The background is a solid black field populated with various gold-colored geometric shapes. These shapes include squares, rectangles, and a single diagonal line. They are scattered across the page, with some appearing as thin lines and others as solid blocks. The overall effect is a modern, minimalist, and abstract design.

QUANTUM TECHNOLOGIES

X-PLORE

**QUANTUM
TECHNOLOGIES**
X-PLORE

QUANTUM TECHNOLOGIES

X-PLORE

 INTESA SANPAOLO
INNOVATION CENTER

 FONDAZIONE
links
PASSION FOR INNOVATION



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International. To view a copy of this license, visit: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Intesa Sanpaolo Innovation Center non si assume alcuna responsabilità sui contenuti esterni linkati, sia in termini di disponibilità che di immutabilità nel tempo.

Editore:

Intesa Sanpaolo Innovation Center

Responsabile di Redazione:

Daniele Borghi

Key Contributor

Davide Corbelletto - Intesa Sanpaolo

Coordinatore di Produzione:

Matteo Vannucchi - Fondazione LINKS

Progettazione Grafica:

Logotel S.p.A.

Stampato da:

PRINTINGUP Srl

Ringraziamenti

Per i preziosi contributi forniti, i nostri sentiti ringraziamenti a:


Antonio Garbaccio - Intesa Sanpaolo Innovation Center

Elena Cigliano, Matteo Falbo e Olivier Terzo - Fondazione LINKS



Shiro Echo è la carta di alta qualità, derivante al 100% da fibre riciclate, scelta da Intesa Sanpaolo Innovation Center per stampare questi volumi in coerenza con la filosofia adottata dal Gruppo. Copertina e interno del volume sono realizzati con la carta Shiro Echo, per questa ragione sono presenti piccole imperfezioni sulla sua superficie, la bellezza della carta riciclata. La carta è biodegradabile, è certificata FSC™ ed è a zero emissioni grazie alla neutralizzazione della CO₂ residua.





Le tecnologie quantistiche hanno la potenzialità di cambiare le regole del gioco, portando a ridefinire modelli di business, catene del valore e posizionamenti competitivi.

Queste tecnologie non rappresentano soltanto un progresso scientifico, ma un asset strategico di primaria importanza per la competitività dei sistemi economici e per la sovranità tecnologica delle nazioni. La corsa al quantum computing, ai sensori e alle comunicazioni quantistiche definisce già oggi nuovi equilibri geopolitici e industriali, chiamando imprese, istituzioni e comunità scientifiche a un impegno congiunto.

Accanto alle opportunità, emergono responsabilità che non possiamo ignorare. L'adozione di queste tecnologie dovrà svilupparsi entro un quadro di sostenibilità, equità e rispetto dei valori etici. La potenza del quantum, se indirizzata correttamente, potrà contribuire alla transizione ecologica, alla gestione efficiente delle risorse e alla costruzione di una società più resiliente e inclusiva.

Il nostro compito è accompagnare questa rivoluzione con visione strategica e responsabilità, assicurando al contempo agilità e rapidità di esecuzione.

Il report che vi presentiamo analizza l'ecosistema e il mercato, i principali attori e le startup emergenti, il livello di maturità delle tecnologie, i casi d'uso e le applicazioni industriali, offrendo una sintesi chiara delle potenzialità e delle sfide che segneranno il futuro delle tecnologie quantistiche.

Viviana Bacigalupo

Direttrice Generale Intesa Sanpaolo Innovation Center

Stefano Buscaglia

Direttore Generale Fondazione LINKS

00

Foreword

10

03

Technologies

3.1	Quantum Sensing	56
3.2	Quantum Communication	69
3.3	Quantum Computing	82

01

Overview

1.1	Le due rivoluzioni quantistiche	17
1.2	Quantum Computing	19
1.3	Quantum Communication	22
1.4	Quantum Sensing	24
1.5	The Year of Quantum	25

04

Industry Applications

4.1	Healthcare, chimica e scienza dei Materiali	106
4.2	Energia e Trasporti	111
4.3	Financial Services	118
4.4	Considerazioni Finali	121

02

2025 Market and Ecosystem

2.1	Mercato	29
2.2	Ecosistemi	34
2.3	Considerazioni finali	51

00/

Foreword



La conoscenza scientifica degli effetti quantistici non è una novità. I fisici Max Planck, Albert Einstein e altri hanno sviluppato le loro teorie 125 anni fa e quest'anno si celebra l'Anno Quantistico delle Nazioni Unite, in occasione del 100° anniversario della meccanica quantistica. Ma solo negli ultimi anni sono state sviluppate le conoscenze e la tecnologia necessarie per controllare gli effetti quantistici in modo da poterli utilizzare in applicazioni pratiche, come il rilevamento, la comunicazione o il calcolo.

Al momento i primi sensori basati sulla quantistica sono usati in diverse applicazioni industriali e in ambito sanitario. I vantaggi della comunicazione quantistica sono utilizzati anche nelle prime applicazioni legate alla sicurezza. Benché il quantum computing, da cui ci aspettiamo il maggior potenziale commerciale, abbia appena iniziato a uscire dai laboratori di ricerca, dalle università e dai centri di calcolo, aziende come IQM stanno già producendo computer in serie e stanno spedendo i loro prodotti ai pionieri nel campo delle applicazioni quantistiche. Il quantum computing come servizio è disponibile anche attraverso applicazioni cloud. Si tratta di soluzioni a cui si ricorre per sviluppare nuovi algoritmi e per la formazione e l'aggiornamento di giovani scienziati.

Gli attori più importanti sono in corsa per le prime applicazioni che creano maggior valore commerciale rispetto ai classici sistemi digitali. Ci sarà un mercato con più di un attore, ma affinché sia redditizio è importante entrare presto nel mercato e offrire tempestivamente soluzioni commerciali adeguate.

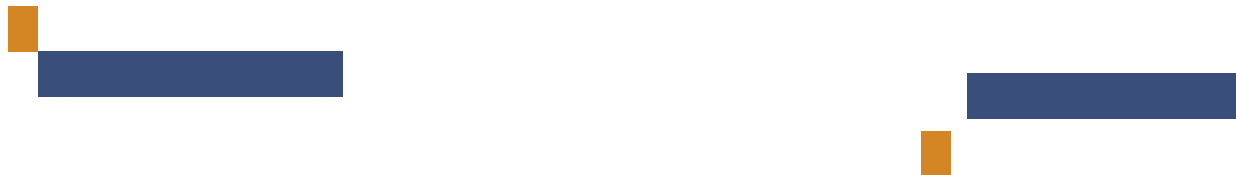
A definire l'importanza del quantum computing non è soltanto la sua capacità di risolvere algoritmi complessi in tempi molto rapidi attraverso il calcolo parallelo, ma anche quella di risolvere problemi di calcolo che non possono essere risolti da nessun computer tradizionale in un arco di tempo realistico. Alcuni di questi algoritmi richiederebbero milioni di anni anche ai nostri più grandi supercomputer o richiederebbero più transistor di quanti atomi ci siano nell'universo.

Anche l'applicazione dell'intelligenza artificiale trarrà beneficio dal quantum computing, dal momento che l'energia e il tempo necessari per le applicazioni di IA saranno drasticamente ridotti.

