

Sono sempre più diffuse le nuove macchine che usano le **strane leggi** del mondo microscopico con la promessa di effettuare in futuro **calcoli prodigiosi**. Ecco perché.

di Andrea Parlangeli

# Il boom dei computer quantistici

**APPENA ARRIVATO**

A lato, il nuovo computer quantistico Ocelot di Amazon. È sviluppato con il California Institute of Technology (Caltech). Nella foto grande, un dettaglio.



## Non c'è ancora una tecnologia prevalente. Al momento si stanno esplorando varie possibilità

**C**i sono argomenti, nella ricerca scientifica, che per decenni restano confinati nelle aule e nei laboratori delle università, perché per quanto affascinanti sembrano troppo astratti per le applicazioni reali. Poi, all'improvviso, tutto cambia. E allora lo sviluppo prende il via in maniera vertiginosa, spesso inaspettata. È quello che sta accadendo ai computer quantistici, cioè a quei particolari computer che usano i qubit al posto dei bit tradizionali (v. riquadro nelle prossime pagine).

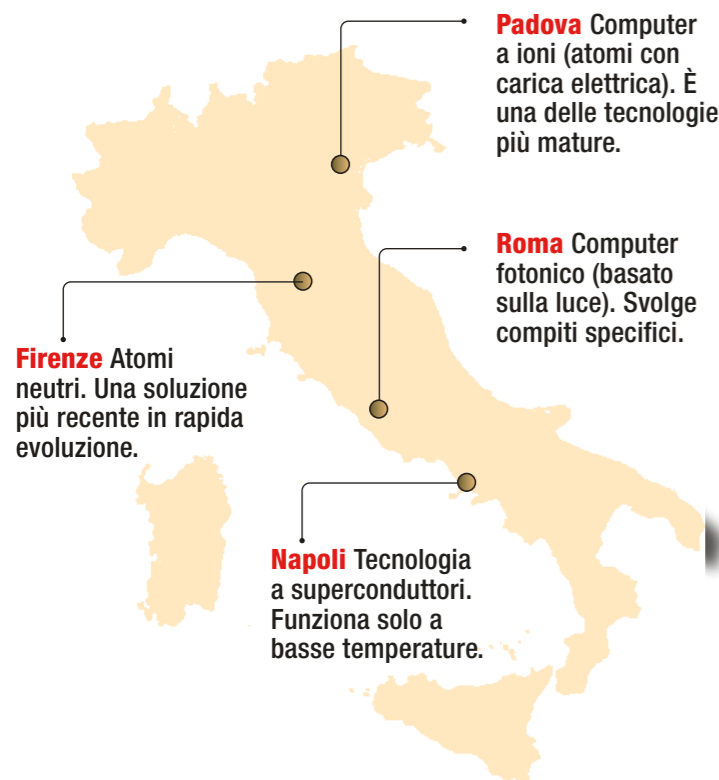
Ibm Quantum System One, uno dei primissimi computer quantistici commerciali, nel 2019 aveva 20 qubit. Oggi la startup californiana Atom Computing può vantare 1.180 (il record attuale), ed è solo una delle centinaia di aziende impegnate in questa corsa in cui – accanto a giganti come Amazon (che ha da poco annunciato Ocelot) e Microsoft (con il recente Majorana 1) – ci sono innumerevoli startup come Atom Computing, Pasqal, Rigetti, QuEra, D-Wave, Quantinuum e tante altre.

### SEMPRE PIÙ VELOCEMENTE

«Cinque anni fa, se qualcuno avesse detto che saremmo arrivati a questo punto, neanche i più ottimisti ci avrebbero creduto», commenta Simone Montangero, docente dell'Università di Padova e coautore del libro *Il computer impossibile* (Raffaello Cortina Editore). Certo, i problemi da superare non mancano.

### COMPUTER ITALIANI

Nella cartina, i 4 computer quantistici italiani, costruiti con le quattro tecnologie attualmente più promettenti.

