

TECNOLOGIE EMERGENTI

Quantum computing e strategie nazionali ed internazionali

L. Paglieri, 9 Marzo 2026



Il 2025 è stato l'anno internazionale UNESCO dedicato alle Tecnologie Quantistiche

Cerimonia d'apertura dell'Anno Internazionale della Scienze e delle Tecnologie Quantistiche all'UNESCO – Parigi 4 e 5 febbraio 2025



<https://www.unesco.it/it/news/cerimonia-dapertura-dellanno-internazionale-della-scienze-e-delle-tecnologie-quantistiche-allunesco-parigi-4-e-5-febbraio-2025/>

Quantum Computing 2025 — Timeline Globale · Parte 1: Gennaio – Aprile

Principali eventi a livello globale, europeo e italiano

● UE/Europa ● G7/Globale ● Italia ● USA/Mondo ● Sicurezza

01

GEN

● USA / GLOBALE

Microsoft: qubit topologici (Majorana 1)

Microsoft annuncia Majorana 1, primo chip basato su qubit topologici. Approccio alternativo e potenzialmente più stabile alla correzione degli errori.

Fonte: Microsoft Research, feb. 2025

02

FEB

IT ITALIA

PNRR Quantum: bando NQSTI da €300 M

Il National Quantum Science & Technology Institute pubblica il primo bando PNRR per ricerca e infrastrutture quantum nazionali.

Fonte: NQSTI/MUR, feb. 2025

03

MAR

EU UE / EUROPA

Dichiarazione Europea QT — agg. 2025

24 Stati membri firmano l'aggiornamento della Dichiarazione Europea sul Quantum con obiettivi vincolanti di capacity building e formazione.

Fonte: Commissione Europea, mar. 2025

04

APR

IT ITALIA

Leonardo & Quantum@Trento: accordo difesa

Leonardo SpA e Q@TN firmano un accordo strategico per applicazioni quantum in difesa e aerospace.

Fonte: Leonardo SpA / Q@TN, apr. 2025

EU UE / EUROPA

EuroHPC: nodi quantum operativi

I primi nodi quantum integrati nell'infrastruttura EuroHPC diventano accessibili ai ricercatori europei.

Fonte: EuroHPC JU, gen. 2025

● USA / GLOBALE

Google Willow: 105 qubit «below-threshold»

Google presenta Willow: prima dimostrazione empirica di riduzione esponenziale degli errori all'aumentare dei qubit fisici.

Fonte: Google Quantum AI / Nature 2024/25

▲ SICUREZZA

NIST: standard PQC definitivi (FIPS 203/204/205)

Pubblicati gli standard definitivi post-quantum. I governi UE avviano la revisione dei sistemi crittografici delle infrastrutture critiche.

Fonte: NIST / ENISA, recepimento EU mar. 2025

● CINA

USTC: processore da 1000+ qubit

Il gruppo di Pan Jianwei (USTC Hefei) annuncia un processore superconduttivo da 1000+ qubit: significativa escalation nella corsa globale.

Fonte: USTC Hefei / Nature Physics, apr. 2025

Quantum Computing 2025 — Timeline Globale · Parte 2: Maggio – Settembre

Principali eventi a livello globale, europeo e italiano

● UE/Europa ● G7/Globale ● Italia ● USA/Mondo ● Sicurezza

05

MAG

EU UE / EUROPA EuroQCI: avvio fase deployment

Avvio ufficiale del deployment della rete europea di Quantum Key Distribution (QKD) per comunicazioni governative sicure.

Fonte: EuroQCI Consortium / CE, mag. 2025

06

GIU

EU UE / EUROPA Roadmap PQC coordinata — UE

Gli Stati UE pubblicano la roadmap per la transizione alla Post-Quantum Cryptography nelle infrastrutture critiche pubbliche.

Fonte: ENISA / Commissione Europea, giu. 2025

07

LUG

EU UE / EUROPA Quantum Europe Strategy — «From lab to fab»

La Commissione Europea pubblica la strategia operativa per le tecnologie quantistiche con obiettivo di leadership globale entro il 2030.

Fonte: Commissione Europea, lug. 2025

09

SET

EU UE / EUROPA Lista Dual-Use UE: quantum inserito

L'UE aggiunge le tecnologie quantistiche all'elenco dual-use soggette a controllo export. Modifica Reg. (UE) 2021/821.

Fonte: Consiglio UE / EUR-Lex, set. 2025

IT ITALIA CNR: primo quantum processor italiano

Il CNR avvia il primo quantum processor italiano da 25 qubit a Bologna. Accesso aperto ai ricercatori delle università nazionali.

Fonte: CNR / INFN, mag. 2025

G7 / GLOBALE G7: dichiarazione congiunta quantum

Il G7 pubblica una dichiarazione congiunta a favore delle tecnologie quantistiche e per il coordinamento multilaterale su export control.

Fonte: G7 Science Ministers' Communiqué, giu. 2025

USA / GLOBALE IBM Flamingo: 4000+ qubit modulari

IBM annuncia il processore modulare Flamingo (4000+ qubit fisici). Primo sistema progettato per il fault-tolerant quantum computing.

Fonte: IBM Research Blog, lug. 2025

IT ITALIA Pilot QKD Roma-Milano (EuroQCI-IT)

Avviata la sperimentazione italiana di Quantum Key Distribution tra Roma e Milano per reti governative sicure (ACN/MiSE).

Fonte: ACN / MiSE / EuroQCI-IT, set. 2025

Quantum Computing 2025 — Timeline Globale · Parte 3: Ott–Dic + Prospettive 2026

Principali eventi a livello globale, europeo e italiano

● UE/Europa ● G7/Globale ● Italia ● USA/Mondo ● Sicurezza

10

OTT

EU UE / EUROPA

Quantum Act: iter formale avviato

La Commissione avvia l'iter legislativo per il Quantum Act. Consultazione pubblica aperta fino a dicembre 2025.

Fonte: Commissione Europea, ott. 2025

● USA / GLOBALE

DARPA US2QC: 100M\$ architetture QC

DARPA lancia il programma Underexplored Systems for Utility-Scale QC: 100M\$ per architetture quantum alternative.

Fonte: DARPA, ott. 2025

11

NOV

IT ITALIA

Hub Quantum Milano inaugurato

Inaugurato il National Quantum Hub (Politecnico + CNR + STMicroelectronics + Pirelli): primo polo industriale quantum italiano.

Fonte: NQSTI / Politecnico Milano, nov. 2025

EU UE / EUROPA

Quantum Flagship: approvata 2ª fase

La Commissione approva la 2ª fase del Quantum Flagship (2026–2028): ulteriori €500 M per scale-up industriale.

Fonte: Commissione Europea / Quantum Flagship, nov. 2025

12

DIC

EU UE / EUROPA

EuroQCI: backbone in 12 Paesi UE

I segmenti terrestri di EuroQCI sono operativi in 12 Paesi UE: prima rete QKD continentale parzialmente attiva.

Fonte: EuroQCI Consortium / CE, dic. 2025

▲ SICUREZZA

ENISA: Q-Day stimato 2030–2035

Rapporto ENISA: 38 Paesi hanno adottato piani PQC nazionali. Il Q-Day (rottura RSA) stimato entro il 2030–2035.

Fonte: ENISA Threat Landscape, dic. 2025

→

2026

PROSSIMI PASSI · 2026

EU Quantum Act — framework vincolante (iter 2026)

EU EuroQCI — segmenti satellitari via IRIS²

● IBM / Google: era fault-tolerant QC

IT NQSTI — 2ª tranche PNRR quantum

▲ Deadline PQC per PA italiane (AGID)

● Q-Day stimato: 2030–2035 (ENISA)

Fonte: Commissione Europea; ENISA; IBM; AGID

QUANTUM COMPUTING E STRATEGIE INTERNAZIONALI E NAZIONALI

I Fondamenti

Dalla fisica ai fondamenti del calcolo quantistico



Il Bit Classico vs. Il Qubit

BIT CLASSICO

0 | 1

Due soli stati possibili:

0 oppure 1

Come un interruttore della luce:
o acceso o spento, mai entrambi.

QUBIT

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

Infiniti stati possibili:

una combinazione di 0 e 1
simultaneamente.

Come un volume audio:
può essere al 30%, 70%,
on qualsiasi valore.

La Sovrapposizione (Superposition)

Definizione: un qubit può trovarsi in una combinazione di $|0\rangle$ e $|1\rangle$ finché non viene misurato. La misura 'collassa' lo stato in uno dei due valori classici.

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

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

α (alfa)

Ampiezza di probabilità
di misurare 0
→ probabilità = $|\alpha|^2$

β (beta)

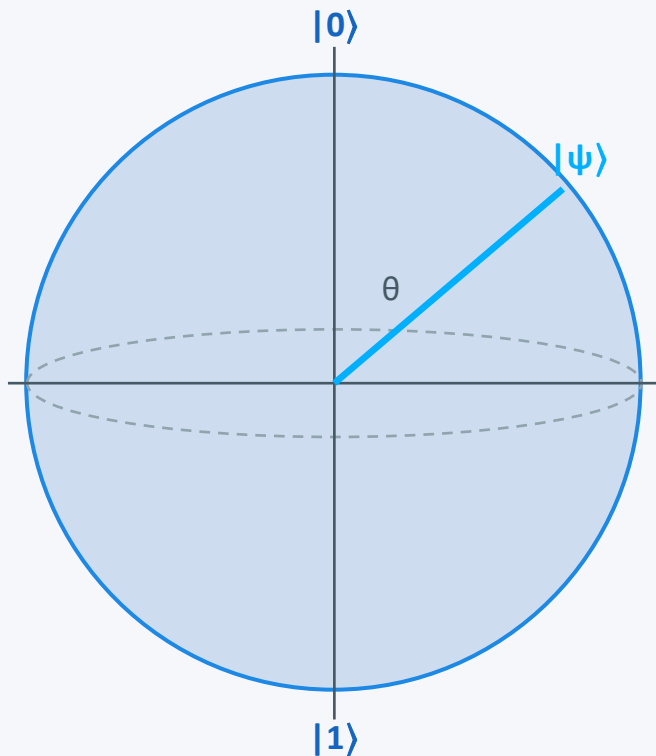
Ampiezza di probabilità
di misurare 1
→ probabilità = $|\beta|^2$

Vincolo

Le probabilità devono
sommare a 1:
 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$

La Sfera di Bloch: visualizzare il qubit

Ogni stato di un qubit corrisponde a un punto sulla superficie di una sfera unitaria. Questo strumento geometrico ci permette di ragionare visivamente sulle trasformazioni quantistiche.



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

Polo Nord $|0\rangle$

Stato 'zero': probabilità 100% di misurare 0. $\theta = 0^\circ$

Polo Sud $|1\rangle$

Stato 'uno': probabilità 100% di misurare 1. $\theta = 180^\circ$

Equatore

Sovrapposizione perfetta 50/50.

$\theta = 90^\circ$, es. stato $|+\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$

Angolo ϕ (fi)

Fase relativa: non cambia le probabilità, ma conta nelle interferenze.

Proprietà chiave che potenziano il calcolo quantistico



Sovrapposizione

Superposition

Un qubit esiste in più stati simultaneamente finché non viene misurato. Con n qubit si rappresentano 2^n stati in parallelo → vantaggio computazionale esponenziale.



Entanglement

Entanglement

Due qubit 'entangled' condividono uno stato correlato: misurare uno determina istantaneamente l'altro, anche a distanza. Permette coordinamento senza comunicazione classica.



Interferenza

Interference

Le ampiezze (α , β) si sommano come onde: gli algoritmi quantistici amplificano i percorsi verso la risposta corretta e cancellano quelli errati, migliorando la probabilità di successo.