Attualmente si assiste a una competizione globale nello sviluppo di sistemi quantistici tra Cina, Stati Uniti, Giappone ed Europa, che può essere caratterizzata da elevati investimenti. Mentre sulle attività e gli investimenti in Cina non ci sono molte informazioni disponibili, in Giappone e in Europa vediamo una forte volontà di investire e di sviluppare una certa indipendenza dalle aziende statunitensi. L'evoluzione del quantum computing in Europa è stata plasmata da un mix coordinato di programmi di ricerca, investimenti pubblici e privati e iniziative regolamentari. Dal lancio del programma Quantum Flagship dell'UE nel 2018, l'Europa ha costruito un vivace ecosistema intorno alle tecnologie quantistiche, consentendo alle aziende di passare dalla fase iniziale della ricerca all'espansione commerciale. Il Quantum Flagship è stato integrato da importanti iniziative a livello europeo, come il programma EuroHPC, che finanzia sei siti di hosting per computer quantistici, e l'EU Chips Act, che mira a rafforzare le capacità dell'Europa nelle tecnologie dei chip quantistici attraverso una combinazione di investimenti pubblici e privati. Più di recente, la Commissione europea ha annunciato la strategia Quantum Europe, che nel 2026 dovrebbe culminare nel Quantum Act, fornendo un quadro legislativo completo per il settore.

Oltre a questi programmi a livello europeo, i governi nazionali hanno svolto un ruolo cruciale finanziando progetti su larga scala. La Finlandia, per esempio, ha stanziato 20,7 milioni di euro e 70 milioni di euro per i progetti informatici 5-20-50 e 300-qubit del VTT, mentre il Ministero federale tedesco dell'Istruzione e della Ricerca (BMBF) ha investito 40 milioni di euro per integrare un computer quantistico nel supercomputer SuperMUC-NG del Leibniz Supercomputing Centre di Monaco. Questi sforzi riflettono una strategia deliberata per affermare lo sviluppo del quantum computing in Europa e posizionare la regione come attore competitivo a livello globale.

Il coinvolgimento immediato di investitori statali come Tesi, Finnish Industry Investment Ltd e l'European Innovation Council (EIC) è significativo per il settore, in quanto segnala sia la credibilità tecnologica che l'impegno politico a lungo termine. Il capitale pubblico aiuta a colmare la cosiddetta "valle della morte" tra la ricerca fondamentale e la fattibilità commerciale, dando alle startup il tempo e le risorse per generare ricavi prima che intervengano gli investitori di rischio in una fase successiva. Rispetto ad altre regioni, la forza dell'Europa risiede nei suoi solidi quadri politici e nell'allineamento tra settore pubblico e privato, sebbene debba ancora affrontare delle sfide per crescere alla stessa velocità dei suoi concorrenti.



L'ecosistema più ampio beneficia delle solide basi accademiche europee, di un vivace scenario di startup e di collaborazioni pubblico-private che forniscono infrastrutture condivise e clienti iniziali. Le prossime politiche, come il Quantum Act, saranno decisive per la definizione dei finanziamenti e della sicurezza economica, soprattutto in considerazione della natura dual use delle tecnologie quantistiche. Il successo dell'ecosistema europeo dipenderà quindi dall'efficacia con cui le aziende e i governi collaboreranno per bilanciare l'innovazione con le preoccupazioni per la sicurezza nazionale.

Man mano che l'industria quantistica europea matura, è probabile che essa avrà un profondo impatto sull'innovazione e sulla competitività a livello regionale e globale. Il modello dell'Europa, che pone l'accento su solide basi di ricerca, investimenti pubblici tempestivi e collaborazione strutturata, le ha permesso di assumere un ruolo di primo piano nel dare forma al panorama quantistico globale. Se riuscirà a canalizzare sufficienti investimenti privati e ad accelerare la commercializzazione, l'Europa potrà rimanere un attore centrale nella corsa globale alle tecnologie quantistiche.

Reinhold Achatz

*IQM Quantum Council Member
Chairman of the Board and President at the International Data Spaces Association (IDSA), formerly CTO and Head of Corporate Function Technology, Innovation, and Sustainability at ThyssenKrupp*

Jan Götz

Co-CEO & Co-founder IQM Finland Oy

Heinrich von Pierer

*IQM Quantum Council Member
Member of supervisory boards at various companies, formerly CEO and Chairman of Siemens AG*

Francesco Profumo

*IQM Quantum Council Member
President of Isybank, formerly President of Compagnia di Sanpaolo, Minister of Education, and President of the National Research Council (CNR)*

Viviane Reding

*IQM Quantum Council Member
Member of the European Parliament, formerly Vice President of the European Commission*

Axel Thierauf

*Quantum physicist and seasoned venture capital investor
Early investor and Chairman of the Quantum Council at IQM Finland Oy*

01 /

Overview



Le tecnologie che comunemente si definiscono quantistiche traggono il loro nome dalla disciplina nota come **teoria dei quanti o meccanica quantistica**, giacché si basano sul funzionamento della materia a livello subatomico e particellare descritto da tale modello fisico, concepito a partire dai primi anni del XX secolo.

A differenza della fisica classica, che si occupa – dalle leggi dell'elettromagnetismo, fino alla teoria della relatività generale – di descrivere il comportamento del mondo macroscopico, la teoria dei quanti si concentra invece sull'interpretare il funzionamento del mondo microscopico, il quale presenta comportamenti talora controintuitivi rispetto all'esperienza fisica del mondo alla quale comunemente si è avvezzi.



1.1 Le due rivoluzioni quantistiche

Nel corso dell'ultimo secolo, l'umanità è stata testimone di due rivoluzioni legate al mondo delle applicazioni della fisica quantistica con risvolti significativi a livello tecnologico.

Se la prima di queste rivoluzioni ha cambiato l'interpretazione del comportamento della natura, la seconda sta cambiando le modalità di interazione con essa.

La prima rivoluzione quantistica: una nuova interpretazione del mondo microscopico

La prima rivoluzione quantistica comincia all'inizio del 1900, quando il fisico Max Planck propone l'idea che l'energia non sia continua, bensì discreta e suddivisa in unità indivisibili dette appunto "quanti".

Alcuni anni dopo, precisamente nel 1905, traendo ispirazione proprio da questa idea, Albert Einstein riuscì a giustificare scientificamente il verificarsi del cosiddetto effetto fotoelettrico (ovvero la commutazione di luce in energia), ipotizzando che la luce, oltre all'essere rappresentabile come onda, assuma anche le caratteristiche di una particella (il fotone), scoperta che gli valse il premio Nobel per la fisica nel 1921.

Da lì in poi, scienziati come Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli, Paul Dirac e altri gettarono le basi della meccanica quantistica, una teoria capace di spiegare alcuni **comportamenti apparentemente controintuitivi** della materia a livello subatomico, tra i quali:

- **Dualismo onda-particella:** particelle elementari, come elettroni e fotoni, presentano una natura sia ondulatoria sia corpuscolare
- **Sovrapposizione:** una particella elementare può trovarsi al tempo stesso in una combinazione di più stati, ciascuno con una certa probabilità
- **Indeterminazione:** non è possibile conoscere contemporaneamente e con precisione assoluta alcune coppie di proprietà di una particella elementare come, ad esempio, posizione e velocità della stessa
- **Entanglement:** particelle elementari possono "intrecciarsi" tra loro, in modo che sussista una correlazione tra i loro stati che si preserva indipendentemente dalla reciproca distanza alla quale esse si trovano

Dall'insieme di questi nuovi assunti teorici, nacque una prima serie di innovazioni tecnologiche che si rivelarono decisive per il mondo moderno: dai transistor in silicio alla base dei microprocessori, al laser per l'accurata misurazione di distanze anche a livello astronomico, fino alla risonanza magnetica impiegata in ambito diagnostico e alle fibre ottiche sulle cui fondamenta si poggia oggi il World Wide Web.

In sintesi, la prima rivoluzione quantistica ha permesso all'umanità di fare luce sulla struttura profonda della natura e di realizzare applicazioni in grado di sfruttare in modo congenito i principi quantistici, pur senza controllarli direttamente.

La seconda Rivoluzione Quantistica: come manipolare i quanti

Sul finire del XX secolo è iniziata una seconda rivoluzione quantistica che ha rappresentato un significativo salto di qualità in termini non solo di comprensione, bensì anche di controllo del comportamento intrinseco del mondo subatomico.