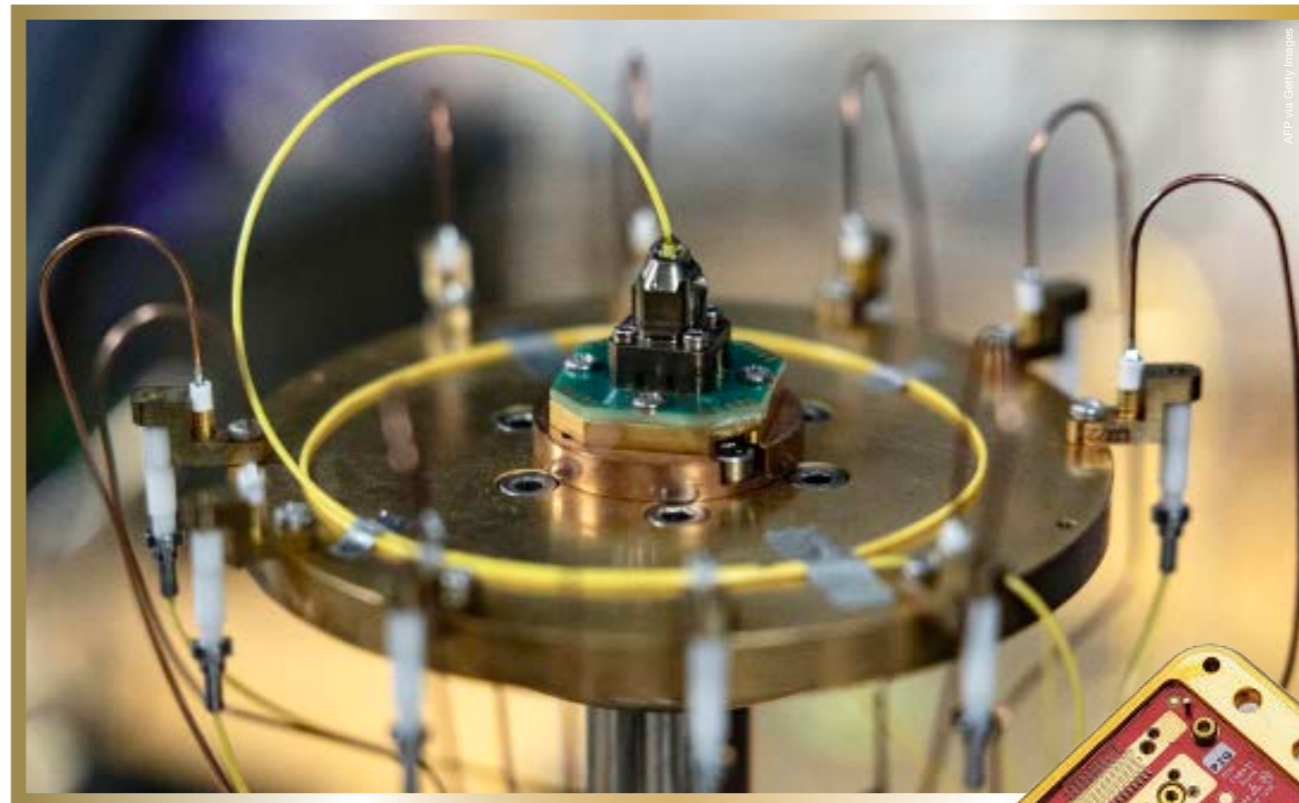


Innanzitutto perché costruire i qubit non è facile, come dimostra il confronto con i computer classici che operano ormai da tempo con molti miliardi di bit. E poi perché i qubit sono per loro natura molto “fragili”, cioè basta poco per alterarli, e di conseguenza i computer quantistici commettono ancora un sacco di errori, tanto che spesso impiegano una buona parte delle loro risorse per autocorreggersi.

Il risultato? Per risolvere un problema reale, occorrono molti più qubit di quelli che sarebbero necessari in base alla pura programmazione. Gli ingegneri dicono che il numero di qubit “logici”, cioè quelli utili al calcolo, è inferiore al numero di qubit “fisici”, cioè quelli che bisogna di fatto costruire per arrivare al risultato. Infatti il record attuale di qubit logici è di appena 50 (della startup Quantinuum), molto meno degli oltre mille qubit fisici che più aziende oggi sono in grado di offrire. In compenso, già con un centinaio di qubit logici, computer quantistici ben costruiti possono risolvere problemi importanti, per cui la ricerca continua e si stanno esplorando più strade.