Queste tre proprietà combinandosi consentono agli algoritmi quantistici di superare quelli classici per problemi specifici (es. ricerca, fattorizzazione, simulazione).

La Misurazione: dalla quantistica al classico

Misurare un qubit distrugge la sua sovrapposizione. Dopo la misura lo stato diventa classico (0 o 1) e il vantaggio quantistico è perso. Gli algoritmi quantistici sfruttano la sovrapposizione prima della misura finale.

1. Prima della misura

Il qubit è in sovrapposizione:
 $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

Esiste una distribuzione di probabilità sui possibili risultati.

2. Atto della misura

La misura forza un risultato:

- 0 con probabilità $|\alpha|^2$
- 1 con probabilità $|\beta|^2$

Il risultato è casuale ma ben definito statisticamente.

3. Dopo la misura

Il qubit collassa in uno stato classico:
 $|\psi\rangle \rightarrow |0\rangle$ oppure $|\psi\rangle \rightarrow |1\rangle$

La sovrapposizione è distrutta e non può essere 'letta' di nuovo.

Perchè è rivoluzionario?

CLASSICAL BIT vs QUBIT

Proprietà	Bit Classico	Qubit
Stato	0 oppure 1	0, 1, o entrambi (sovrapposizione)
Parallelismo	Sequenziale	Esponenziale
Operazione base	Porta logica	Porta quantistica unitaria
Correzione errori	Semplice	Molto complessa (decoerenza)
Temperatura	Ambiente	~0.015 K (criogenia)



Parallelismo massivo

Un registro di n qubit può rappresentare 2^n stati simultaneamente — 300 qubit superano gli atomi dell'universo osservabile.



Entanglement

Due qubit entangled condividono stato istantaneamente, indipendentemente dalla distanza fisica.

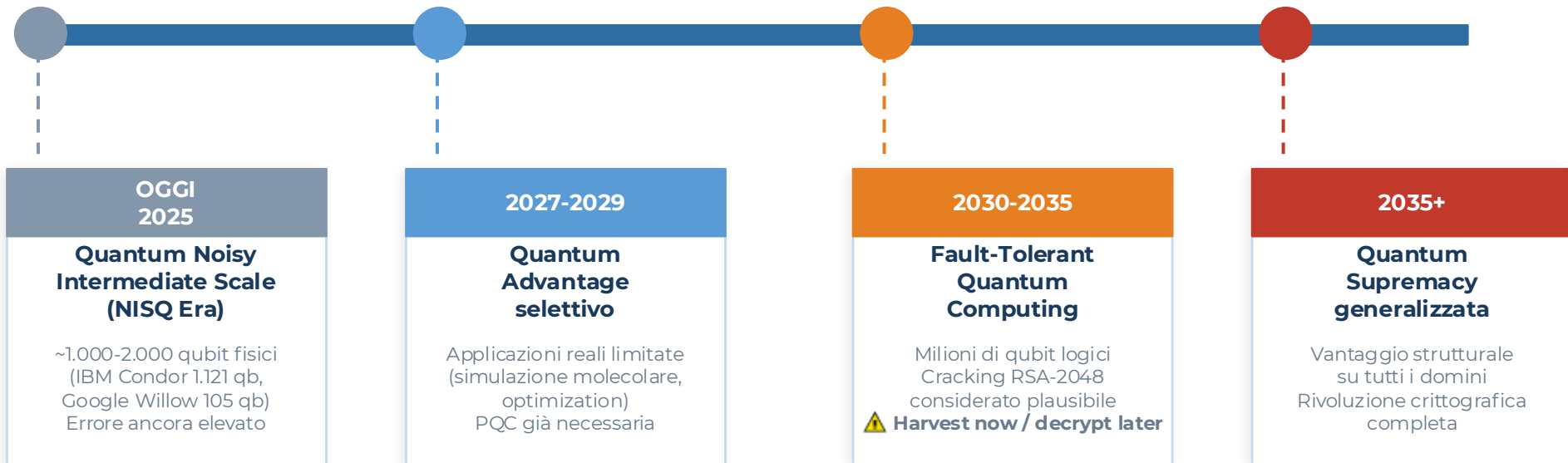


Interferenza quantistica

Gli algoritmi quantistici amplificano percorsi corretti e cancellano quelli sbagliati, accelerando la ricerca di soluzioni.

Timeline: Dove Siamo e Dove Andiamo

◀ SIAMO QUI



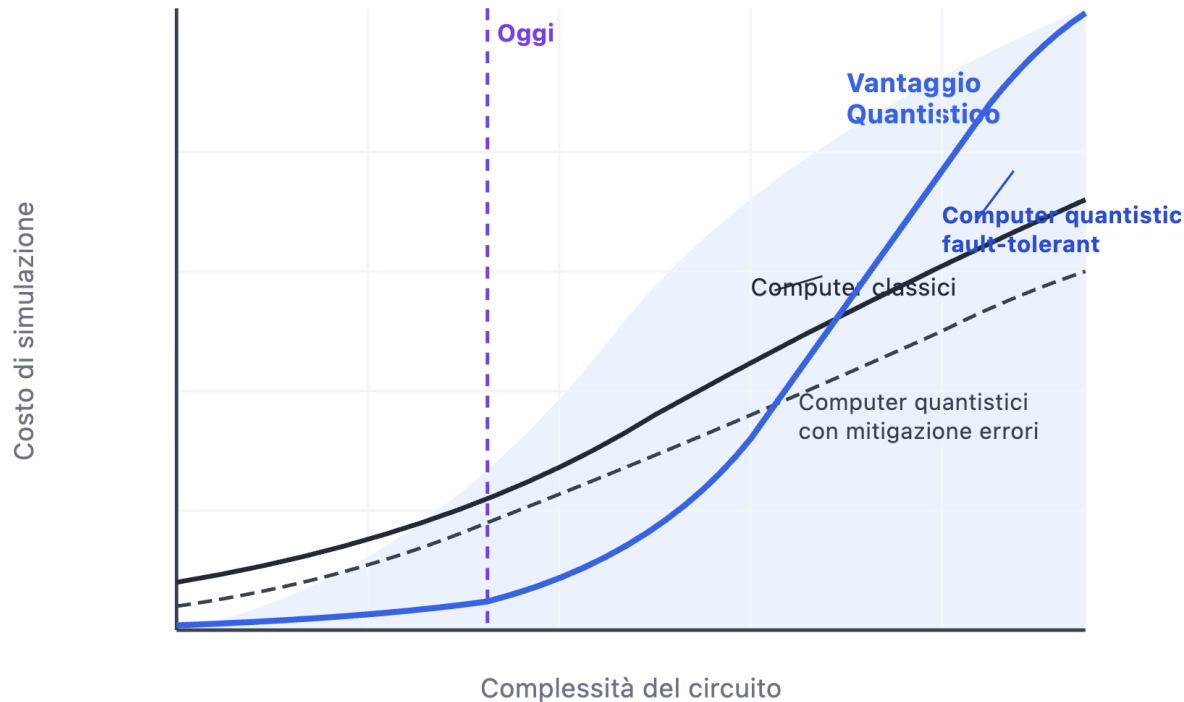
Fonte: McKinsey Quantum Technology 2023 | IBM Quantum Roadmap 2024 | ENISA Quantum Threat Landscape 2023

Cos'è il vantaggio quantistico “Quantum advantage”?

La capacità di eseguire un compito di elaborazione delle informazioni su hardware quantistico in modo da soddisfare **due criteri essenziali**:

1. La **correttezza del risultato** può essere rigorosamente verificata.
2. Il calcolo viene eseguito con una **separazione quantistica** che offre efficienza, convenienza economica o precisione superiori rispetto ai soli metodi classici.

VANTAGGIO QUANTISTICO



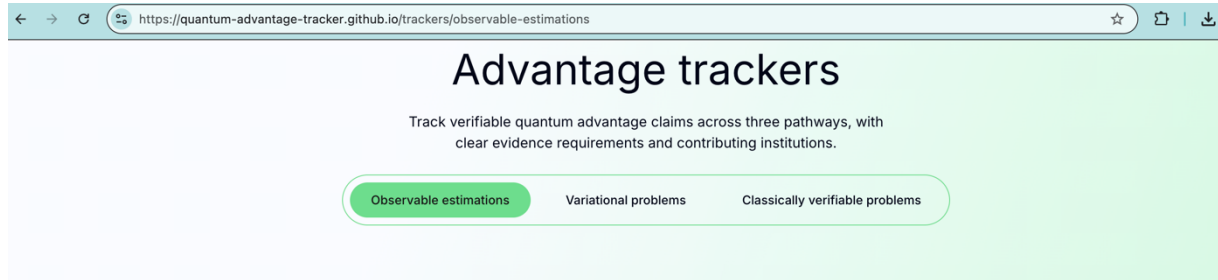
Anche senza computer quantistici perfetti, oggi siamo già in grado di ottenere risultati che i classici non possono replicare.

Un computer quantistico
"rumoroso" supera i limiti del
calcolo classico
— Y. Kim, A. Eddins, et al, Nature.
618, 500–505 (2023)



Quantum Advantage tracker

<https://quantum-advantage-tracker.github.io/>



Advantage trackers

Track verifiable quantum advantage claims across three pathways, with clear evidence requirements and contributing institutions.

Observable estimations Variational problems Classically verifiable problems

Observable estimations 🇮🇹

Submissions in this tracker report expectation values for observables alongside rigorous error bars. Validation requires mathematically provable confidence intervals over the reported value.

[View circuit instances](#)

[Open submission ticket](#)

operator_loschmidt_echo Select a circuit instance Reset

Date	Name / Institutions	Method	Circuit	Qubits	Gates	Expectation value [upper, lower bound]	Runtime (seconds)	Compute resources
2025-12-02	49x1296_ibm_pittsburgh By: IBM, Algorithmiq, Flatiron	Global rescaling	operator_loschmidt_echo_49x1296	49	1296	0.649 [N/A, N/A]	Q: 4120 C: -	Q: ibm_pittsburgh C: -

QUANTUM COMPUTING E STRATEGIE INTERNAZIONALI E NAZIONALI

L'Ecosistema del Quantum

Principali Attori e Catena del valore



Le Tre Aree Tecnologiche del Quantum

Comunicazione · Calcolo (e simulazione) · Sensing – con fenomeni fisici abilitanti

◆ Quantum Communication

TRL 4-7

Distribuzione quantistica delle chiavi (QKD), reti quantistiche sicure, crittografia post-quantistica

Applicazioni principali

- QKD su fibra ottica (Cina: 4.600 km)
- EuroQCI: rete pan-europea
- Satelliti QKD in orbita bassa
- Protezione infrastrutture critiche

Settore con più brevetti fino al 2022; superato dal computing

⬡ Quantum Computing

TRL 3-5 (NISQ)

Calcolo su qubit con sovrapposizione e entanglement; NISQ attuale, fault-tolerant come obiettivo

Applicazioni principali

- Simulazione molecolare e drug discovery
- Ottimizzazione portfolio finanziario
- Previsione climatica e chimica verde
- Machine learning quantistico

Crescita 20x dal 2014; area più dinamica per brevetti e imprese

◎ Quantum Sensing

TRL 4-8

Sensori ultra-precisi basati su fenomeni quantistici; magnetometri, orologi atomici, interferometri

Applicazioni principali

- Imaging medico avanzato (tumori, farmaci)
- Navigazione GPS-free
- Rilevamento risorse geologiche
- Monitoraggio ambientale

+50% crescita brevetti dal 2014; più avanzato in termini di TRL

Il Technology Readiness Level (TRL) è una metrica basata su una scala da 1 a 9 che misura la maturità delle tecnologie quantistiche

Le Tipologie di Qubit

Ogni computer quantistico usa una fisica diversa per creare e controllare i qubit.