Infatti, oggi non ci si limita più a trarre vantaggio da fenomeni quantistici in modo pressoché spontaneo, ma si è progressivamente sempre più in grado di manipolarli direttamente e con precisione.

Grazie ai recenti progressi ingegneristici, è possibile isolare e **controllare singole particelle**, come elettroni e fotoni, preservandone le proprietà quantistiche abbastanza a lungo da poterle impiegare in modo consapevole e programmato.

Questa seconda rivoluzione quantistica ha di fatto aperto la strada a tre grandi famiglie tecnologiche conosciute appunto come **tecnologie quantistiche**:

- **Quantum Computing**, che comprende sia la realizzazione di un nuovo tipo di elaboratori (Quantum Computer) basati sulle leggi della meccanica quantistica sia la scrittura di nuovi algoritmi atti ad essere implementati ed eseguiti su questo nuovo tipo di macchine, permettendo di ottenere un vantaggio sia nei tempi di calcolo sia nell'accuratezza degli output attesi rispetto ai computer tradizionali
- **Quantum Communication**, che usa l'entanglement per realizzare nuovi protocolli di comunicazione ultrasicuri, garantendo al contempo che eventuali tentativi di intercettazione non autorizzati vengano immediatamente rilevati
- **Quantum Sensing**, che dà origine a sensori capaci di misurare con un'elevatissima precisione grandezze fisiche come campi magnetici, variazioni gravitazionali o temporali infinitesime, con impatti in medicina, geologia, navigazione e fisica fondamentale

In sintesi, se la prima rivoluzione quantistica ha fatto apprezzare all'umanità alcune delle potenzialità spontanee derivanti dalle peculiari proprietà fisiche che caratterizzano il mondo microscopico, la seconda sta offrendo gli strumenti per costruire nuove tecnologie, muovendo proprio da una miglior comprensione e controllo dei fenomeni naturali governati da questi principi.

Sinteticamente analizzate nel seguito, le tre tecnologie quantistiche saranno poi approfondite nel successivo Capitolo 3. Per ciascuna tecnologia sono altresì riportati i principali settori industriali nei quali essa trova attualmente applicazione o che si prospettano più ricettivi. Una approfondita disamina delle applicazioni industriali è il focus del Capitolo 4.

1.2 Quantum Computing

Il quantum computing è un modello di calcolo che sfrutta le leggi della meccanica quantistica per risolvere problemi che sono troppo complessi, in termini di tempo di risoluzione, spazio computazionale disponibile o risorse energetiche, per essere efficacemente trattati con architetture di calcolo tradizionali. A differenza dell'informatica classica, che rappresenta l'unità minima di informazione con i bit (che possono assumere alternativamente il valore 0 oppure 1), il quantum computing impiega invece i **qubit** (*quantum bits*), che possiedono proprietà significativamente diverse.

L'utilizzo congiunto delle tre proprietà dei qubit permette ai computer quantistici di elaborare simultaneamente molti scenari risolutivi e quindi di ottenere risultati migliori rispetto ai computer classici, sia in termini di velocità che di accuratezza degli output, riducendo al tempo stesso le risorse computazionali e quindi l'energia complessiva richiesta per il calcolo.

Le tipologie di qubit

L'ingegnerizzazione dei qubit può avvenire in molti modi diversi, ciascuno con vantaggi e sfide tecniche:

- **Qubit superconduttivi**: sono realizzati con materiali superconduttori raffreddati fino a temperature prossime allo zero assoluto. Rappresentano al momento una delle piattaforme più facilmente scalabili, tanto da costituire la soluzione tecnologica alla base dei computer quantistici di società come IBM, Google, Amazon, D-Wave, Rigetti e IQM
- **Qubit a ioni intrappolati**: sono realizzati con atomi ionizzati sospesi in trappole elettromagnetiche e manipolabili attraverso impulsi laser. Aziende come Quantinuum (consorzio nel quale è presente anche la multinazionale Honeywell) e IonQ stanno investendo molto in questa tecnologia, apprezzata per la sua affidabilità e coerenza

PROPRIETÀ DEI QUBIT

Il funzionamento dei qubit si basa sull'applicazione di tre principi fisici fondamentali:

SOVRAPPOSIZIONE (SUPERPOSITION)

Un qubit, oltre che in uno stato fisico basilare ben definito (0 o 1), può trovarsi anche in una delle infinite configurazioni derivanti dalla combinazione degli stati base, ciascuno con una certa probabilità (ad esempio, 0 e 1 simultaneamente al 50%). Ciò consente di aumentare lo spazio computazionale complessivo a disposizione a parità di unità di processamento dati elementari a disposizione (ossia qubit anziché bit)

ENTANGLEMENT

Due o più qubit possono tra loro risultare "intrecciati" in modo tale che il cambiamento dello stato di uno dei due influenzi immediatamente quello dell'altro, indipendentemente dalla distanza che intercorre tra loro. Questo particolare tipo di legame consente di codificare e trasmettere informazione in modo molto più efficiente ed è comunemente noto anche come "azione a distanza"

INTERFERENZA

Un qubit, in quanto sistema quantistico elementare, possiede insieme alle sue caratteristiche corpuscolari anche quelle di onda, e pertanto ad esso si applica il principio fisico dell'interferenza, che viene sfruttato per amplificare le probabilità di trovare la risposta corretta a un problema in esso codificato, limitando distruttivamente quelle errate

- **Qubit fotonici:** come suggerisce il nome, i qubit corrispondono ad altrettanti fotoni, i quali vengono utilizzati per codificare e processare le informazioni. Oltre ad essere maggiormente stabili e resistenti al rumore circostante, i fotoni sono altresì ideali per comunicazioni a lungo raggio. Non a caso, promettenti startup come PsiQuantum, finanziata tra gli altri anche dal governo statunitense, e Xanadu seguono questo tipo di approccio
- **Qubit a atomi neutri:** sono realizzati con atomi non ionizzati, raffreddati e controllati tramite opportuna strumentazione ottica. Rappresentano un buon bilanciamento tra scalabilità e coerenza. Tra le aziende che stanno perseguendo questo approccio, si annoverano QuEra in USA e Pasqal in Europa
- **Qubit a spin in silicio:** in questo caso, i qubit corrispondono agli spin degli elettroni confinati in strutture di semiconduttori, in modo simile a quanto avviene ai cosiddetti “quantum dots” che fungono da pixels nell’TV QLED. Il vantaggio principale di questo approccio è una sostanziale compatibilità con i chip ordinari anch’essi basati sul silicio. Non sorprende che, tra le aziende che stanno maggiormente investendo in questa direzione, ci sia Intel
- **Qubit topologici:** l’idea alla base di questa soluzione tecnologica è quella di utilizzare delle quasiparticelle esotiche (anioni non abeliani) per rappresentare i qubit. Microsoft è il principale sostenitore di questo approccio, il quale, pur promettendo una tolleranza agli errori intrinseca, è ancora in una fase di ricerca teorica e non sperimentale
- **Nitrogen-Vacancy Center:** i qubit corrispondono ai difetti puntuali nel reticolo cristallino di un diamante, dove un atomo di azoto sostituisce un atomo di

carbonio vicino a una lacuna. Sebbene questa tecnologia abbia il vantaggio di fornire una elevata stabilità anche a temperatura ambiente, la scalabilità dipende dal numero di impurità del diamante. Aziende come Quantum Brilliance e SaxonQ stanno esplorando questo approccio soprattutto in ottica di vendere piccoli elaboratori quantistici da installare all’interno di Data Center

Ciascuna delle modalità per realizzare i qubit sopra descritte viene valutata sulla base di quattro proprietà cruciali:

- **Scalabilità:** possibilità di aumentare il numero di qubit, senza aumentare significativamente la dimensione del chip quantistico che li contiene e mantenendo al contempo inalterata l’affidabilità complessiva del sistema
- **Velocità:** abilità di aumentare la frequenza di calcolo del sistema al fine di garantire un maggior numero di operazioni eseguite per unità di tempo
- **Fedeltà:** probabilità che il sistema si mantenga accurato nell’esecuzione delle operazioni fisiche/logiche effettuate sui qubit senza incorrere in guasti/errori
- **Coerenza:** capacità di allungare il tempo durante il quale i qubit conservano le proprietà quantistiche che li caratterizzano e che sono per loro natura effimere in quanto soggette a perturbazioni esterne di vario tipo (ad esempio magnetiche o termiche)

La principale sfida è riuscire ad incrementare tutte le precedenti dimensioni senza che la crescita dell’una infici negativamente le altre, per arrivare ad ottenere architetture elaborative affidabili e utili su larga scala.