### LUCE E SUPERCONDUTTORI

Montangero, che è direttore del Centro di calcolo e simulazioni quantistiche di Padova e ha contribuito a sviluppare l'ecosistema italiano, spiega che nel nostro Paese si è puntato su un centro nazionale (Icsc) per le tecnologie digitali avanzate e su 4 centri di ricerca con altrettanti computer quantistici basati sulle tecnologie più sviluppate. «A Napoli c'è un computer di 24 qubit che è stato inaugurato l'anno scorso», esordisce. «Si basa sulla tecnologia dei superconduttori (materiali che conducono perfettamente l'elettricità, ndr), la stessa usata da Ibm e da Google ormai da una decina d'anni. Ha il vantaggio di essere già ben affermata, e di essere vicina alle tecniche di fabbricazione standard dei chip di silicio. Però richiede temperature molto basse, vicine allo zero assoluto, e i qubit non sono tutti uguali tra loro come gli atomi o gli elettroni». A Roma, invece, c'è un computer basato sulla luce, o meglio sui fotoni, che della luce

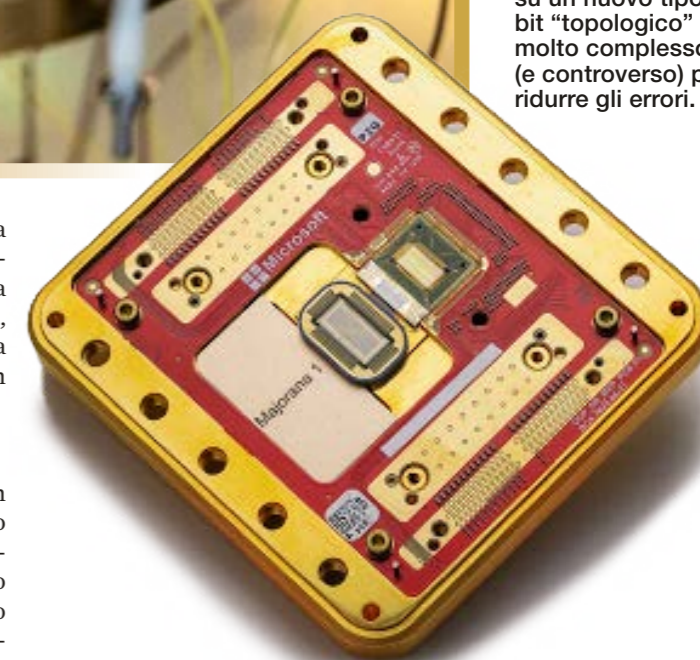


### DAVIDE...

Un generatore di qubit, sotto forma di fotoni (“granuli” minimi di luce), della startup francese Quandela.

### ... E GOLIA

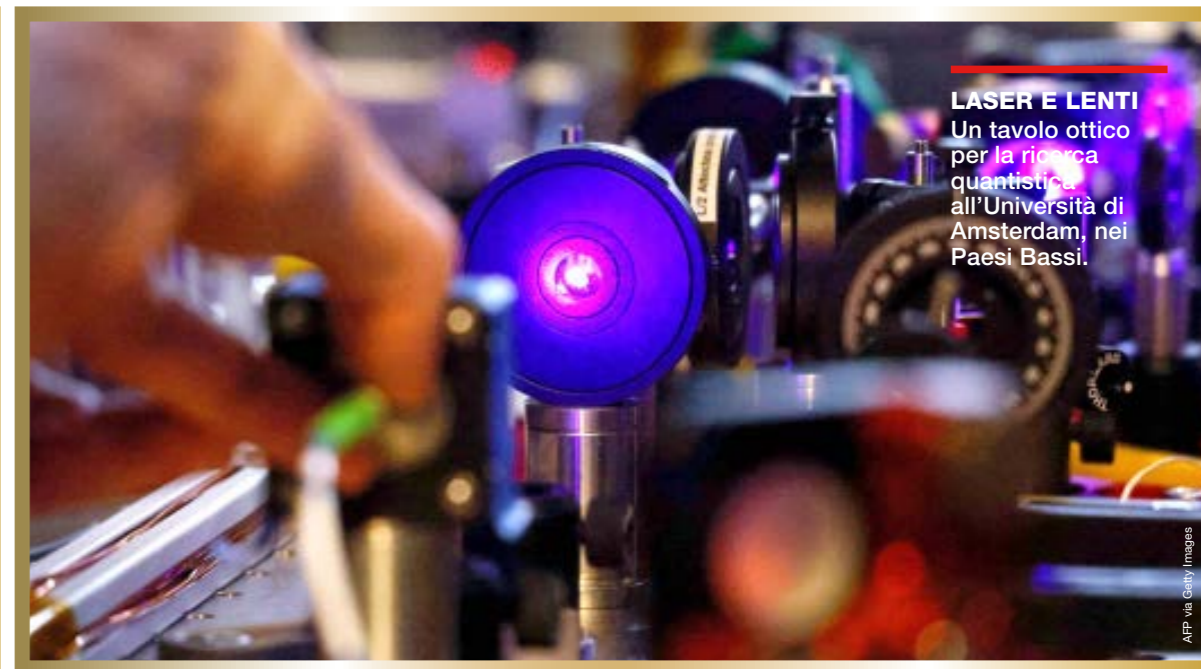
Il recente chip Majorana 1 di Microsoft: si basa su un nuovo tipo di bit “topologico” molto complesso (e controverso) per ridurre gli errori.