Superconduttori

IBM · Google · Rigetti

Più maturi

~100–1.121 qubit

COME FUNZIONA

Circuiti raffreddati a -273°C dove gli elettroni scorrono senza resistenza, creando stati quantistici controllabili.

✓ VANTAGGI

- Operazioni rapidissime (ns)
- Facile su chip
- Tecnologia matura

✗ LIMITI

- Raffreddamento estremo
- Coerenza breve ($\sim 100 \mu\text{s}$)

🔥 **Ultimo aggiornamento:** Google Willow (2024): 105 qubit, riduzione errori esponenziale.



Ioni Intrappolati

IonQ · Quantinuum · Oxford Ionics

Alta precisione

~50–64 qubit

COME FUNZIONA

Atomi ionizzati sospesi nel vuoto da campi elettromagnetici e controllati con laser di altissima precisione.

✓ VANTAGGI

- Fedeltà $>99.9\%$
- Coerenza lunga (secondi)
- Connessione totale

✗ LIMITI

- Operazioni più lente
- Difficile scalare

🔥 **Ultimo aggiornamento:** Quantinuum Helios (2025): 12 qubit logici error-corrected.

Le Tipologie di Qubit

Ogni computer quantistico usa una fisica diversa per creare e controllare i qubit.



Atomi Neutri

QuEra · Pasqal · Atom Computing

Scalabile

256–1.180 qubit

COME FUNZIONA

Atomi neutri intrappolati con 'pinzette ottiche' — laser focalizzati — in reticoli programmabili nello spazio.

✓ VANTAGGI

- Oltre 1.000 qubit fisici
- Coerenza >1 secondo
- Bassi errori

× LIMITI

- Controllo complesso
- Tecnologia emergente

📅 **Ultimo aggiornamento:** Atom Computing (2023): 1.180 qubit, coerenza 40 secondi.



Fotonici

PsiQuantum · Xanadu · ORCA

Reti quantistiche

12 → scalabile

COME FUNZIONA

I qubit sono fotoni — particelle di luce — codificati in polarizzazione o fase e manipolati con componenti ottici.

✓ VANTAGGI

- Operano a temp. ambiente
- Ideali per reti QKD
- Nessuna decoerenza da calore

× LIMITI

- Perdita di fotoni
- Entanglement complesso

📅 **Ultimo aggiornamento:** PsiQuantum (2025): \$700M+ raccolti, chip Omega, target 1M qubit.

Le Tipologie di Qubit

Ogni computer quantistico usa una fisica diversa per creare e controllare i qubit.



Topologici

Microsoft

Futuro

Ricerca

COME FUNZIONA

Usano quasiparticelle esotiche chiamate anyoni la cui natura topologica le protegge naturalmente dagli errori.

✓ VANTAGGI

- Errori intrinsecamente protetti
- Potenzialmente rivoluzionari
- Meno correzione errori

× LIMITI

- Ancora sperimentale
- Nessun sistema su larga scala

 **Ultimo aggiornamento:** Microsoft Majorana 1 (2025): primo chip topologico al mondo annunciato.



Spin in Silicio

Intel · TU Delft · CEA-Leti

CMOS-compatibile

Prototipo

COME FUNZIONA


Lo spin degli elettroni in chip di silicio — simili ai normali processori — viene usato come qubit quantistico.

✓ VANTAGGI

- Compatibile con fab esistenti
- Miniaturizzazione estrema
- Basso costo potenziale

× LIMITI

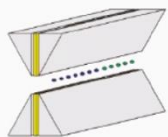
- Coerenza breve
- Ancora prototipale

 **Ultimo aggiornamento:** Intel Tunnel Falls (2023): 12 qubit spin-silicio, compatibile CMOS.

Le Piattaforme Quantistiche

Comunicazione · Calcolo (e simulazione) · Sensing – con fenomeni fisici abilitanti

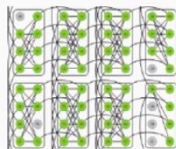
atoms



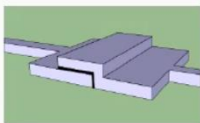
trapped ions



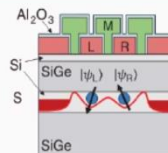
cold atoms



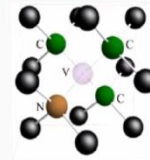
annealing



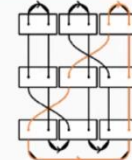
superconducting



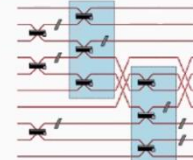
silicon



vacancies



topological



photons

1

2

3

4

5

6

DI:WAVE
The Quantum Computing Company™

QILMANJARO
QUANTUM TECH

NEC

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

La catena del valore quantistica



Equipment & Components

Controllo quantistico

Dispositivi che generano e consegnano impulsi di controllo per manipolare gli stati quantistici (Microonde/RF, Ottico)

Controllo ambientale

Sistemi di raffreddamento criogenico (es. refrigeratori a diluizione); Camere a vuoto per qubit stabili

Altri strumenti

Strumentazione di uso generale (es. generatori di segnale, amplificatori) usata negli esperimenti quantistici



Hardware

Superconduttori

Corrente che scorre in un anello di metallo superconduttore con due interruzioni

Ioni intrappolati

Livelli energetici interni di ioni intrappolati da campi elettromagnetici

Atomi neutri

Livelli energetici interni di atomi neutri intrappolati da fasci laser

Fotonici

Occupazione di una guida d'onda fotonica con fotoni

Spin

Spin elettronici di diversi materiali (es. elettrone in un quantum dot di silicio)



Systems Software

Sistema di controllo quantistico

Sistema di controllo tra hardware quantistico e applicazioni; include sistemi operativi, architetture di istruzioni e compilatori



Application Software

Cross-industry

Algoritmi e software applicabili a più settori (es. chimica, finanza, scienze della vita)

Drug discovery e materiali

Simulazioni quantistiche per modellazione molecolare, nuovi materiali e reazioni chimiche

Finanza e business

Applicazioni per diversi rami (es. ottimizzazione portafoglio, rilevamento frodi, analisi rischio, previsione finanziaria)



Servizi

Servizi quantistici

La maggior parte delle start-up quantistiche fornisce servizi hardware e software perché i prodotti sono specializzati in una tecnologia in fase iniziale

Catene di Fornitura critica

Dipendenze critiche crescenti in materiali e componenti strategici per le tecnologie quantistiche

Principali esportatori di beni rilevanti per il quantum

- Convertitori statici: Cina dominante – 50 economie dipendenti, ~40 da Cina
- Ossido di alluminio: Australia principale fornitore strategico (~30 dipendenze)
- Alluminio puro: Russia fornitore strategico (~30 dipendenze)
- Sali ossometallici: Corea fornitore più critico, dipendenze in crescita
- Binders/chemicals fonderia: Cina ruolo centrale
- Connettori elettrici: Cina principale fornitore strategico

Concentrazione del mercato

- Alta concentrazione in convertitori statici, ossido di alluminio, diamanti industriali
- Dipendenze aumentate rispetto al 2018-2019 nella quasi totalità delle categorie
- Forte rischio di disruzione delle supply chain per componenti quantistici avanzati

DIPENDENZE COMMERCIALI CRITICHE (2022-23 vs 2018-19)

Prodotto	Trend	Fornitore chiave
Convertitori statici	↑↑	Cina (~80%)
Ossido di alluminio	↑	Australia
Alluminio	↑	Russia
Sali ossometallici	↑↑	Corea
Binders/chemicals	↑	Cina
Connettori elettrici	→	Cina
Composti chimici drogati	↑	Vari
Carburo di silicio	↑	Cina, USA

Cluster e Start-up: Le start-up si stanno consolidando in cluster, con hub emergenti in Asia e cluster in crescita negli USA

START-UP QC – NUMERO DI AZIENDE PER PAESE

Paese	Fine 2023	Nuove 2024	Totale
USA	75	+2	77
Canada	28	+1	29
UK	24	+2	26
Giappone	14	–	14
Francia	11	–	11
Germania	11	–	11
Cina	10	+1	11
Resto del mondo	88	+7	95
Totale	261	+13	274

CLUSTER EMERGENTI

Tel Aviv

Ospita le principali istituzioni accademiche e start-up israeliane focalizzate sullo sviluppo QT lungo tutto il tech stack

Seul

Il hub collega università locali e organizzazioni di ricerca con start-up emergenti e player industriali

Abu Dhabi

Hub QT emergente, supportato da istituzioni come TII e Khalifa University, con focus su AI e innovazioni quantistiche

CLUSTER CONSOLIDATI

Le iniziative quantistiche USA, inclusi investimenti federali e statali, hanno accelerato l'emergere di cluster QT chiave:

- L'**Illinois** ha impegnato **\$500M nel 2024** per infrastrutture quantistiche e partnership
- Il **Maryland** ha lanciato un'iniziativa nel 2025 per catalizzare oltre **\$1B** in investimenti pubblico-privati

Fonte: Crunchbase; interviste a esperti; Oxford Economics; PitchBook; Quantum Computing Report; S&P Capital IQ; analisi McKinsey

I player chiave raggiungono traguardi rivoluzionari, ridisegnando l'ecosistema QC verso qubit logici scalabili (1/3)

Azienda	Innovazione e affermazione	Come funziona	Significato	Pubblicazione
Google <i>Circuiti superconduttori</i>	Ha dimostrato 1 qubit logico con fedeltà ~99,86% (0,143% errore) per un surface code distanza-7, usando 105 qubit fisici	Il processore Willow è un processore SC QC da 105 qubit che abilita qubit logici. Codificando qubit logici su patch sempre più grandi di qubit fisici, illustra la soppressione esponenziale dei tassi di errore – predizione chiave della teoria QEC	Google mostra come il tasso di errore possa essere soppresso esponenzialmente man mano che si aggiungono più qubit fisici usando algoritmi di correzione errori, aprendo la strada ai calcoli con qubit logici	<i>"Quantum error correction below the surface code threshold"</i>
AWS <i>Circuiti superconduttori</i>	Codificato 1 qubit logico in 5 qubit cat fisici per dati e 4 qubit ancilla per rilevamento sindromi (9 qubit fisici totali), con fedeltà ~98,35% per un codice distanza-5	Il circuito SC combina qubit cat bosonici con transmon ancilla per creare memoria di qubit logico, riducendo il numero di qubit fisici richiesti rispetto ai qubit superconduttori convenzionali e correggendo gli errori di phase-flip dei qubit cat	Il chip AWS mostra come i qubit cat possano combinarsi con qubit transmon per ottenere qubit logici con meno qubit fisici, creando potenzialmente un modo più efficiente di produrre hardware QC	<i>"Hardware-efficient quantum error correction using concatenated bosonic qubits"</i>
IBM <i>Circuiti superconduttori</i>	Preparato "magic state" logico in 4 qubit fisici su un chip Falcon da 27 qubit con fedeltà sopra il punto di pareggio (superiore alla fedeltà di un singolo qubit fisico) usando un codice distanza-2	Il circuito SC viene preparato nei cosiddetti magic state (stati in grado di completare un insieme universale di porte logiche). Preparare magic state ad alta fedeltà è essenziale	I "magic state" ad alta fedeltà sono essenziali poiché riducono il numero di qubit fisici necessari per architetture QC su larga scala	<i>"Encoding a magic state with beyond break-even fidelity"</i>

Fonte: ArXiv; siti web aziendali; interviste a esperti; press search; analisi McKinsey. ¹ Nome pubblicazione come pubblicato su ArXiv.