Applicazioni industriali

Sebbene la tecnologia sia ancora nelle sue fasi iniziali, le potenzialità di questa tecnologia sono già evidenti in numerosi settori:

1. **Farmaceutica e scienza dei materiali:** simulazione accurata di composti chimici e materiali complessi. Ciò può accelerare la scoperta di nuovi medicinali, catalizzatori e strutture molecolari complesse, compito in cui anche i più potenti computer classici si rivelano inefficienti
2. **Finanza:** ottimizzazione di portafogli di investimento, gestione del rischio, analisi predittive e simulazioni stocastiche. Il quantum computing può ridurre drasticamente i tempi per analisi ad alta complessità, aumentando al contempo la precisione dei risultati
3. **Logistica e trasporti:** risoluzione di problemi quali la miglior pianificazione di rotte, allocazione di risorse o pianificazione strategica, potenzialmente in tempo reale
4. **Energia:** modellazione di sistemi complessi come quelli atti a prevenire i guasti nelle reti elettriche, migliorando l’efficienza e garantendo la stabilità operativa
5. **Intelligenza Artificiale:** alcune applicazioni di machine learning potrebbero beneficiare di approcci quantistici tanto per accelerare il training dei modelli supervisionati quanto per migliorare la qualità delle previsioni di quelli non supervisionati o le scelte compiute da un agente addestrato per rinforzo

Oltre a promettere una riduzione significativa dei tempi di elaborazione nella risoluzione di alcuni problemi e una maggior qualità delle soluzioni restituite in output, in

alcuni casi il quantum computing consente addirittura di affrontare **problemi intrattabili per computer classici**, fatto che, purtroppo, può rivelarsi anche negativo.

Una potenziale minaccia alla crittografia

Tra questi problemi inaccessibili figura anche la fattorizzazione in numeri primi di interi con un numero arbitrario di cifre.

Sull’impossibilità per un elaboratore tradizionale di effettuare questa scomposizione in un tempo ragionevole, si basa il noto protocollo crittografico a chiave pubblica RSA che dal 1977, anno in cui fu concepito, aiuta a proteggere, tra le altre cose, le comunicazioni sul web e le transazioni finanziarie. Tuttavia, già nel 1994, l’informatico Peter Shor concepì un algoritmo quantistico che permette di scomporre numeri interi anche molto grandi in fattori primi in un tempo esponenzialmente minore rispetto alla miglior tecnica classica. Pertanto, un computer quantistico sufficientemente potente potrebbe **rompere le attuali protezioni crittografiche**, minacciando buona parte della sicurezza digitale globale e rendendo necessaria la sostituzione con sistemi crittografici di recente sviluppo e resistenti a questo tipo di attacchi, conosciuti con il nome di Post-Quantum Cryptography (PQC).



A Survey on Post-Quantum Cryptography: State-of-the-Art and Challenges

1.3 Quantum Communication

La quantum communication è una tecnologia che ricomprende un insieme di sistemi di telecomunicazione quantistica facenti leva principalmente sul principio di entanglement per realizzare canali di trasmissione dati sostanzialmente blindati e, per talune applicazioni, più efficienti rispetto ai sistemi di scambio informazioni classici.

La nuova frontiera delle comunicazioni inviolabili

Rispetto ai protocolli di comunicazioni tradizionali, questo tipo di sistemi garantisce una sicurezza intrinseca (garantita cioè dal *medium* utilizzato per la trasmissione invece che da un algoritmo software), la possibilità di individuare eventuali tentativi di intercettazione, nonché una miglior capacità trasmissiva a parità di tempo e banda disponibili.

A differenza dei sistemi classici impiegati per la trasmissione dei dati (dove questi ultimi viaggiano dal mittente al destinatario codificati sotto forma di impulsi elettrici binari), **nei sistemi di comunicazione quantistici si utilizzano i fotoni**, i quali consentono lo scambio di informazioni anche in sovrapposizione di stati (quindi aumentando il numero di dati inviati per unità di tempo, a parità di capacità trasmissiva del canale utilizzato) e tra loro non localmente correlate (ossia, inviabili anche in modo non sequenziale su canali diversi, pur mantenendo lo stesso corredo informativo). In un mondo sempre più interconnesso e soggetto a minacce informatiche crescenti

(includere quelle potenzialmente attuabili da futuri computer quantistici trattate in precedenza), i metodi di crittografia classici, basati su problemi matematici difficili da risolvere, potrebbero diventare vulnerabili.

Oltre alla Post-Quantum Cryptography, che rappresenta una soluzione di tipo logico al problema, una possibile strategia di trasmissione dati sicura e garantita fisicamente è rappresentata dalla **Quantum Key Distribution (QKD)**.

La Quantum Key Distribution è una tecnica che permette a due interlocutori (tradizionalmente chiamati *Alice*, mittente, e *Bob*, destinatario) di scambiarsi una chiave segreta sfruttando le proprietà della meccanica quantistica. Il primo protocollo ideato allo scopo è il BB84 che prende il nome dai suoi creatori Bennett e Brassard che lo proposero nel 1984. Tale protocollo garantisce che qualsiasi tentativo di intercettare la chiave avrà come conseguenza l'alterazione inevitabile della chiave stessa, rendendo quindi inutilizzabile all'attaccante l'informazione intercettata e rivelando al contempo al destinatario della comunicazione l'indebito tentativo di sottrazione. Evoluzioni più recenti ed efficienti del protocollo BB84 sono il protocollo di Ekert e il cosiddetto "teletrasporto quantistico" (Quantum Teleportation) che impiegano forme più avanzate di entanglement tra i fotoni impiegati per la trasmissione delle chiavi.



Entanglement and teleportation in quantum key distribution for secure wireless systems

Il protocollo QKD non trasmette direttamente messaggi, bensì fornisce un insieme di chiavi di cifratura inviolabili da utilizzare per scambiare dati su canali classici. Questo sistema è già stato testato in vari contesti reali, anche attraverso ripetitori satellitari e canali in fibra ottica, aprendo la strada a una futura rete quantistica di comunicazione distribuita (Quantum Internet).

Un altro vantaggio dell'utilizzo delle comunicazioni quantistiche è il cosiddetto **Superdense Coding**, una tecnica che consente di **trasmettere contemporaneamente più bit di informazione per ogni fotone** impiegato nella trasmissione.

In una comunicazione classica, un singolo bit trasmette al massimo un'informazione binaria (0 o 1). Con il superdense coding, il mittente può invece inviare ben due bit classici utilizzando un solo fotone, se questo risulta entangled con un altro fotone già detenuto dal destinatario.

Tale meccanismo aumenta l'efficienza della comunicazione e mostra come l'entanglement possa essere sfruttato per massimizzare la capacità trasmissiva dei canali.