sono i mattoncini fondamentali. «Si chiama Colossus 2 e si basa su guide ottiche che fanno interferire i fotoni», dice Montangero. «È una tecnologia molto avanzata e funziona a temperatura ambiente; però si può usare solo per calcoli molto particolari, che hanno comunque potenziali applicazioni pratiche come la ricerca di sottocomunità all'interno di un social network (un compito detto *community detection*)».

### ATOMI GIGANTI

Il terzo laboratorio è a Firenze, dove si punta sugli atomi di un gas. «Questa tecnologia è più recente, però si sta sviluppando rapidamente», commenta Montangero. «Si utilizzano gli atomi di Rydberg, cioè atomi eccitati energeticamente, che hanno diametri dell'ordine del micron (un millesimo di mm), e sono quindi diecimila volte più grandi degli atomi normali». Gli atomi di Rydberg possono essere più facilmente manipolati con ▶





**BIT SPECIALI**  
Nel disegno, raffigurazione di due particelle utilizzate come bit quantistici, o qubit.

## I COMPUTER QUANTISTICI IN 7 DOMANDE

### 1 Che cos'è la meccanica quantistica?

La meccanica quantistica è la teoria che descrive il mondo a scale molto piccole. Non possiamo vedere direttamente gli atomi e gli elettroni con i nostri sensi, ma possiamo studiarli e prevederne il comportamento grazie alla meccanica quantistica. Questa teoria ha già molte applicazioni, come i laser, la risonanza magnetica e i microchip più avanzati. Tra le potenziali applicazioni future, c'è anche il computer quantistico.

### 2 Che cos'è un computer quantistico?

È un computer che effettua operazioni con i qubit invece che con i bit. I computer quantistici non sono più veloci dei computer classici e non li sostituiranno per ogni tipo di calcolo, ma possono contare su una classe più ricca di algoritmi, alcuni dei quali sono estremamente più efficienti dei loro corrispettivi classici.

### 3 Che cosa sono i qubit?

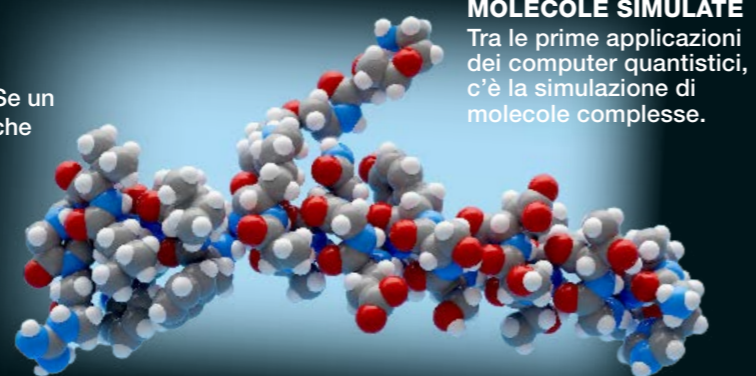
Il qubit è l'equivalente quantistico del bit, l'unità di memoria e di calcolo usata dai computer tradizionali. Se un bit può valere solo 0 o 1, infatti, il qubit può essere anche in una combinazione di 0 e 1 che si può rappresentare come un punto su una sfera. Se il punto si trova al "polo nord" della sfera vale 1, se è nell'altro polo vale 0; ma poi può prendere anche tutti i valori intermedi. È chiaro quindi che i qubit sono molto più complessi dei bit, e sono anche più soggetti a errori: basta il minimo disturbo per farli schizzare verso i poli e prendere i valori "classici" 0 o 1.