I player chiave raggiungono traguardi rivoluzionari, ridisegnando l'ecosistema QC verso qubit logici scalabili (2/3)

Azienda	Innovazione e affermazione	Come funziona	Significato	Pubblicazione
Microsoft <i>Qubit topologici</i>	Ha rivendicato il primo chip quantistico al mondo alimentato da una nuova architettura core topologica, con cui prevede di realizzare computer quantistici capaci di risolvere problemi su scala industriale in anni, non decenni	Il chip Majorana 1 impiega nanofili in una configurazione specifica, ognuno che ospita modi Majorana per formare potenzialmente un singolo qubit. Queste configurazioni possono potenzialmente essere collegate su tutto il chip, consentendo un design scalabile e modulare	Il chip Majorana 1 mira a superare le sfide della decoerenza quantistica e della correzione degli errori che hanno ostacolato i precedenti sforzi QC, aprendo la strada a qubit su larga scala	<i>"Interferometric single-shot parity measurement in an InAs-Al hybrid device"</i>
QuEra <i>Atomi neutri</i>	Due qubit logici ad alta fedeltà dimostrati usando un array di atomi neutri riconfigurabile con fino a 280 qubit fisici, migliorando le prestazioni delle porte migliorando il surface code dalla distanza-3 alla distanza-7	Questo risultato è stato reso possibile grazie a progressi nelle tecniche di correzione degli errori e allo sviluppo di architetture innovative di qubit logici. Migliorando la fedeltà, QuEra ha dimostrato la fattibilità di calcoli quantistici più accurati e affidabili	Il chip QuEra dimostra un processore quantistico programmabile che opera con fino a 280 qubit fisici, indicando che la piattaforma ad atomi neutri è scalabile verso sistemi con un grande numero di qubit logici (fisici)	<i>"Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays"</i>

Fonte: ArXiv; siti web aziendali; interviste a esperti; press search; analisi McKinsey. ¹ Nome pubblicazione come pubblicato su ArXiv.

I player chiave raggiungono traguardi rivoluzionari, ridisegnando l'ecosistema QC verso qubit logici scalabili (3/3)

Azienda	Innovazione e affermazione	Come funziona	Significato	Pubblicazione
Pasqal <i>Atomi neutri</i>	Sviluppato algoritmo ibrido quantum-classico che rileva intersezioni coniche — punti critici dove due superfici di energia potenziale di una molecola si incrociano. Queste intersezioni sono fondamentali in processi fotochimici come la visione e la fotosintesi	Il metodo di Pasqal usa il computer quantistico per rilevare intersezioni coniche nelle molecole, punti chiave dove le superfici di energia si incrociano e le reazioni chimiche spesso avvengono. L'algoritmo funziona usando un circuito quantistico per tracciare come cambia lo stato quantistico della molecola	Il metodo di Pasqal fornisce un algoritmo quantistico pratico per identificare caratteristiche critiche nei sistemi molecolari, aprendo la strada a simulazioni più efficienti di processi chimici complessi	<i>"A hybrid quantum algorithm to detect conical intersections"</i>
Quantinuum <i>Ioni intrappolati (post-selezione)</i>	Teleportazione fault-tolerant di 1 qubit logico con fedeltà di processo logico del 97,5%, codificata con 7 qubit dati e 3 ancilla (su un dispositivo a 30 ioni), usando il codice di Steane	Qubit a ioni intrappolati (mix di dati e qubit ancilla) utilizzati per la teleportazione fault-tolerant di qubit logici (tuttavia, nessuna operazione di porta logica condotta)	Il sistema mostra la teleportazione fault-tolerant per ioni intrappolati; la teleportazione abilita il trasferimento di informazioni affidabile e la distribuzione di entanglement tra qubit, critico per QC scalabile	<i>"High-fidelity and fault-tolerant teleportation of a logical qubit using transversal gates and lattice surgery on a trapped-ion quantum computer"</i>
Atom Computing <i>Atomi neutri</i>	Stato logico entangled a 24 qubit codificato in 48 qubit su un processore ad array neutro a 256 atomi; eseguito algoritmo Bernstein-Vazirani a 28 qubit logici con tassi di errore migliori rispetto all'uso di 28 qubit fisici, usando un codice distanza-2	Processore quantistico ad atomi neutri composto da 256 atomi Ytterbio per codificare uno stato logico entangled a 24 qubit e mostrare soppressione degli errori. I codici Surface-2 usati forniscono una proof of concept	L'array di atomi neutri mostra soppressione degli errori (nonostante codici di errore ridotti), illustrando come gli atomi neutri possano essere una modalità promettente verso i qubit logici	<i>"Logical computation demonstrated with a neutral atom quantum processor"</i>

Fonte: ArXiv; siti web aziendali; interviste a esperti; press search; analisi McKinsey. ¹ Nome pubblicazione come pubblicato su ArXiv.

Il controllo quantistico svolge un ruolo chiave nel far avanzare le modalità quantistiche e nel superare le loro sfide

Modalità	Sfide di controllo e lettura	Controllo criogenico	Sfide di controllo specifiche per tecnologia
Reti Fotoniche	Manipolazione percorsi luce, polarizzazione e fase; rilevamento di singoli fotoni	Non richiesto	Sviluppare sistemi laser scalabili ad alta precisione minimizzando l'uso di componenti attivi
Circuiti SC	Creazione impulsi a microonde per controllo e lettura; integrazione elettronica di controllo nel criostato	Richiesto	Costruire architettura di controllo scalabile e migliorare metodi di calibrazione (es. passare dal cablaggio al controllo su chip SFQ)
Spin Qubits	Creazione impulsi a microonde per indurre rotazioni coerenti degli stati di spin nel silicio (spesso potenziato da nanomagneti)	Richiesto	Adattare il controllo su chip SFQ ai qubit di spin perché più piccoli dei qubit SC, e la dimensione SFQ corrisponde alla scala SC
Atomi Neutri	Manipolazione e intrappolamento di atomi con fasci laser focalizzati (pinzette ottiche); cattura della luce emessa dagli atomi	Alcune soluzioni	Sviluppare laser più potenti per il controllo individuale dei qubit, riducendo anche la perdita di fotoni
Ioni Intrappolati	Manipolazione degli ioni tramite controllo a microonde, usando guide d'onda; azionamento dei qubit tramite controllo fotonico con laser	Alcune soluzioni	Ottimizzare lo spazio nella camera a vuoto poiché un alto numero di qubit controllati individualmente deve essere collocato qui

Gli Stati Uniti e il Giappone guidano gli altri Paesi nel numero di brevetti QT concessi

Paese	QT Totale	QC	QComm	QS
USA	18.649	12.105	6.176	368
Giappone	9.400	8.321	961	118
Germania	8.500	8.158	269	73
Cina ²	7.601	5.306	2.232	63
Francia	7.220	6.851	353	16
Svizzera	2.192	1.990	189	13
Canada	1.984	1.207	714	63
UK	1.925	1.375	505	45
Corea del Sud	1.799	1.453	320	26
Italia	1.528	1.443	70	15
Paesi Bassi	1.443	1.353	82	8

NB- Il numero di brevetti concessi nel 2024 è incompleto (tempo di pubblicazione); L'attuale attività brevettuale della Cina non riflette accuratamente gli sforzi in corso nelle domande di brevetto.

Fonte: McKinsey. Quantum Monitor 2025, Brevetti QT concessi, per sede HQ dell'azienda, 2000-24¹, Patsnap, accesso marzo 2025

Gli Stati Uniti e il Giappone guidano gli altri Paesi nel numero di brevetti QT presentate

Paese	QT Totale	QC	QComm	QS
Cina	35.540	29.105	6.061	374
USA	34.831	20.202	13.407	1.222
Giappone	14.353	12.025	2.094	234
Francia	8.417	7.665	708	44
Germania	6.330	5.196	965	169
Canada	3.972	2.215	1.640	117
UK	3.566	2.000	1.439	127
Corea	2.711	2.005	678	28
Svizzera	2.049	1.664	347	38
Paesi Bassi	1.688	1.380	280	28
Israele	1.399	935	403	61

Fonte: McKinsey. Quantum Monitor 2025, Brevetti QT concessi, per sede HQ dell'azienda, 2000-24¹, Patsnap, accesso marzo 2025

La Cina guida significativamente nel numero di pubblicazioni scientifiche nelle riviste di scienze fisiche

2023



2024



Quota di pubblicazioni scientifiche per Paese e anno (relativa al totale globale). Autori da istituzioni di ricerca nazionali che contribuiscono a pubblicazioni nelle scienze fisiche, basata sulla quota di pubblicazioni¹

Fonte: McKinsey. Quantum Monitor 2025, Brevetti QT concessi, per sede HQ dell'azienda, 2000-24¹, Patsnap, accesso marzo 2025

Il mercato interno totale per la tecnologia quantistica potrebbe raggiungere un totale stimato di \$198 miliardi entro il 2040

SCENARI DI DIMENSIONE DEL MERCATO QT NEL 2035 E 2040

Basato sulle road map di sviluppo esistenti e sulla curva di adozione ipotizzata

Anno	QC	QComm	QS ²
2035	\$28B-\$72B	\$11B-\$15B	\$7B-\$10B
2040	\$45B-\$131B	\$24B-\$36B	\$18B-\$31B

Stima McKinsey 2025 basata sulle road map di sviluppo esistenti e sulle curve di adozione ipotizzate per tecnologia. Approccio per QS aggiornato tramite cluster di casi d'uso basati su sviluppi, annunci e breakthrough recenti.

Il mercato interno totale per la tecnologia quantistica potrebbe raggiungere un totale stimato di \$198 miliardi entro il 2040

Valore economico: + Basso ++ Medio +++ Alto

Settore	Segmento chiave per QC	~2025–30	~2030–35	Valore a rischio al 2035 ² (\$B)
Settore finanziario	Servizi finanziari	++	+++	400–600
Energia e materiali globali	Oil & gas	+	++	200–500
	Energia sostenibile ³	+	+++	
	Chimica	++	+++	
Trasporti e logistica	Trasporti e logistica	+	+++	200–500
Farmaceutica e dispositivi medici	Farmaceutica	++	+++	200–500
Industrie avanzate	Automotive	+	++	70–400
	Aerospazio e difesa	+	++	
	Elettronica avanzata	+	++	
	Semiconduttori	+	++	
Assicurazioni	Assicurazioni	+	++	50–100
Telco, media e tecnologia	Telecomunicazioni	+	++	–
	Media	+	+	
Totale				900–2.000

¹ Il valore economico è definito come i ricavi aggiuntivi e i costi risparmiati che l'applicazione del QC può sbloccare.

² Le stime del valore sono approssimative, non proiezioni definitive del valore aziendale.

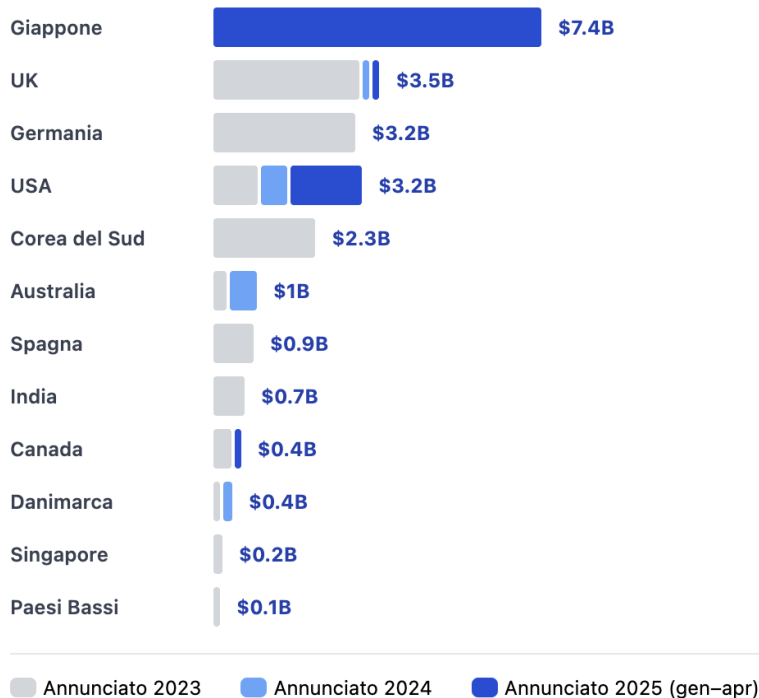
³ Il mercato delle energie sostenibili è atteso in rapida crescita dal 2022 al 2035. Tuttavia, la dimensione del mercato al 2035 è influenzata da numerosi fattori ed è difficile da prevedere.