Qualora poi esso sia combinato con la giusta infrastruttura di rete, è possibile realizzare sistemi di comunicazione ibridi ad alta densità e bassissima latenza, utili in contesti particolarmente esigenti della trasmissività richiesta.

Applicazioni industriali

La comunicazione quantistica è una delle aree più promettenti in termini di applicazioni tangibili già nel breve termine.

Tra i settori che possono beneficiarne maggiormente si annoverano:

- **Difesa e sicurezza:** intelligence militare, governativa e istituzionale intrinsecamente protetta da attacchi anche sofisticati, inclusi quelli perpetrati in futuro da computer quantistici sufficientemente potenti
- **Servizi finanziari:** sicurezza delle transazioni bancarie e delle comunicazioni sensibili e riguardanti la clientela scambiate tra banche centrali, istituzioni finanziarie e istituti assicurativi
- **Telecomunicazioni e infrastrutture critiche:** creazione di reti quantistiche per garantire una maggior efficienza di comunicazione e una sostanziale sicurezza dei dati trasmessi su scala internazionale
- **Healthcare:** condivisione sicura di dati medici e informazioni riservate concernenti la ricerca clinica o farmaceutica
- **Cloud e datacenter:** miglioramento della capacità trasmissiva e dell'integrità delle informazioni scambiate in modalità client-server, in particolare in contesti multi-tenant e distribuiti

Pur essendo ancora una tecnologia in evoluzione, specialmente nell'ambito della comunicazione *free space*, esistono già implementazioni concrete in cui la quantum communication è stata impiegata produttivamente.

Tra i principali provider tecnologici vale la pena citare la canadese EvolutionQ, la statunitense QuSecure, la svizzera IDQuantique, nonché l'italiana QTI - Quantum Telecommunication Italy, recentemente acquisita da Telsy, centro di competenza per la sicurezza delle comunicazioni e la cybersecurity del Gruppo TIM.

1.4 Quantum Sensing

Tra le tecnologie quantistiche, il quantum sensing è quella preposta alla realizzazione di **sensori di misura ultrasensibili** al fine di rilevare variazioni minime di grandezze fisiche quali tempo, gravità, intensità dei campi magnetici, accelerazione e temperatura.

Da un punto di vista della metrologia, ciò comporta – da un lato – la possibilità di ottenere misure molto più accurate di grandezze fisiche già rivelabili impiegando sensori classici, ma – dall'altro e soprattutto – di misurare grandezze fisiche diversamente non rilevabili con la strumentazione oggi a disposizione.

Questo tipo di strumentazione permette quindi di affrontare problemi critici nei contesti in cui la sensibilità della misura è determinante, come nel caso della rilevazione di campi magnetici debolissimi nel cervello umano o delle oscillazioni gravitazionali a bassa intensità di tipo geofisico.

Anche il computo del tempo trascorso può trarre vantaggio da orologi atomici quantistici, la cui maggior accuratezza abilita la costruzione di nuove generazioni di sistemi GPS.

In sintesi, il quantum sensing rappresenta una nuova generazione di tecnologie metrologiche capaci di spingersi oltre i limiti dei sensori convenzionali, permettendo di rivoluzionare le metodologie di osservazione, navigazione e monitoraggio a distanza.

Applicazioni industriali

Il quantum sensing è già oggi una tecnologia quasi produttiva in numerosi settori:

- **Healthcare:** dispositivi per la generazione di scansioni neurologiche, utili, ad esempio, come strumento di indagine diagnostica preventiva e non invasiva di patologie riguardanti il sistema nervoso
- **Geologia e sondaggi ambientali:** gravimetri quantistici per rilevare vuoti sotterranei, falde acquifere o attività vulcanica
- **Difesa e sicurezza:** sistemi per l'individuazione di oggetti non identificati a lungo raggio e navigazione automatizzata, basati su radar/sonar quantistici non tracciabili
- **Industria manifatturiera di precisione:** fabbricazione di sensori per nanomacchine al fine di renderne l'azione monitorata e programmabile
- **Aerospazio e mobilità autonoma:** strumenti per l'orientamento e la localizzazione in ambienti privi di segnale come nello spazio cosmico

Tra i principali provider tecnologici si citano la australiana Q-CTRL, la statunitense SandboxAQ, nonché l'italiana Quantum Ket, la quale è specializzata nella produzione di sensori quantistici geofisici e biomagnetici.

1.5 The Year of Quantum

Anche a livello istituzionale e sovranazionale sta crescendo la consapevolezza riguardo all'importanza strategica delle tecnologie quantum.

Il 2025 è stato proclamato l'anno del centenario della meccanica quantistica su spinta delle Nazioni Unite che hanno raccolto l'invito di scienziati da tutto il mondo per dare risalto a questo evento.

Le Nazioni Unite mettono in risalto quanto l'insieme di tutte le tecnologie e le teorie nate dalla fisica quantistica contribuiscono allo sviluppo sia economico che sociale dell'umanità.

L'iniziativa International Year of Quantum Science and Technology identifica sei macro ambiti sui quali concentrare attenzione, sforzi e investimenti di ricercatori, enti e policymakers:

- **Health and Wellbeing:** sviluppare la diagnostica per immagini e supportare la creazione di nuovi medicinali e vaccini
- **Reduced Inequalities:** rendere le soluzioni quantum accessibili a tutti grazie ad un approccio open science
- **Industry and Infrastructure:** sviluppo di nuovi materiali
- **Economic Growth:** garantire la sicurezza dell'infrastruttura economica e finanziaria
- **Climate Action:** monitoraggio ambientale e sviluppo di nuovi modelli climatici
- **Clean Energy:** progettazione di nuove celle solari a basso costo e sistemi di illuminazione a basse emissioni



International Year
of Quantum Science
and Technology (IYQ)

02/

2025 Market
and Ecosystems



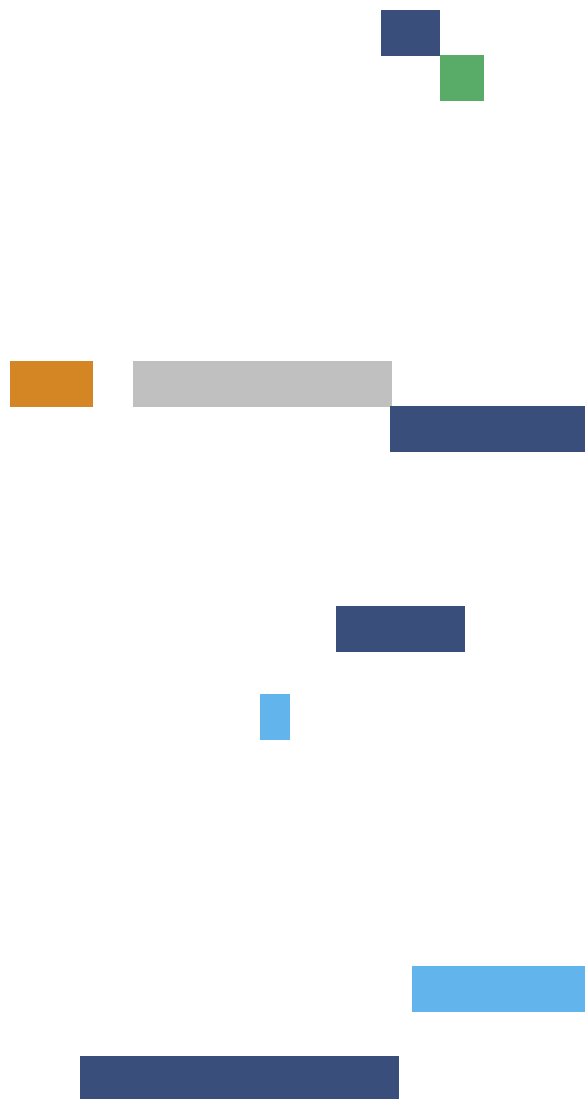
Il Capitolo 1 ha presentato i fondamenti delle tecnologie quantistiche e le principali famiglie applicative, mentre in questo secondo capitolo l'attenzione si concentra sull'evoluzione del mercato globale del quantum, analizzandone la struttura, gli attori chiave e le prospettive di crescita.