### 4 Perché i computer quantistici sono interessanti?

Perché possono risolvere alcuni problemi con un numero molto inferiore di operazioni rispetto a un computer classico, quindi anche con meno energia. In particolare, sono utili per simulare altri sistemi quantistici come atomi, molecole (v. foto sotto) e materiali.

### 5 Perché è difficile costruirne uno?

Perché generano un sacco di errori; per questo hanno bisogno di ridondanze e di algoritmi di correzione. Oggi lo standard è di circa un errore su mille operazioni, l'obiettivo è di arrivare a un errore su 100 miliardi. Altre sfide sono la scalabilità, cioè la capacità di aumentare il numero di qubit nello stesso spazio a disposizione, e la clock speed, cioè la velocità nell'effettuare le operazioni.



**MOLECOLE SIMULATE**  
Tra le prime applicazioni dei computer quantistici, c'è la simulazione di molecole complesse.

THOM LEACH/SCIENCE PHOTO LIBRARY/AGF

i laser, che li organizzano in griglie ordinate. Sempre con i laser, è possibile leggere o inserire le informazioni, mentre i calcoli si svolgono facendo interagire gli atomi tra loro.

A Padova, infine, un gruppo a cui appartiene lo stesso Montanero sta costruendo un computer a ioni, che non è molto diverso dal precedente. Gli ioni sono infatti atomi che, invece di essere neutri, hanno una carica elettrica, e quindi si possono spostare e ingabbiare per mezzo di campi elettrici e magnetici. «Questa tecnologia è stata tra le prime a essere sperimentata, e forse è anche quella che ha mostrato la precisione più alta», commenta Montanero. «Anch'essa ha il vantaggio di funzionare a temperatura ambiente, il problema maggiore è la scalabilità». Cioè la possibilità di aumentare il numero di qubit, per svolgere operazioni sempre più complesse. Negli ultimi anni,

però, aziende come la già citata Quantinuum hanno sviluppato strategie per tentare di superare questo limite.

### UN CLOUD GIÀ ESISTENTE

«Ci sono tanti modi diversi per costruire computer quantistici, perché ci sono tanti modi diversi per costruire i qubit», commenta Simone Severini, docente di Fisica dell'informazione all'University College di Londra e direttore del Quantum Computing di Amazon Web Services a Seattle (Usa). Lo abbiamo incontrato a Milano, in occasione dell'AI Festival che si è tenuto a fine febbraio (le domande e risposte qui sopra sono tratte dalla sua presentazione) e abbiamo colto l'occasione per chiedergli quale sia la strategia di Amazon in questo settore. «Noi abbiamo innanzitutto il nostro servizio cloud, Amazon Braket, che