Fonte:
Economics;
McKinsey

Oxford
analisi

Gli annunci di investimenti pubblici in QT hanno raggiunto \$10 miliardi all'inizio del 2025, con il Giappone che rappresenta quasi il 75%

INVESTIMENTI GOVERNATIVI ANNUNCIATI IN QT, GEN 2023–APR 2025 (\$B)



Totale 2023: ~11,4B

Totale 2024: ~1,8B

Totale 2025 (gen-apr): ~10,0B

UK, Germania e Corea del Sud avevano i più grandi investimenti nel 2023; USA e Australia nel 2024.

Il Giappone ha annunciato un significativo investimento da \$7,4B nel 2025, illustrando un crescente interesse asiatico per la QT.

Molti annunci di finanziamento pubblico includono piani per attrarre investimenti privati come parte degli obiettivi del programma.

Nota: Trasparenza limitata sull'attività commerciale in Cina; esclude l'investimento annunciato di \$136B verso tecnologie emergenti. Il Giappone include anche la progettazione di chip di nuova generazione. Fonte: Press search

Gli annunci pubblici sono saliti a circa \$10 miliardi all'inizio del 2025, guidati da importanti iniziative in Giappone, Spagna e USA

■ Annunciato nel 2024 o gen-apr 2025 ■ Annunciato prima del 2024

UK

Il governo UK (DSIT) ha annunciato \$130M in finanziamenti per cinque hub di ricerca quantistica

US

Investimenti multipli in QT: \$500M dallo Stato dell'Illinois, \$625M dal DOE, Stato del Maryland con obiettivo \$1B

Singapore

Annunciata Strategia Quantistica Nazionale: ~\$222M in ricerca QT e talenti nei prossimi 5 anni

Danimarca

Novo Holdings ha annunciato \$213M per sviluppare un hub globale di innovazione QT in Danimarca

Cina

Aumentati i finanziamenti governativi per R&S quantistica a oltre \$15B, con applicazioni in sicurezza, difesa e AI

UK

La Strategia Nazionale Quantistica ha introdotto nuovi obiettivi strategici per i prossimi 10 anni, con \$3,1B aggiuntivi

Canada

Il governo canadese ha lanciato la National Quantum Strategy con \$360M nel 2023

India

Annunciata la National Quantum Mission con \$730M per incentivare R&S quantistica

Spagna

Annunciata la National Quantum Technology Strategy: \$900M verso il 2030 per avanzare nella scienza quantistica

Canada

Investimento di \$52M in QT, coprendo QC, QComm e QS

Australia

I governi Commonwealth e Queensland hanno annunciato \$620M per PsiQuantum per costruire un computer quantistico fault-tolerant a Brisbane

Giappone

Il governo ha annunciato \$7,4B per la ricerca su chip di nuova generazione e QC

Corea del Sud

Piani di investimento di \$2,3B in scienza e tecnologia quantistica entro il 2035

Paesi Bassi

Il National Growth Fund ha allocato \$65M a Quantum Delta NL nel 2023

USA

Nel 2018 il US ha annunciato il National Quantum Initiative con \$1,2B su cinque anni

Francia

Impegno a stabilire una posizione di leadership nella QT con \$1,3B annunciato nel 2021

Nota: Trasparenza limitata sull'attività commerciale in Cina; esclude l'investimento di \$136B verso tecnologie emergenti. Fonte: McKinsey 2025

QUANTUM COMPUTING E STRATEGIE INTERNAZIONALI E NAZIONALI

Rischi ed Opportunità

Il Q-Day



La Minaccia Quantistica alla Crittografia



ATTENZIONE: L'algoritmo di Shor (1994) risolve RSA e ECC in tempo polinomiale su un quantum computer fault-tolerant.

Sistemi potenzialmente a rischio nella PA Italiana

Sistema	Algoritmo	Impatto
SPID / CIE	RSA-2048 / ECC-256	Identità digitale compromessa
Firme digitali (CAdeS/XAdES)	RSA-2048	Documenti non verificabili
PEC	TLS (RSA/ECC)	Comunicazioni intercettabili
VPN Enti	TLS 1.3 (ECDHE)	Accessi non sicuri
NoSQL/SQL crittografati	AES-256 (simmetrico)	Relativamente sicuro

'Harvest Now / Decrypt Later': avversari raccolgono oggi traffico cifrato per decifrarlo quando avranno quantum computer. I dati sensibili della PA sono già a rischio.

QComm: Il Q-Day introdurrà un cambiamento fondamentale nella sicurezza, richiedendo l'adozione precoce di QComm e guidando la crescita del mercato

Definizione di Q-Day

Il punto in cui i computer quantistici possono rompere la crittografia classica, esponendo dati sensibili e creando un bisogno urgente di misure di sicurezza quantum-safe

Impatto dopo il Q-Day

I dati sensibili che usano la crittografia legacy (incluse informazioni private critiche) diventano vulnerabili, portando a potenziale grande disruzione economica e sociale

Driver del Q-Day

Il principale driver è l'innovazione che influisce sulle prestazioni di sistema, significativamente determinata da finanziamenti, talenti e breakthrough dei player

INSIGHT CHIAVE

- Il Q-Day potrebbe essere un cambiamento critico nelle strategie di sicurezza, richiedendo adozione precoce e potenziali partnership con i first-mover in QComm e reti.
- La dimensione totale del mercato QComm era di ~\$1,0B nel 2023 ed è proiettata a raggiungere \$10,5B–\$14,9B entro il 2035, con un CAGR del 22–25%.
- I governi sono attesi a detenere la quota cliente più grande, al 62–66% nel 2023; il coinvolgimento del settore privato è proiettato a crescere rapidamente.

Fonte: Alice & Bob; Crunchbase; interviste a esperti; Google; Craig Gidney e Martin Ekerå, "How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits," *Quantum*, Aprile 2021; IBM; literature review; Microsoft; PitchBook; press search; Quantinuum; Quantum Computing Report; QuEra; S&P Capital IQ; Gabriel Popkin, "The internet goes quantum," *Science*, 2021, Vol. 372, N. 6546; analisi McKinsey

Post-Quantum Cryptography (PQC): Gli Standard 2024

NIST FIPS – Standard Agosto 2024

FIPS 203

ML-KEM (CRYSTALS-Kyber)

Key Encapsulation Mechanism
(sostituto TLS/VPN)

FIPS 204

ML-DSA (CRYSTALS-Dilithium)

Firma digitale post-quantum
(sostituto RSA/ECDSA)

FIPS 205

SLH-DSA (SPHINCS+)

Firma digitale alternativa
based su hash (backup)

Roadmap PA Italiana verso la PQC

1

ACN – Strategia Nazionale Cyber 2022-26

Prevede migrazione progressiva verso algoritmi PQC nelle infrastrutture critiche. Priorità a SPID e CNS.

2

EU Cybersecurity Act + NIS2 (D.Lgs. 138/2024)

Impone misure tecniche adeguate anche al rischio quantistico per operatori di servizi essenziali.

3

ETSI Quantum Safe Cryptography

Standard europei in evoluzione: QSC-003 e QSC-006 per reti pubbliche e PKI governative.

Opportunità del Quantum Computing per la PA



Ottimizzazione logistica e mobilità

- Ottimizzazione percorsi trasporto pubblico
- Gestione flotte e manutenzione predittiva mezzi
- Risoluzione del Vehicle Routing Problem



Simulazione e pianificazione urbana

- Modellazione scenari di rischio idrogeologico (CNR + CINECA 2023)
- Simulazione impatto urbanistico di varianti PRG
- Ottimizzazione reti idriche e distribuzione energia



AI Quantistica e analisi dati

- Quantum Machine Learning (QML) per fraud detection tributario
- Classificazione accelerata di documenti PA (QSVM)
- Analisi predittiva su grandi dataset demografici



Quantum Key Distribution (QKD)

- Comunicazioni teoricamente inviolabili tra sedi lontane
- Standard ETSI GS QKD 014 per integration in reti IP



Sanità e Ricerca Pubblica

- Drug discovery accelerata (simulazione molecolare)
- Ottimizzazione allocazione risorse sanitarie
- Analisi genomica per medicina di precisione (ISS 2024)



Finanziamenti e iniziative EU

- Quantum Flagship EU: €1 miliardo 2018-2028
- PNQC: Piano Nazionale Quantum Continuum (2024)
- EuroHPC Quantum: accesso a risorse per PA ed enti pubblici

In Sintesi

BENEFICI POTENZIALI (una volta a maturità)

Sanità

Sensori per imaging precoce tumori; accelerazione drug discovery via simulazione molecolare; sequenziamento DNA

Energia

Ottimizzazione reti elettriche; cattura del carbonio; esplorazione geologica a minore impatto ambientale

Logistica

Risoluzione di problemi di routing su scala massiva; diagnostica batterie per veicoli elettrici

Materiali

Rilevamento difetti microscopici; progettazione di materiali più leggeri, resistenti ed efficienti

Finanza

Timestamping con orologi atomici; ottimizzazione portfolio; previsione rischi di mercato

Sicurezza

Reti quantistiche per proteggere infrastrutture critiche; crittografia quantum-safe

RISCHI E SFIDE CRITICHE

Minaccia alla crittografia

I computer quantistici potranno violare RSA e altre cifrature asimmetriche ampiamente usate, mettendo a rischio dati finanziari, infrastrutture e comunicazioni riservate.

Uso duale (dual-use)

Applicazioni in crittanalisi, raccolta intelligence e sviluppo di armi creano rischi di sicurezza nazionale che spingono i paesi a costruire capacità domestiche.

Privacy e sorveglianza

Sensori quantistici avanzati sollevano preoccupazioni per sorveglianza arbitraria e violazioni della privacy; la regolamentazione è ancora assente.

Dipendenze nelle catene di fornitura

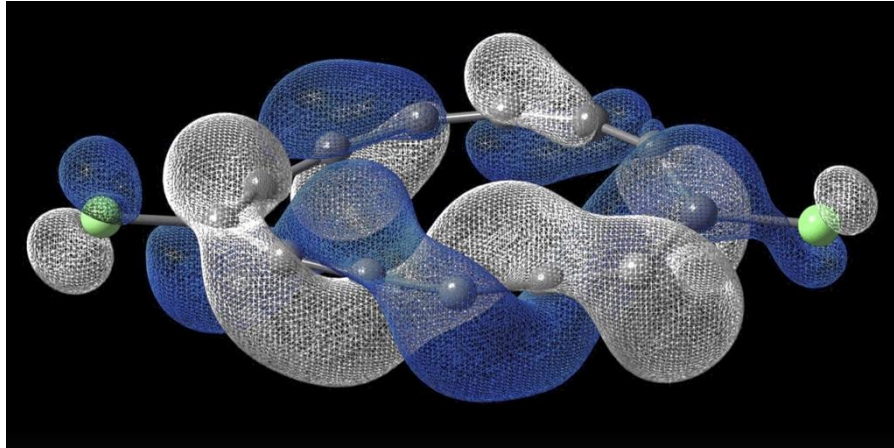
Crescente concentrazione in materiali critici (convertitori statici, ossido di alluminio, sali ossometallici). Cina dominante in diverse categorie.

Timeline incerte e investimento privato

La maggior parte delle tecnologie non è ancora commercializzata; le lunghe tempistiche scoraggiano gli investitori privati senza supporto pubblico.