L'ecosistema delle tecnologie quantistiche rappresenta da molti punti di vista un terreno di scontro competitivo tra Paesi e gruppi di Paesi per il dominio sulla tecnologia e su tutta la sua value chain. L'impatto che il quantum avrà su molti settori industriali, scientifici ed economici sarà infatti trasformativo e *disruptive*.

Il mercato quantistico a livello internazionale vede un ruolo crescente degli investimenti pubblici e privati.

I dati di mercato con i relativi trend di crescita e le dinamiche competitive tra i principali ecosistemi (divisi in Nord America, Europa e Asia) suggeriscono che dovranno essere affrontate molteplici sfide di mercato e industriali nei prossimi 5/10 anni. In tutto il mondo governi ed enti pubblici stanno favorendo la nascita di filiere industriali nel settore del quantum, grazie alla creazione di iniziative e parchi tecnologici, a collaborazioni pubblico-private e strategie di sviluppo nel medio lungo periodo.

Il capitolo si chiude con una riflessione sulle prospettive future delle tecnologie quantistiche, con un focus sul tema della sovranità tecnologica e della competitività globale.



2.1 Mercato

Il mercato delle tecnologie quantistiche sta vivendo una fase di transizione dal laboratorio all'industria, con una crescita sostenuta degli investimenti pubblici e privati. Secondo il report *Quantum Technology Monitor – June 2025* di McKinsey, il settore è ancora nella fase iniziale del suo ciclo di vita. Tuttavia, le proiezioni indicano un potenziale economico significativo, con applicazioni che si estendono dalla salute alla finanza, dall'energia alla mobilità e a molti altri settori. Basato sulle concrete potenzialità tecnologiche, il mercato del quantum si articola in tre pilastri fondamentali: il calcolo quantistico, la comunicazione quantistica e il sensing quantistico.

Tecnologia	Valore 2025 in USD Bln	Valore previsto in USD Bln
Quantum computing	1,2 – 1,4	9,5 (2034)
Quantum communication	1,3 – 1,4	13,0 (2034)
Quantum sensing	0,3 – 0,4	1,2 (2032)

Fonti: Future Market Insights, Precedence Research, Fortune Business Insights

Il segmento del **quantum computing** è quello che attualmente catalizza la maggior parte dell'attenzione mediatica e degli investimenti, pur restando tecnologicamente immaturo in molte delle sue architetture. Tuttavia, è anche il comparto con il maggiore potenziale di creazione di valore, seppur la maggior parte delle applicazioni siano previste soltanto in forma prototipale.

Secondo gli analisti, quantum computing e quantum communication risultano attualmente i due segmenti a maggior valore di mercato, con stime quasi equivalenti tra 1,2 e 1,4 miliardi di dollari nel 2025. Tuttavia, il quantum computing è il comparto che catalizza la maggiore attenzione da parte di investitori e media, grazie al suo potenziale di trasformazione industriale.

La crescita media annua si attesta tra il 23% e il 31%. Le applicazioni si concentrano sulla simulazione di sistemi chimici e materiali, sull'ottimizzazione complessa in ambito industriale e finanziario, e sull'integrazione con l'intelligenza artificiale. Particolare rilevanza, inoltre, è data dal modello Quantum-as-a-Service - QaaS, che consente l'accesso a risorse quantistiche tramite piattaforme cloud (vedi Capitolo 4).

Il settore della **quantum communication**, centrato sulla crittografia quantistica e la trasmissione sicura dei dati, è anch'esso in rapida espansione. Il mercato è valutato tra 1,31 e 1,41 miliardi di dollari nel 2025 e potrebbe superare i 13 miliardi entro il 2034, con una crescita annua superiore al 28%. Questo ambito è strategico per applicazioni negli ambiti della difesa, finanza, pubblica amministrazione e telecomunicazioni.

Il **quantum sensing**, pur meno noto al grande pubblico, ha già applicazioni industriali concrete. Con un valore attuale di circa 377 milioni di dollari e una previsione di 1,2 miliardi entro il 2032, trova impiego in settori come la sanità, la difesa, la navigazione in ambienti senza copertura GPS e l'agricoltura di precisione.

Con oltre 15 miliardi di dollari, la Cina è leader negli investimenti pubblici in tecnologie quantistiche

Secondo McKinsey, fino ad Aprile 2025 sono stati investiti complessivamente oltre **54 miliardi di dollari in fondi pubblici** a sostegno delle tecnologie quantistiche. Spicca la leadership della Cina (15,3 miliardi di dollari), seguita dall'Unione europea con 8 miliardi di dollari, dal Giappone con 7,4 miliardi di dollari, dagli USA con 6 miliardi di dollari e Canada con 2,5 miliardi di dollari. Accanto a questi, anche Australia, Regno Unito e Corea del Sud stanno portando avanti programmi nazionali ambiziosi, mentre si segnalano anche iniziative statali significative negli USA, come i 500 milioni di dollari dell'Illinois e un piano da 1 miliardo di dollari nel Maryland per sostenere lo sviluppo delle infrastrutture quantistiche.

Anche gli investimenti privati stanno crescendo rapidamente: nel 2024 si sono registrati circa 2 miliardi di dollari in finanziamenti di venture capital destinati a startup e scale-up quantistiche, con una crescita del 50% rispetto all'anno precedente. Questo dato riflette un rinnovato slancio del settore dopo il rallentamento successivo al picco del 2022, con volumi di investimento che restano circa 6 volte superiori ai livelli del 2019. Sempre secondo il report di McKinsey, si stima che il mercato globale delle tecnologie quantistiche possa raggiungere un valore complessivo di 198 miliardi di dollari entro il 2040.

Lo sviluppo delle tecnologie quantistiche si sta concentrando in tre grandi aree geografiche: Nord America, Europa e Asia. Ciascuna di queste ha avviato sia investimenti pubblici che privati consistenti, sostenuto l'avvio di startup e delineato strategie nazionali per consolidare un vantaggio competitivo in un settore emergente e considerato ad elevato impatto economico.

Gli Stati Uniti hanno allocato 6 miliardi di dollari di fondi pubblici per la ricerca e lo sviluppo delle tecnologie quantistiche, la maggior parte dei quali è stata indirizzata attraverso programmi federali, enti di ricerca e agenzie governative.

Il mercato statunitense è caratterizzato da un'elevata incidenza di investimenti privati. Tra il 2015 e il 2023, oltre il 50% di tutti gli investimenti di venture capital globali in tecnologie quantistiche si è concentrato negli Stati Uniti. Gli USA detengono il maggior numero di startup attive nel settore, con più di 100 aziende operanti in ambito quantum technology.

In particolare, nel settore del quantum computing gli Stati Uniti rappresentano l'ecosistema con il più alto valore di mercato: circa 1,44 miliardi di dollari nel 2025.

Anche il Canada ha stanziato 2,5 miliardi di dollari in fondi pubblici cumulati per il settore quantistico. Il paese mantiene un ruolo di rilievo in ambito accademico e ha una presenza crescente di startup, soprattutto nel quantum sensing e nella quantum communication. Tra il 2015 e il 2023, il Canada ha ricevuto circa il 5% degli investimenti di venture capital a livello globale.