### 6 Quanti qubit servono per risolvere un problema rilevante?

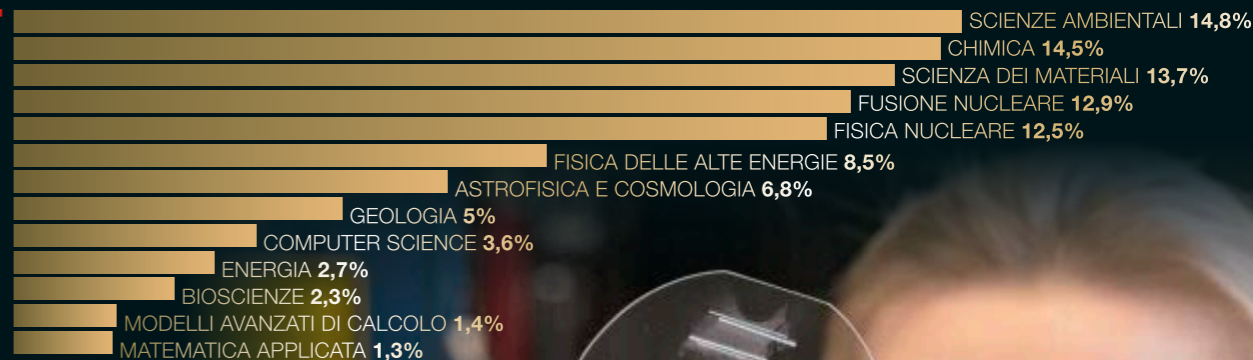
Non tantissimi. Bisogna però distinguere tra "qubit fisici" (quelli reali) e "qubit logici", cioè quelli effettivamente usati per svolgere un calcolo, al netto dei processi che servono a controllare gli errori. Già con centinaia di qubit logici si possono risolvere problemi di fisica e di chimica rilevanti. Con migliaia di qubit, invece, si possono risolvere problemi di ottimizzazione (come la scelta del percorso migliore per il trasporto di merci) e anche problemi di crittografia capaci di violare gli attuali standard di sicurezza, per esempio, delle transazioni bancarie.

### 7 Quali saranno le prime applicazioni?

Secondo il Dipartimento dell'Energia degli Usa, i primi computer quantistici saranno usati per i materiali, in chimica e in fisica nucleare e subnucleare (v. tabella qui sotto). Facciamo un esempio. Oggi il processo industriale di Haber-Bosch per produrre ammoniaca (un fertilizzante) genera l'1,8% delle emissioni globali di CO<sub>2</sub>. In natura ci sono alcuni batteri che fanno molto meglio, utilizzando alcune molecole complesse dette FeMoco. I supercomputer attuali non sono in grado di simulare queste molecole, per capire come agiscono e replicarne gli effetti. I computer quantistici, invece, saranno in grado di farlo.

### CERVELLONI

Le principali applicazioni del supercalcolo del Dipartimento dell'Energia Usa. I computer quantistici contribuiranno ad alcuni settori chiave come chimica, fisica e materiali.



Il problema principale resta il **controllo degli errori**. Ma tutti si aspettano i primi **risultati** nel giro di 5-10 anni

### CIRCUITI DI LUCE

Una ricercatrice controlla alcune tracce che servono a guidare la luce all'interno di un circuito quantistico fotonico.



già offre computer quantistici di aziende partner (QuEra, Rigetti e altre), allo stato di prototipo, a chiunque voglia usarli; si possono programmare dal cellulare, in linea di principio», risponde. «Allo stesso tempo, costruiamo computer quantistici superconduttivi in partnership con il Caltech».

Il computer quantistico di Amazon è costruito con circuiti superconduttori, ma si basa su un tipo di qubit particolare, detto *cat qubit* (in italiano "qubit gatto", dal gatto di Schrödinger). «I *cat qubit* sono costruiti in modo da eliminare alcuni tipi di errore», spiega Severini. «Così il numero di qubit fisici necessari a costruire un qubit logico può essere ridotto anche del 90%».

Anche Majorana 1, la macchina di Microsoft, è pensata per ridurre al massimo gli errori per mezzo di un altro tipo di qubit innovativo (detto "topologico"), che sarebbe particolarmente

stabile perché nascerebbe dall'interazione di molte particelle. Ma non è chiaro se questo tipo di qubit esista veramente.

### CI ARRIVEREMO

Di fronte a tanti progressi, resta un dubbio: quando avremo le prime macchine capaci davvero di fare la differenza? «Secondo me, nei prossimi dieci anni i computer quantistici saranno in grado di risolvere problemi di valore scientifico che i computer tradizionali non sono in grado di affrontare», conclude Severini. «Però non è importante quanto tempo ci vorrà, né con quale tecnologia ci arriveremo. Quel che conta è che il computer quantistico *deve* essere costruito. Perché ci permetterà di collegarci alla realtà in modo diverso, e il potenziale che può essere sbloccato in questo modo è impossibile da prevedere». **F**