IBM crea una molecola mai vista prima e la studia con un computer quantistico *(Science, 5 marzo 2026)*

Un team internazionale di ricercatori di IBM, Università di Manchester, Oxford, ETH Zurigo, EPFL e Università di Regensburg ha sintetizzato e caratterizzato una molecola del tutto nuova — **mai esistita in natura né mai prevista teoricamente** — e ha usato un computer quantistico per capire perché si comporta in modo così insolito.



<https://newsroom.ibm.com/2026-03-05-ibm-and-university-researchers-create-a-never-before-seen-molecule-and-prove-its-exotic-nature-with-quantum-computing>

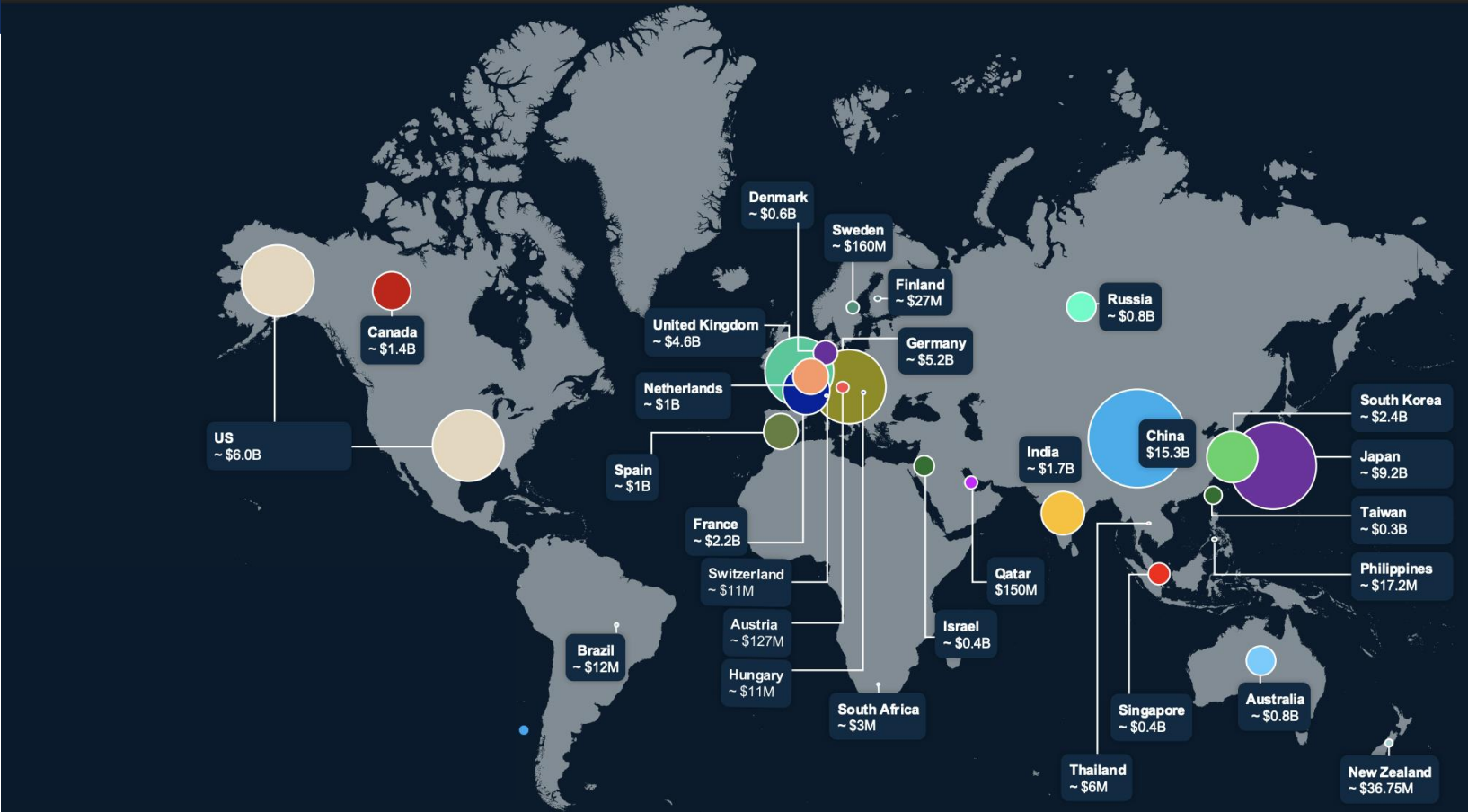
QUANTUM COMPUTING E STRATEGIE INTERNAZIONALI E NAZIONALI

Strategie Nazionali nel Mondo

*Analisi completa di innovazione · brevetti · investimenti · competenze ·
commercio · politiche pubbliche*



Gli investimenti nazionali annunciati nel 2025 vanno oltre 55 Bln (\$)



PANORAMICA: LA CORSA GLOBALE AL QUANTUM

Perché governi di tutto il mondo stanno investendo massicciamente nelle tecnologie quantistiche

\$55,7 Mld

Impegni governativi
dal 2013 a livello mondiale
(Qureca, 2025)

18+

Paesi OCSE
con strategie nazionali formali
(Nov. 2025)

250+

Politiche censite
in 40 paesi + UE (Database
OCSE)

4.622

Organizzazioni
nell'ecosistema quantistico
globale (EPO/OCSE)

20%

CAGR brevetti
crescita annua IPF dal 2014 (vs
2% in altri settori)

830

Imprese core
focalizzate primariamente sul
quantum

\$20 Mld

Finanziamenti privati
alle imprese core 2014-2024
(85% del totale)

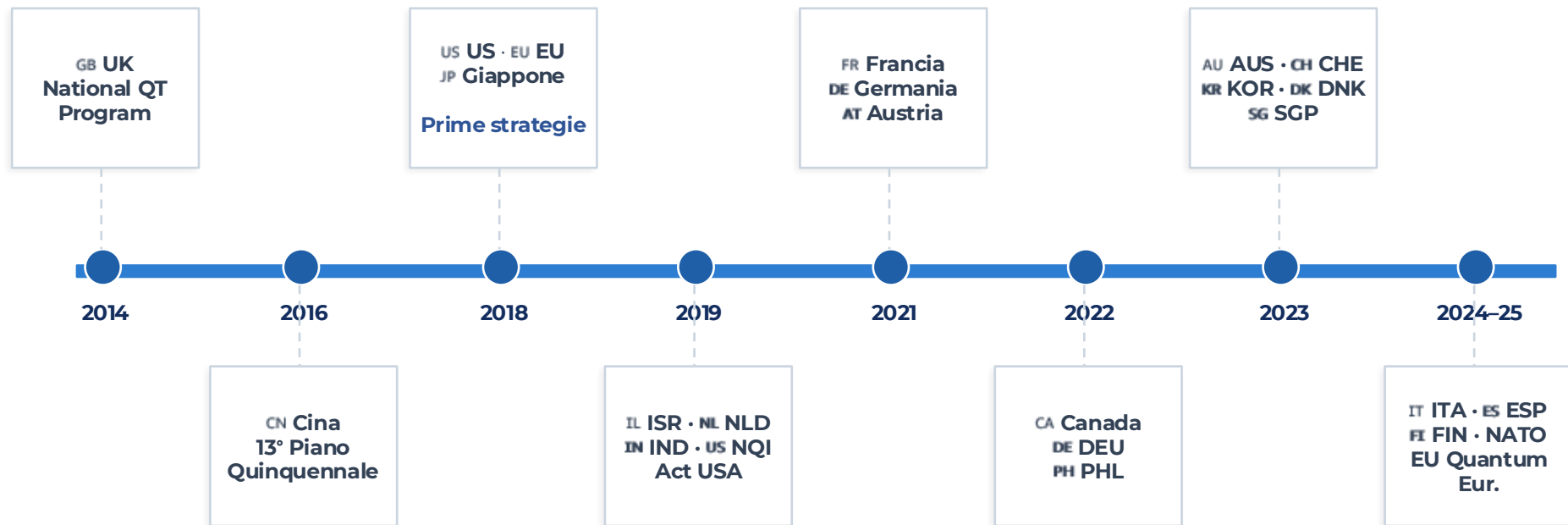
12.209

Progetti R&S finanziati
pubblicamente tra 2015 e 2023
(OCSE Fundstat)

Anno Internazionale della Scienza e Tecnologia Quantistica (2025) - Il 2025 segna 100 anni dallo sviluppo iniziale della meccanica quantistica. Governi, industria e università convergono verso un ecosistema globale capace di tradurre le promesse teoriche in applicazioni concrete, in settori che spaziano dalla difesa alla sanità, dalla finanza all'energia.

TIMELINE DELLE STRATEGIE NAZIONALI (2014–2025)

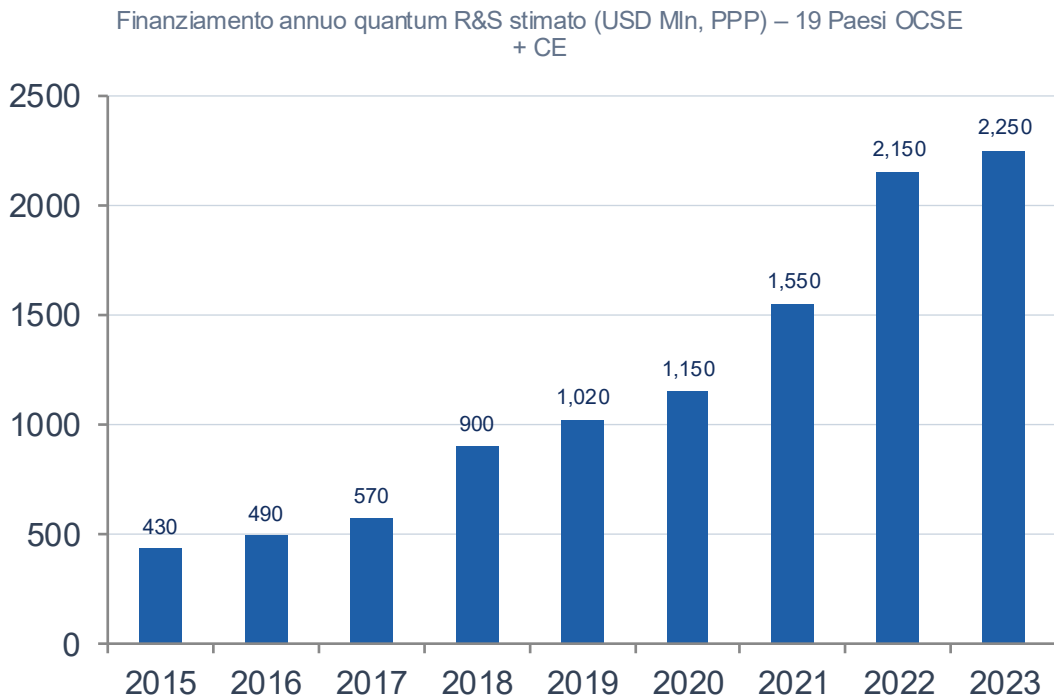
Dall'iniziativa pionieristica del Regno Unito all'esplosione globale di strategie formali



Acceleratori chiave: COVID-19 (stimoli NextGenerationEU >€800 Mld) · CHIPS and Science Act USA 2022 · Tensioni geopolitiche tecnologiche · Draghi Report per competitività UE (2024)

FINANZIAMENTO PUBBLICO R&S QUANTISTICO (2015-2023)

Crescita sostenuta con picco nel 2022-23; dimensione media premi superiore a tutti gli altri settori R&S



Dati Chiave – OCSE Fundstat

12.209

progetti R&S quantum finanziati (2015-23)

\$0,92 Mln

dimensione media premio vs \$0,75 in altri R&S

>33%

del totale in soli 2 anni (2022+2023)

