Sr _{0.17} CuO ₄	38	Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{10+x}	125		
YBa ₂ Cu ₃ O _{6+x}	93	HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+x}	135		
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{10+x}	107	Hg _{0.8} Tl _{0.2} Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8.33}	134		

Transmon qubit

esiste un modo per usare matricelle superconduttrici per costruire pozzi di circuito che funzionano come un qubit → simile al carrello classico



ma il compone=
mento è
quello di un
qubit quantistico

Phys. Rev. A 76, 042319 – Published 12 October 2007

Esistono proposte di computer quantistici commerciali basati su superconduttori (IBM, Intel, Google...).

In particolare, IBM ha recentemente rilasciato il primo **computer quantistico commerciale** basato su circuiti a superconduttore (IBM Q System One, <https://www.ibm.com/quantum-computing/systems/>).



IBM Q System One

hublame e
la tempranura
de mantenerle

Inoltre, IBM ha reso disponibile una piattaforma on-line (IBM Q Experience, <https://quantum-computing.ibm.com/>) che permette agli utilizzatori di accedere ai processori quantistici di IBM attraverso un servizio on-line di cloud.

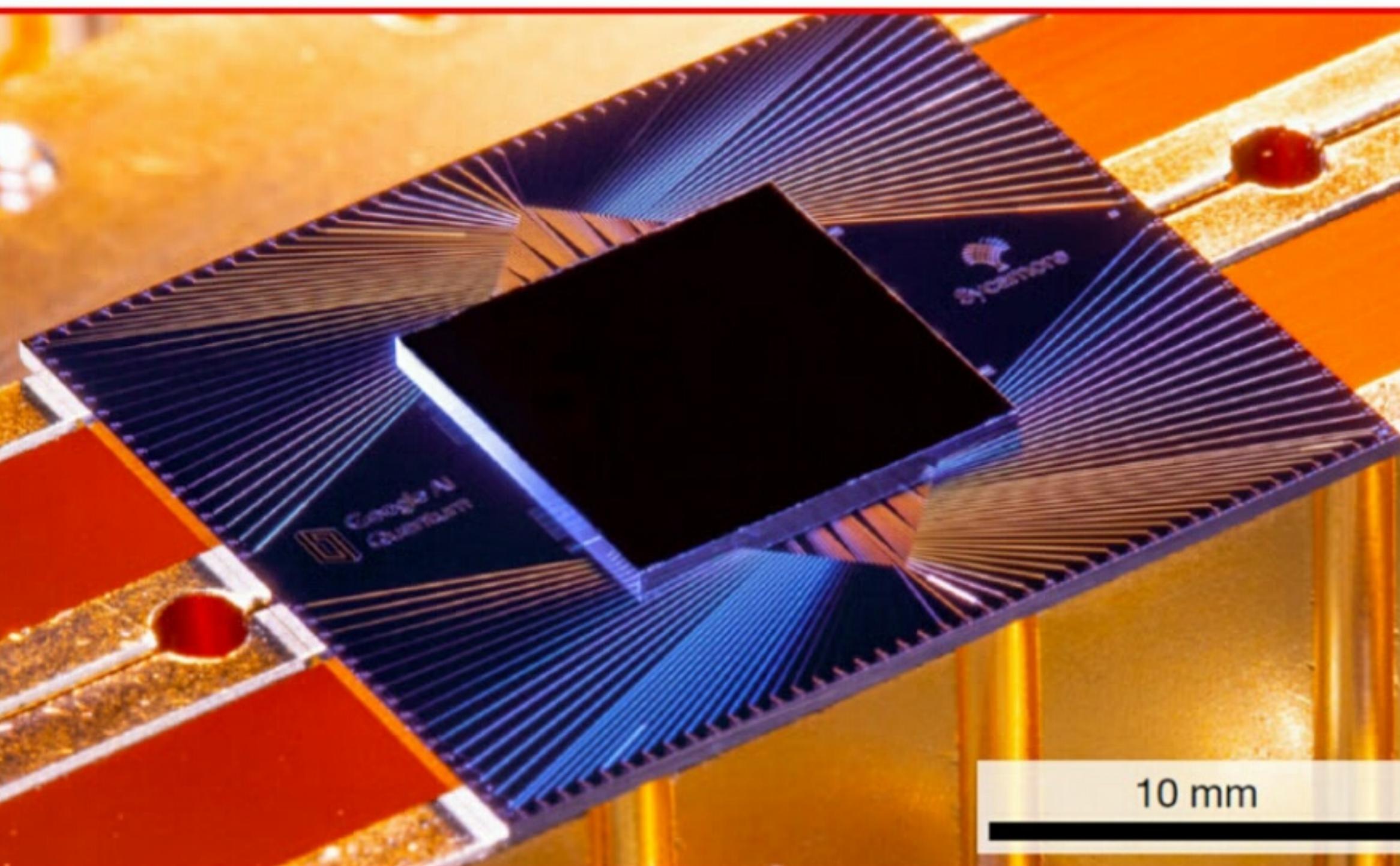
(per testare i propri algoritmi)

Quantum Supremacy

dichierate la "supremazie quantistica" in
risultato = risultato in problema insolubile
→ superpotere
processore quantistico e'
un processore classico