Spostando il focus sull'Unione Europea, gli investimenti hanno superato oltre 8 miliardi di dollari in fondi pubblici per le tecnologie quantistiche, posizionando l'UE al secondo posto globale. Questo valore include sia

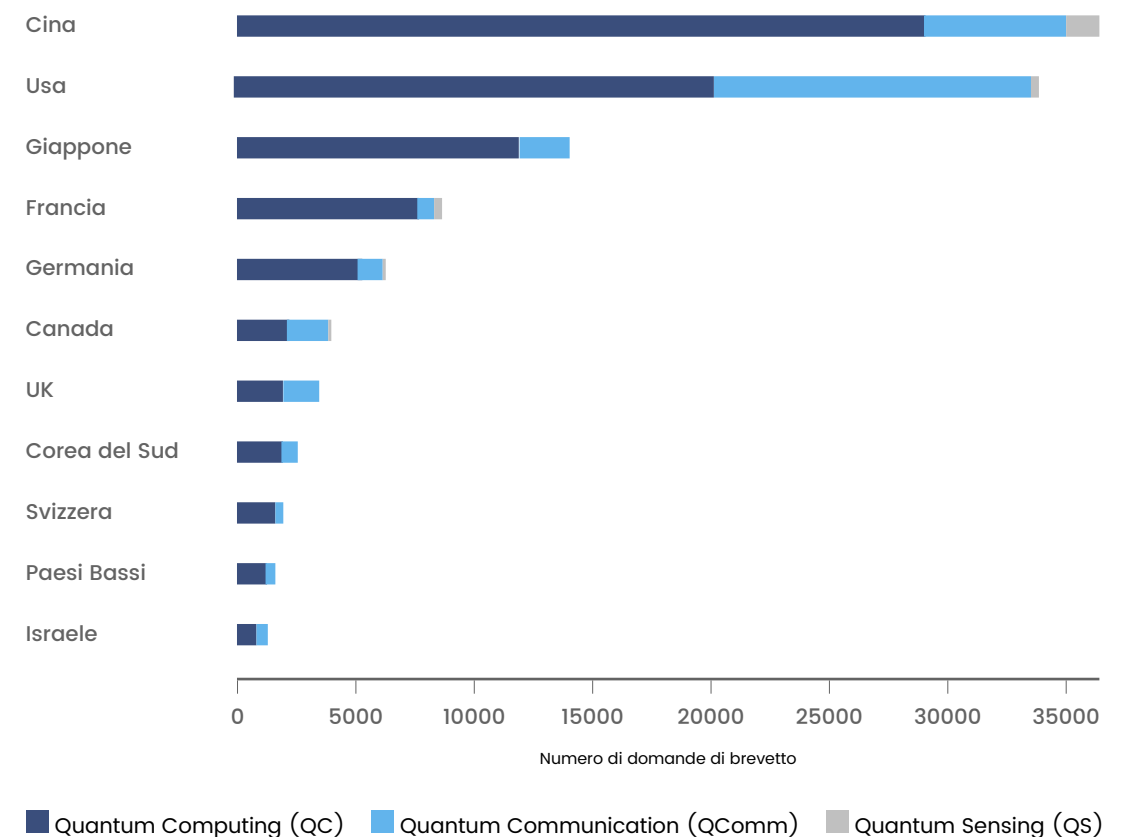
i programmi centralizzati (es. *Quantum Flagship*, finanziato con oltre 1 miliardo di euro), sia i progetti nazionali dei singoli Stati membri. Il programma europeo EuroQCI, ad esempio, mira a creare una rete continentale di quantum communication sicura entro il 2027. Le risorse stanziare a livello UE e dai singoli Paesi membri per questa infrastruttura superano i 500 milioni di euro.

Secondo McKinsey, il livello di finanziamenti privati in Europa rimane contenuto rispetto ad altri cluster globali. Tra il 2015 e il 2023, il continente ha attratto circa il 16% del totale

globale di investimenti di venture capital, pari a circa un sesto di quelli degli Stati Uniti. L'Europa conta al settembre 2025 oltre 100 startup attive nel settore del quantum, con una forte concentrazione in paesi come Germania, Francia, Paesi Bassi, Finlandia, Italia e Spagna. La Germania rappresenta il mercato più solido in termini di dimensioni e capacità industriale, seguita dalla Francia. Tuttavia, si evidenzia anche una crescita dell'ecosistema italiano, con un numero crescente di iniziative legate al quantum sensing, alla fotonica e ai programmi Horizon Europe.

Domande di brevetto in tecnologie quantistiche per Paese e area (2000-2024)

Fonte: elaborazione Fondazione LINKS su dati McKinsey



Nel continente asiatico, invece, è la Cina il paese con i più alti investimenti pubblici nel settore delle tecnologie quantistiche, con 15,3 miliardi di dollari in fondi pubblici cumulati, oltre il 40% dei fondi pubblici globali. Accanto alla leadership finanziaria, la Cina si distingue anche per la produzione scientifica e la proprietà intellettuale: detiene infatti il primato mondiale per numero di pubblicazioni in fisica quantistica (circa 42% delle pubblicazioni globali nel 2024) e per domande di brevetto in quantum computing (32% del totale), superando gli Stati Uniti.

In ambito privato, il livello di investimenti in startup cinesi è ancora inferiore rispetto agli Stati Uniti, ma in forte crescita: nel 2023, la Cina ha rappresentato circa il 10% degli investimenti privati globali nel quantum.

Sempre in Asia, il Giappone ha annunciato nel solo 2025 un pacchetto di investimenti da 7,4 miliardi di dollari destinati allo sviluppo delle tecnologie quantistiche e dei semiconduttori avanzati. Si tratta di uno degli interventi pubblici più rilevanti a livello globale, che ha catapultato la nazione ai vertici mondiali per finanziamento statale, subito dietro a Cina ed Europa, e davanti agli Stati Uniti. Questi fondi rientrano in una strategia più ampia promossa dal governo giapponese per rafforzare la sovranità tecnologica in settori strategici come quantum computing e intelligenza artificiale, integrare le tecnologie quantistiche nella manifattura avanzata, nella crittografia e nei trasporti e infine per favorire la collaborazione tra grandi gruppi industriali e centri di ricerca accademici, con player come NTT, Toshiba e Hitachi già coinvolti in programmi pilota e reti quantistiche regionali.

Nei capitoli 3 e 4 del report, le tecnologie quantistiche verranno analizzate nel loro passaggio da concetti teorici e sperimentali a strumenti in fase avanzata di implementazione in ambito industriale o addirittura già applicati concretamente. Le tre principali famiglie tecnologiche, quantum sensing, quantum communication e quantum computing, mostrano diversi livelli di maturità tecnologica e adozione, ma condividono la capacità potenziale di trasformare profondamente settori strategici, dall'energia ai trasporti, dalla sanità alla logistica.

Il quantum sensing è la tecnologia che ha già raggiunto il più alto livello di maturità industriale. Basato su principi come la sovrapposizione degli stati, l'entanglement e l'interferenza, un sensore quantistico permette di rilevare variazioni infinitesimali di grandezze fisiche con una precisione inarrivabile per la sensoristica classica. Le applicazioni oggi già in fase operativa includono l'uso di magnetometri per l'imaging cerebrale non invasivo, interferometri per la navigazione inerziale senza GPS, e gravimetri per la rilevazione di strutture sotterranee o risorse naturali. La sensoristica quantistica è già utilizzata nei settori dell'aerospazio, della difesa, della medicina, e nel monitoraggio delle infrastrutture critiche.

La quantum communication, ancora in fase di consolidamento, è ad oggi implementata in applicazioni reali, soprattutto grazie al protocollo di Quantum Key Distribution (QKD), che consente lo scambio sicuro di chiavi crittografiche sfruttando le proprietà della meccanica quantistica. Si tratta di una tecnologia che garantisce una sicurezza fisica e non solo algoritmica della comunicazione: qualsiasi tentativo di intercettazione altera il sistema quantistico stesso, rendendo l'attacco rilevabile. In ambito operativo, la QKD è stata testata su reti terrestri in fibra ottica e anche su collegamenti satellitari. Applicazioni concrete sono già state realizzate nei settori finanziari, delle telecomunicazioni e della difesa, mentre in Europa progetti come EuroQCI stanno lavorando alla creazione di una vera e propria rete quantistica continentale.