0,4% → 1,1%

quota quantum sul totale GBARD (2015→2023)

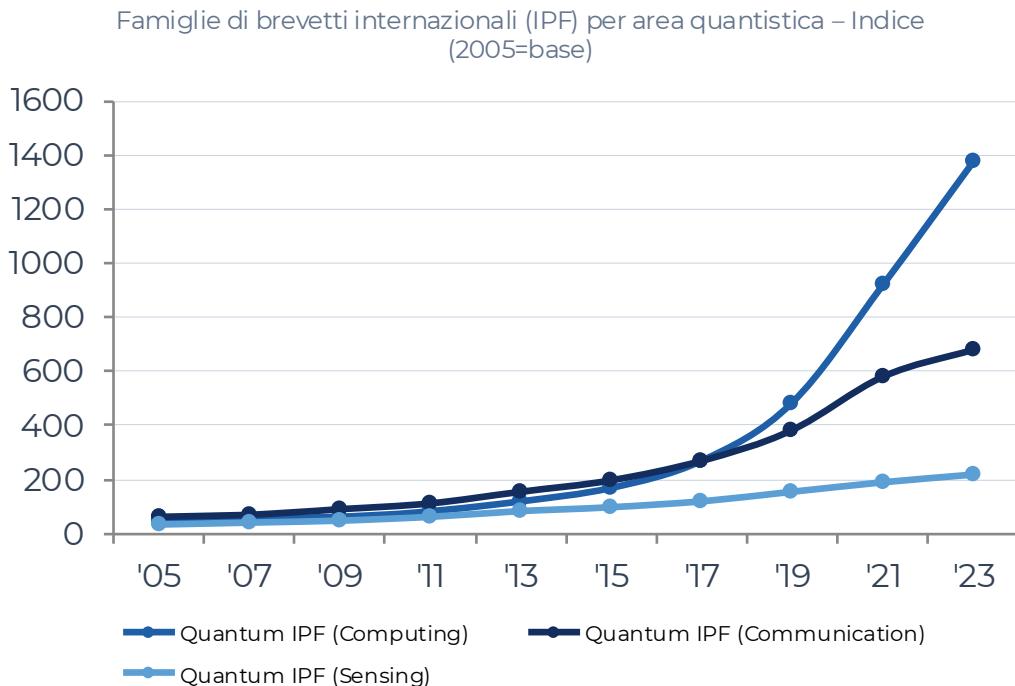
~0,8%

dei progetti finanziati erano quantum nel 2023

Nota: i premi quantum superano la dimensione media di tutti gli altri R&S dal 2018 (eccezione 2020 per COVID). Copertura ~51% GBARD paesi analizzati.

ECOSISTEMA BREVETTUALE E INNOVAZIONE QUANTISTICA

Analisi EPO su 163 paesi: crescita 7x delle famiglie di brevetti internazionali dal 2005 al 2024



Principali evidenze brevettuali

x7 Crescita IPF quantum totale 2005→2024

20% CAGR computing dal 2014 vs 2% in tutti i settori

31% Tasso internazionalizzazione quantum vs 12% globale

US→31% Quota USA scesa dal 41% (2015-19) al 31% (2020-24)

UE ↑ Europa in crescita: Germania, UK, Francia trainanti

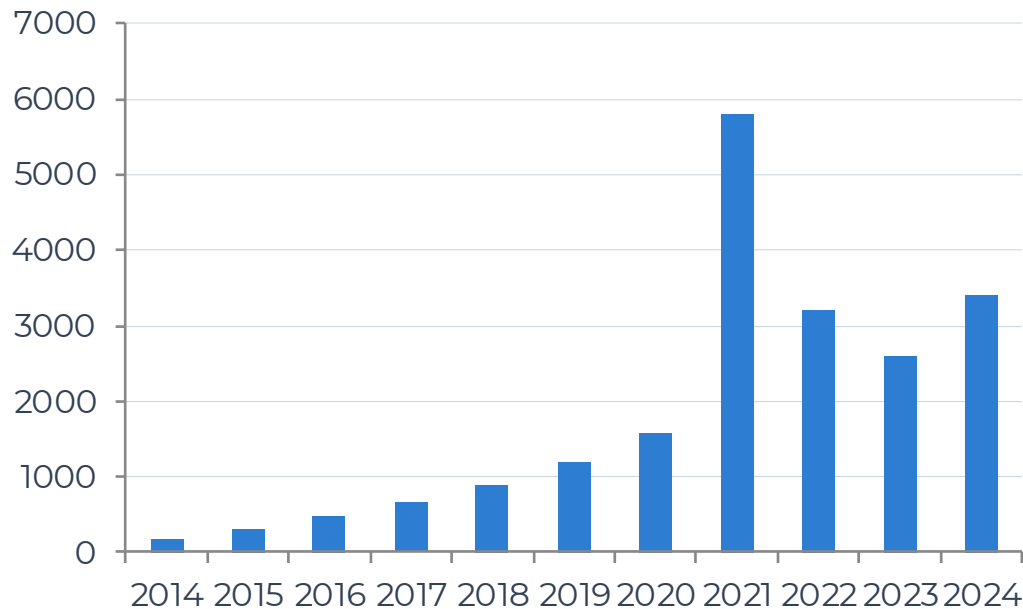
50%+ PhD Fondatori imprese core hanno dottorato (vs 10% media)

Top RTA: Canada, UK, Finlandia, USA, Francia, Paesi Bassi

IMPRESE QUANTISTICHE E INVESTIMENTI PRIVATI

Ecosistema di 4.622 organizzazioni; investimenti privati cumulati \$20 Mld con picco nel 2021

Finanziamenti totali a imprese core quantum (USD Mln) – 2014-2024



Struttura dell'Ecosistema Quantistico

4.622

organizzazioni nell'ecosistema quantistico totale

830

imprese core (quantum come attività primaria)

>80%

dell'ecosistema è composto da non-core (grandi aziende, università, PRO)

60%

dei fondi globali va a imprese USA (vs 30% dei brevetti)

~50%

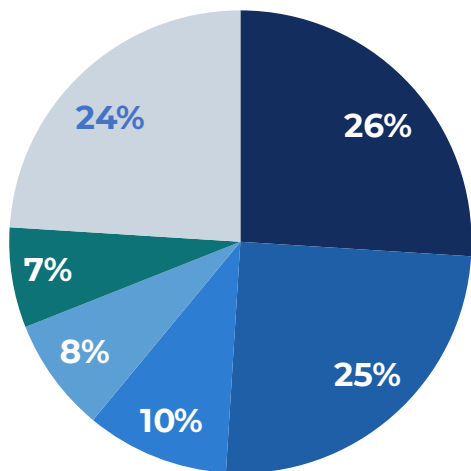
dei fondatori di imprese core hanno un dottorato di ricerca

Nota: Picco investimenti nel 2021 (\$5,8 Mld), poi plateau con calo della dimensione media dei deal (non del numero di imprese finanziate). Parziale ripresa nel 2024. Le imprese large established (non-core) saranno probabilmente i principali commercializzatori una volta maturate le tecnologie.

COMPETENZE E MERCATO DEL LAVORO QUANTISTICO

Analisi degli annunci di lavoro in Canada, UK e USA: domanda concentrata, profili altamente specializzati

Distribuzione % delle vacancies per categoria occupazionale



■ Informatica & CS ■ Scienza & Ricerca ■ Educaz. & Training ■ Ing. elettrica & elettronica ■ Soft. Dev. & Testing ■ Altro

Caratteristiche della forza lavoro quantistica

- Oltre il 50% dei fondatori di imprese core ha un dottorato (vs 10% media)
- Domanda di competenze quantistiche concentrata in poche categorie tech
- Picco di offerte di lavoro a fine 2022; plateau successivo simile agli investimenti
- Ruoli di commercializzazione (marketing, vendite) <10% delle vacancies

Competenze più richieste (2025)

- Quantum computing/information: skill più dominante nelle vacancies
- Fotonica: crescita domanda supera altre quantum-enabling skills
- Python, C++, software quantistico (Qiskit, Cirq): centrali per ruoli applicativi
- Nuove skill emergenti 2025: ottimizzazione, machine learning quantistico
- Competenze trasversali crescenti: project management, comunicazione

5 STRUMENTI FONDAMENTALI DI POLICY QUANTISTICA

Come i governi traducono le strategie quantistiche in azioni concrete e finanziamenti mirati

1 Finanziamento Istituzionale R&S Pubblica <ul style="list-style-type: none">• Ricerca fondamentale e applicata in università e centri• Infrastrutture, testbed e cloud computing quantistico• Formazione dottorale e pipeline talenti <p><i>Es: USA NSF \$148M · CH \$200M · SG \$200M · DE \$1 Mld DLR · AU \$650M</i></p>	2 Grant per Progetti di Ricerca Pubblica <ul style="list-style-type: none">• Bandi competitivi per ricerca multidisciplinare• Programmi di collaborazione internazionale• Transizione da ricerca a applicazioni market-ready <p><i>Es: FR \$170M PROQCIMA · EU QuantERA \$120M · JP Moonshot · CA \$120M</i></p>	3 Grant per R&S del Settore Privato <ul style="list-style-type: none">• Progetti industry-led per ridurre il rischio di investimento• Sfide settoriali: sanità, energia, difesa, finanza• Commercializzazione e di prodotti e servizi quantum <p><i>Es: UK \$200M Challenge · IL \$35M Consortium · FI \$10M Industrial</i></p>	4 Appalti Pubblici Pre-commerciali <ul style="list-style-type: none">• Commissionamenti o R&S e servizi innovativi alle imprese• Accelera TRL e sviluppo soluzioni pre-commerciali• Favorisce trasferimento tecnologico internazionale <p><i>Es: AU \$1 Mld PsiQuantum · FR \$500M PROQCIMA · CA QEYSSat</i></p>	5 Finanziamento Azionario (Equity) <ul style="list-style-type: none">• Partecipazioni azionarie in startup e PMI quantum• De-risking per attrarre capitale privato complementare• Sostegno a spin-off da università e laboratori pubblici <p><i>Es: AT \$5M Alpine QT · DK \$10M Atom Computing · ES \$70M Multiverse</i></p>
--	--	---	--	---

PROFILI NAZIONALI APPROFONDITI: PRINCIPALI INVESTITORI

Strategie, obiettivi misurabili e programmi emblematici nei paesi leader

US Stati Uniti

- National Quantum Initiative Act (NQIA) + CHIPS Act 2022 estende budget dedicati
- 5 National QIS Research Centres (Dept. of Energy): 1.500+ esperti, 115 istituzioni
- DARPA Quantum Benchmarking Initiative: QC industrialmente utile entro 2033
- \$148M NSF Quantum Leap Challenge Institutes · Workforce Strategic Plan 2022
- Governance: White House OSTP al massimo livello esecutivo

DE Germania

- €2 Mld totali (pacchetto stimolo COVID) · \$1 Mld DLR Quantum Computing Initiative
- Target: QC competitivo con 100 qubit entro 2026, scalabile a 500 qubit
- Application Network for Quantum Computing: demo applicativi industria/scienza
- Due innovation hub (Amburgo e Ulm) con cleanroom, laboratori, startup incubation
- Roadmap 2022: QC fault-tolerant entro 15 anni (universale, scalabile)

GB Regno Unito

- Strategia costruita su 5 missioni esplicite con target 2030–35
- Target: 15% quota mercato globale quantum entro 2033
- £110M+ Quantum Technology Hubs in 5 università (computing, comunicazione, sensing)
- Office for Quantum (DSIT); Quantum Testbed Competition per hardware
- US-UK Quantum Accord: primo accordo bilaterale formale tra le due potenze