Article

Quantum supremacy using a programmable superconducting processor



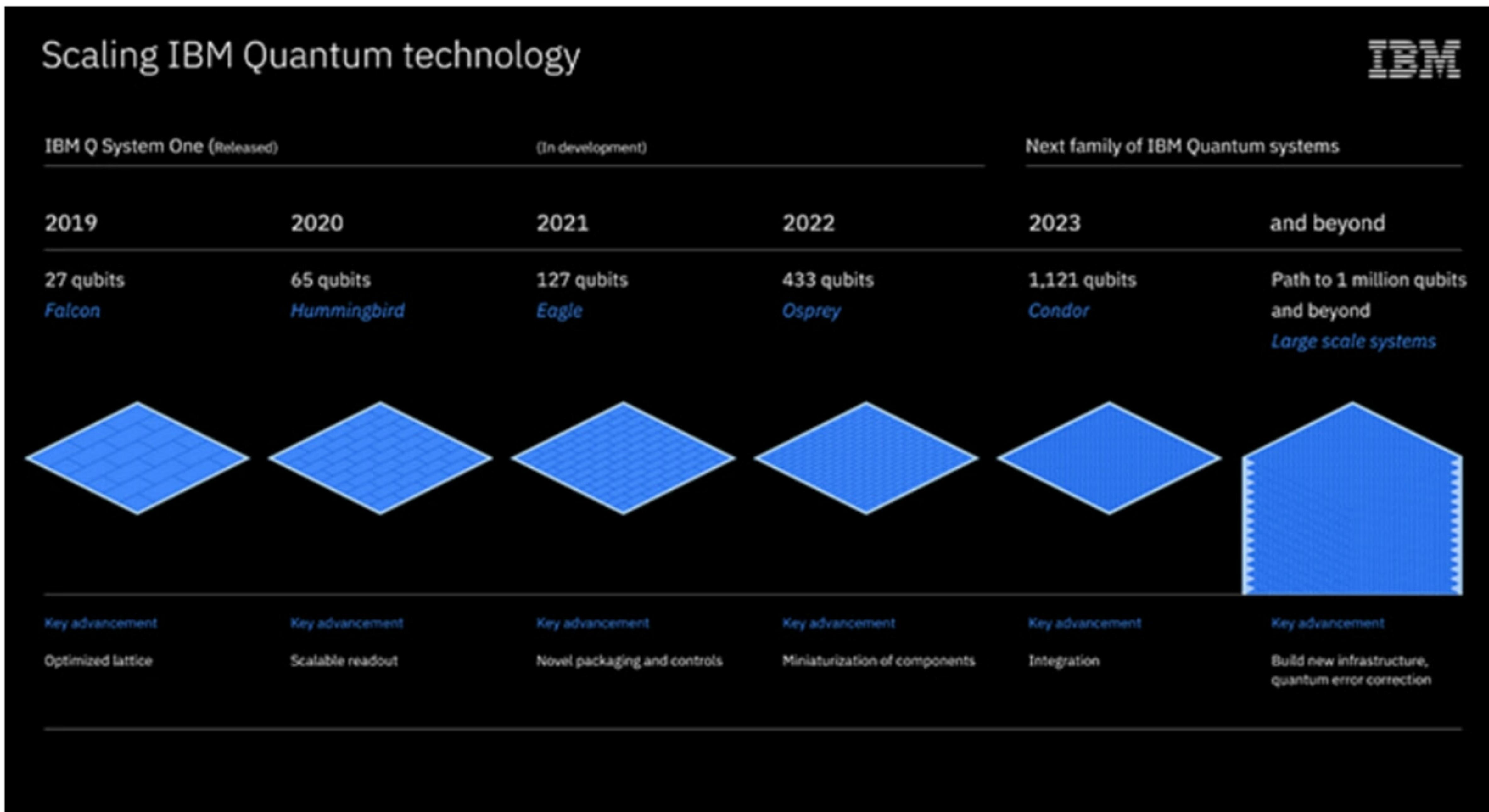
The promise of quantum computers is that certain computational tasks might be executed exponentially faster on a quantum processor than on a classical processor¹. A fundamental challenge is to build a high-fidelity processor capable of running quantum algorithms in an exponentially large computational space. Here we report the use of a processor with programmable superconducting qubits^{2–7} to create quantum states on 53 qubits, corresponding to a computational state-space of dimension 2^{53} (about 10^{16}). Measurements from repeated experiments sample the resulting probability distribution, which we verify using classical simulations. Our Sycamore processor takes about 200 seconds to sample one instance of a quantum circuit a million times—our benchmarks currently indicate that the equivalent task for a state-of-the-art classical supercomputer would take approximately 10,000 years. This dramatic increase in speed compared to all known classical algorithms is an experimental realization of quantum supremacy^{8–14} for this specific computational task, heralding a much-anticipated computing paradigm.

Nature | Vol 574 | 24 OCTOBER 2019 | 505

<https://quantumai.google/hardware>

Quantum computing: il futuro

o si è IBM



<https://www.ibm.com/blogs/research/2021/02/quantum-development-roadmap/>

Riferimenti bibliografici

- M.A. Nielsen, *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge University Press
- F. Arute et al., *Quantum supremacy using a programmable superconducting processor*, Nature, Vol 574, 24 OCTOBER 2019