FR Francia

- Governance al Primo Ministro: piano quantistico da €1,8 Mld (Francia 2030)
- \$500M+ PROQCIMA (Ministero Difesa): QC fault-tolerant per uso militare entro 2032
- \$170M Priority Research Programme (CNRS, CEA, Inria): ricerca fondamentale e PoC
- \$75M Hybrid HPC-Quantum: integrazione supercomputing classico e quantistico
- PROQCIMA target: 128 qubit logici (2032) e 2048 qubit logici (2035)

JP Giappone

- Obiettivo: produzione QT per JPY 50 trilioni entro 2030 (Cabinet Office 2024)
- \$425M Global R&D Center for Business by Quantum-AI Technology (METI)
- QC cloud da 127 qubit IBM all'Università di Tokyo per l'industria
- Moonshot R&D 2020–2030: NISQ funzionale + correzione errori entro 2030
- Quantum Leap Flagship: da 100-1000 qubit a 1 milione qubit come obiettivo ultimo

AU Australia

- \$650M National Quantum Strategy (National Reconstruction Fund)
- Quasi \$1 Mld per partnership PsiQuantum (Brisbane): QC fault-tolerant utility-scale
- ARC Centres of Excellence: \$90M per bridging teoria quantistica e ingegneria
- Accordi bilaterali quantum con US, UK, Canada, Giappone, Corea e altri
- National Committee on Quantum: advisory board per policy governativa

COLLABORAZIONE INTERNAZIONALE, STANDARD E CONTROLLO DELLE ESPORTAZIONI

La scienza quantistica storicamente internazionale affronta pressioni geopolitiche crescenti

Tendenze nella co-autorialità scientifica internazionale

- Quantum: tasso co-autorialità più alto vs tutti i settori scientifici (2008-2022)
- 33% → <30%: calo progressivo co-autorialità internazionale 2019-2022
- US-UE: -15% intensità collaborazione 2018-2022 (dato allarmante)
- Europa ~40%: Francia, Germania, Italia, Spagna, Svizzera le più internazionalizzate
- IPF: tasso internazionalizzazione 31% vs 12% in tutti i settori brevettuali

Accordi bilaterali quantum (20+ censiti)

- USA: accordi formali con almeno 10 paesi (il più attivo globalmente)
- UK: accordi bilaterali con almeno 6 paesi incluso US-UK Quantum Accord
- Tipologie: Joint Statements, MoU, Dichiarazioni di Cooperazione, Accordi formali

ORGANISMI DI STANDARDIZZAZIONE QUANTUM

IEEE SA

P7130 (definizioni), P7131 (metriche), P3120 (architetture), P1943 (sicurezza PQ)

IEC/ISO JTC 3

Standard per computing, simulazione, metrologia, rilevatori, comunicazioni

CEN-CENELEC JTC 22

Standard mercato europeo: metrologia, computing, crittografia QKD

NIST (USA)

Post-Quantum Cryptography: ML-KEM, ML-DSA, SLH-DSA, HQC, FALCON

ITU-T

Quantum Key Distribution: Y.3800 (overview), Y.3801 (requisiti rete QKD)

⚠️ **Controllo Esportazioni Quantum**

16 paesi hanno implementato controlli sulle esportazioni di tecnologie quantum (incluso soglia 34 qubit). Australia, Canada, Cina, USA, UK, Germania, Francia, Giappone, Corea, Paesi Bassi, Norvegia e altri.

QUANTUM COMPUTING E STRATEGIE INTERNAZIONALI E NAZIONALI

La Strategia Europea

Framework regolatorio, iniziative strategiche e posizionamento dell'UE nella corsa quantistica globale



Il framework regolatorio europeo

L'architettura normativa si consolida attraverso strumenti progressivamente vincolanti.

Strumento	Data / Stato	Natura
Dichiarazione Europea sul Quantum	Dic. 2023 → Agg. Mar. 2024 (21 SM)	Impegno politico
Quantum Flagship Programme	Attivo dal 2018 — €1 Mld (2018–2028)	Finanziamento R&I
EuroQCI — QKD Infrastructure	In deployment 2025–2027	Infrastruttura critica
Lista Dual-Use UE (mod. 2021/821)	Settembre 2025 — quantum inserito	Controllo export
Quantum Europe Strategy	Luglio 2025	Strategia operativa
Quantum Act	Atteso 2026 — iter in corso ★	Framework vincolante ★

Quantum Europe Strategy — Le 5 aree strategiche (luglio 2025)



R&I

Quantum Flagship €1 Mld (2018–2028); Horizon Europe; QuantERA network



Dual-Use

Inserimento lista UE settembre 2025; controllo export attivo

QUANTUM EUROPE



Infrastrutture

EuroQCI (QKD 2025–27); IRIS² satellite; EuroHPC nodi quantum



Quantum Ecosystem

EIC Accelerator; start-up e scale-up europee; partenariati industriali



Skills

QuantERA fellowship; formazione STEM avanzata; retention ricercatori EU

Iniziative chiave della risposta europea

Quantum Flagship

Attivo dal 2018

1ª fase €1 Mld. 20+ progetti in hardware, software, comunicazione e metrologia quantistica.

EuroQCI

In deployment 2025–2027

Rete europea QKD per comunicazioni governative e infrastrutture critiche ultrasicure.

IRIS²

In sviluppo

Costellazione satellitare UE per connettività sicura governativa. Complementare a EuroQCI.

Dichiarazione Europea

21 Stati — Marzo 2024

Impegno politico per coordinamento R&I, autonomia strategica ed evitare frammentazione UE.

Quantum Act

⌚ Atteso 2026

Regolamento vincolante atteso: certificazione, governance e requisiti di sicurezza per sistemi QC.

Lista Dual-Use UE

In vigore — Sett. 2025

Tecnologie quantistiche incluse. Licenze export obbligatorie verso paesi terzi concorrenti.

La dimensione dual-use: tecnologia e sicurezza

Che cosa significa «dual-use»?

L'UE classifica formalmente le tecnologie quantistiche come dual-use con la modifica del Reg. 2021/821 (settembre 2025). Uso civile e militare simultaneamente possibili. La classificazione impone:

- Licenze di export obbligatorie verso paesi terzi
- Notifica per trasferimento tecnologico a soggetti non-UE
- Screening investimenti esteri (Reg. UE 2022/2560)
- Obblighi di sicurezza per infrastrutture critiche

Reg. UE 2021/821 — modificato settembre 2025



Crittografia

I computer quantistici minacciano RSA e ECC. QKD e algoritmi post-quantum (NIST 2024) sono la risposta strategica.



Industria

Ottimizzazione logistica, simulazione materiali, drug discovery. Vantaggio competitivo in settori strategici.



Difesa

Sensing quantistico, navigazione senza GPS, radar quantistici: applicazioni sotto governance NATO ed EDA.

QUANTUM COMPUTING E STRATEGIE INTERNAZIONALI E NAZIONALI

La Strategia Italiana

Italian Quantum Strategy (IQS) — 2025



CONTESTO E POSIZIONAMENTO INTERNAZIONALE

La competizione globale sulle tecnologie quantistiche si è intensificata radicalmente. Chi guiderà lo sviluppo di queste tecnologie dominerà i settori della comunicazione sicura, AI, simulazione e HPC nei prossimi decenni.

Paese	Investimento Pubblico (M€)	Durata
GB Regno Unito	4.122	10 anni
DE Germania	3.030	5 anni
FR Francia	1.800	5 anni
NL Paesi Bassi	1.100	7 anni
DK Danimarca	179	4 anni
AT Austria	140	5 anni
ES Spagna	98-808	5 anni
IT Italia	229 (2021-24)	in corso

41.5 B\$

USA 2012-2035

17.7 B\$

Globale 2025-2035

+37%

Crescita YoY 2024

20

Paesi con Strategia Nazionale

IT Italia: 7° al mondo per pubblicazioni QC (>4.200)

ECOSISTEMA DELLA RICERCA ITALIANA

FINANZIAMENTI MUR 2021-2024: €228,9M

NRRP / PNRR

€198M (86%)

NQSTI (Extended Partnership)

~€117M (51%)

ICSC — Centro HPC Quantistico

~€34M (15%)

PRIN (Ricerca Competitiva)

~€16M (7%)

CNR + INFN

~€9M (4%)

NUMERI CHIAVE DELLA RICERCA

193

Progetti QT attivi (MUR)

130+

Ricercatori/gruppi risposto al survey

68

Progetti Horizon Europe (€62M)

3

Progetti Digital Europe (€8,1M)

67%

Principal Investigators da Università

Distribuzione progetti per pilastro: Enabling Tech 21% | Computing 20% | Sensing 19% | Simulation 19% | Communication 12% | Basic Science 9%

ECOSISTEMA INDUSTRIALE ITALIANO

Pilastri QT adottati dalle imprese (multi-risposta):

Quantum Computing

73%

Quantum Communication

56%

Quantum Sensing & Metrology

37%

Distribuzione geografica stakeholder:

27% Milano

7% Torino

18% Roma

5% Firenze

7% Napoli

4% Pisa

7% Bari

25% Altre

TIPOLOGIA STAKEHOLDER (52 consultati)

33% Major player ICT/Difesa/Aerospace italiani

25% Startup e imprese native QT italiane

17% Player internazionali ICT e componenti

6% Grandi imprese utenti potenziali

8% Imprese straniere e startup QT estere

11% VC, fondazioni, facilitatori

LINEE DI AZIONE SCIENTIFICA

Osc-1	Basic Science	Mantenere e rafforzare il ruolo dell'Italia nella ricerca di base
Osc-2	Computation	Raggiungere il quantum advantage dimostrato sulla computazione classica
Osc-3A/B	Simulation	Hardware dedicato + algoritmi efficienti per problemi di ottimizzazione
Osc-4A-D	Communication	Reti sicure integrate, estensione a lunga distanza, quantum internet, sicurezza QKD
Osc-5A-C	Sensing	Certificazione, infrastrutture di prototipazione, sensori strategici per l'industria
Osc-6A/B	Enabling Tech	Controllo piattaforme, riduzione dipendenza non-EU, sviluppo componenti
Osc-7/8	Standard./Bench.	Coordinamento europeo standardizzazione + infrastrutture per benchmarking

GOVERNANCE E SVILUPPI NORMATIVI

BREVE TERMINE	MEDIO TERMINE	LUNGO TERMINE
Comitato Permanente QT	National Quantum Hub	Fondazione Quantistica Nazionale
<ul style="list-style-type: none">• Composizione: MUR, MIMIT, Difesa, MAECI, ACN, DTD + esperti scientifici e industriali• Sede: MUR (ruolo centrale nell'ecosistema di ricerca)• Missione: coordinamento, monitoraggio, aggiornamento strategia (ogni 3 anni)• Bilancio top-down / bottom-up per decisioni inclusive	<ul style="list-style-type: none">• Comitato politico: indirizzi strategici nazionali• Steering Committee: supervisione e coerenza con obiettivi EU• Struttura operativa: gestione bandi, erogazione fondi, tech transfer• Modello ispirato al Polo Nazionale Strategico	<ul style="list-style-type: none">• Convergenza investimenti pubblici e privati• Autonomia operativa e proiezione internazionale• Basata su fondazioni tecnologiche esistenti o ex novo• Supporto a monitoraggio, KPI e impact assessment

SISTEMA KPI E MONITORAGGIO — Cicli di valutazione indipendenti ogni 24 mesi (ANVUR, CNR, gruppi misti)

- *Pubblicazioni scientifiche (TRL >4)*
- *Brevetti QT e licenze attivate*
- *Startup deep-tech create*
- *Dottorati QT finanziati*
- *Investimento privato mobilizzato*

QUANTUM COMPUTING E STRATEGIE INTERNAZIONALI E NAZIONALI

GRAZIE

L. Paglieri

[paglieri@economia.uniroma2.it](mailto:pagliari@economia.uniroma2.it)

l.pagliari@lumsa.it