Il quantum computing, sebbene rappresenti la tecnologia a più alto potenziale trasformativo, è ancora in fase di sviluppo avanzato. I computer quantistici sfruttano le proprietà dei qubit – sovrapposizione, entanglement e interferenza – per effettuare calcoli su scala esponenziale rispetto ai computer tradizionali. Le architetture quantistiche attualmente operative sono già utilizzabili via cloud e diverse startup e grandi aziende (come IBM, Google, Pasqal, IonQ) stanno sviluppando hardware e software quantistici per applicazioni industriali. In settori come la farmaceutica, l'energia, i trasporti e la finanza, sono già attivi progetti pilota per ottimizzare processi complessi, simulare strutture molecolari o materiali innovativi, e risolvere problemi di routing o di gestione dinamica delle reti elettriche e logistiche.

Un volano per la nascita di nuovi poli tecnologici e industriali

Le tecnologie quantistiche non stanno solo rivoluzionando settori industriali chiave, ma stanno anche contribuendo alla nascita di nuovi cluster tecnologici e produttivi.

Il quantum sensing ha favorito la creazione di poli industriali nei settori biomedicale, geofisico e della difesa, grazie alla miniaturizzazione dei sensori e alla loro integrazione in sistemi di misura e rilevazione avanzati.

La quantum communication, attraverso progetti come EuroQCI e QUID, sta attivando reti di collaborazione tra società di telecomunicazioni, gestori di data center e centri di ricerca, consolidando le infrastrutture strategiche europee.

Infine, il quantum computing – anche grazie alla disponibilità via cloud – sta generando ecosistemi applicativi attorno a università, provider tecnologici e imprese interessate a sviluppare casi d'uso in logistica, energia, sanità e finanza. L'emergere di questi cluster è un indicatore chiave della transizione in corso tra le promesse delle tecnologie quantistiche e il loro concreto impatto da un punto di vista economico.



2.2 Ecosistemi

Il passaggio dalla ricerca all'industrializzazione dei prodotti e al loro ingresso sul mercato è complesso e per certi versi non lineare, in particolare per tecnologie potenzialmente *disruptive* come quelle quantistiche. La nascita e l'incentivazione di nuove filiere industriali rappresenta una delle modalità più interessanti per favorire il passaggio di competenze e quindi di valore aggiunto dal mondo accademico a quello aziendale. Nel caso delle tecnologie quantistiche, questo approccio diventa ancora più fondamentale rispetto ad altri ambiti *deep tech* per via della grande complessità necessaria a renderle realmente pronte per il mercato.

Gli **ecosistemi dedicati alle tecnologie quantistiche** che sono oggi presenti in alcuni Paesi del mondo riuniscono centri di ricerca pubblici e privati, università, aziende e startup, fondi di investimento e grandi attori pubblici. Le tre quantum technology non sono al momento rappresentate in modo uguale: la gran parte dell'attenzione si focalizza infatti sul computing e, in misura molto minore, sulla communication, con il sensing in una posizione più defilata.

Risorse specializzate sono elemento chiave per lo sviluppo di un ecosistema quantum

La concentrazione sul quantum computing è interessante per comprendere come questi ecosistemi siano nati e come si stiano consolidando. Gli investimenti pubblici e quelli pubblico-privati diventano essenziali sia per la costruzione fisica degli ambienti dedicati alla ricerca e alla sperimentazione, sia per la capacità di attrarre e trattenere le **risorse umane** necessarie. I ricercatori e i tecnici specializzati rappresentano un fattore imprescindibile per il successo di un ecosistema *deep tech* come quello quantistico. In questo specifico momento storico, la loro disponibilità è limitata, da un lato, a causa dell'altro grado di specializzazione richiesto, dall'altro, per via della concorrenza di altre tecnologie emergenti, tra cui in particolare il settore dell'Artificial Intelligence.

2.2.1 Unione europea

Lo sviluppo delle tecnologie quantistiche a livello europeo avviene su più livelli, con un approccio multilaterale e in parte cooperativo. **Il caso europeo è diverso da qualsiasi altro a livello globale** per alcune caratteristiche peculiari di questa area geografica. Infatti, se in altri Paesi esistono progetti a livello nazionale e regionale, qui si aggiunge il livello sovranazionale proposto dall'Unione europea e delle sue agenzie.

Europa: difficoltà nell'industrializzare la grande competenza tecnologica

Un'altra caratteristica del caso europeo consiste nella grande competenza tecnica dei centri di ricerca e delle università, dove ad esempio è nata la meccanica quantistica alla base della seconda rivoluzione quantum, a cui però non corrisponde una capacità effettiva di implementazione delle scoperte in prodotti e servizi da portare sul mercato. Il vecchio continente, con qualche eccezione, non è stato finora capace di cavalcare le rivoluzioni tecnologiche degli ultimi 25 anni e di creare nuove aziende capaci di scalare e affermarsi nel mercato globale. Questa problematica è generalizzata e comune a molti ambiti della tecnologia, dove l'Europa non ha l'equivalente delle cosiddette *Big Tech* statunitensi, società tecnologiche molto grandi e in grado di finanziare attività di ricerca e sviluppo

rilevanti per lunghi periodi di tempo per poi portarle sul mercato.

La **Quantum Flagship** lanciata nel 2018, con un orizzonte temporale di 10 anni e circa 1 miliardo di euro di budget a disposizione, rappresenta la risposta concreta dell'Unione europea alla necessità di coniugare l'eccellenza nella ricerca alla scalabilità dei risultati sul mercato.

La Quantum Flagship vede quattro aree fondamentali nelle quantum technologies: quantum **computing**, quantum **simulation**, quantum **communication**, quantum **sensing and metrology**.

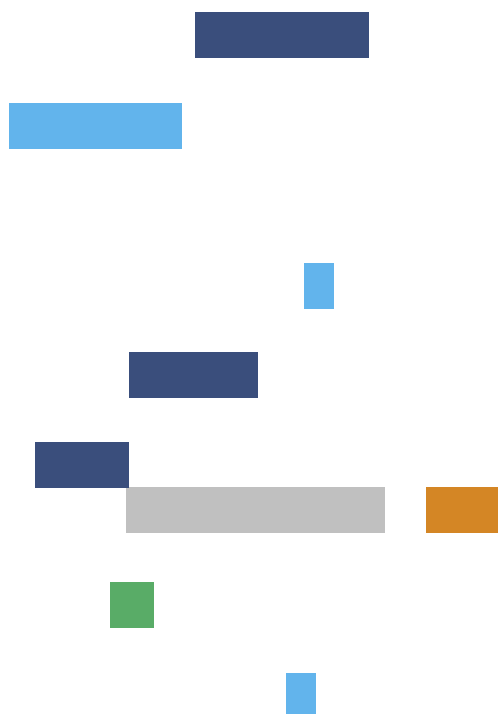
Lo scopo principale dell'iniziativa è quello di favorire la nascita di nuove aziende che abbiano la capacità di scalare e portare l'innovazione sui mercati europei e globali. La Quantum Flagship è oggi pienamente operativa.



Quantum Technologies Flagship

A luglio 2025, la Commissione Europea ha pubblicato una comunicazione ufficiale sulla strategia quantistica dell'Unione. La *Quantum Europe Strategy: Quantum Europe in a Changing World* aggiorna la strategia sulle tecnologie quantistiche dell'Unione europea in accordo con gli Stati membri in un contesto geopolitico profondamente diverso da quello che ha dato vita alla Quantum Flagship nel 2018.

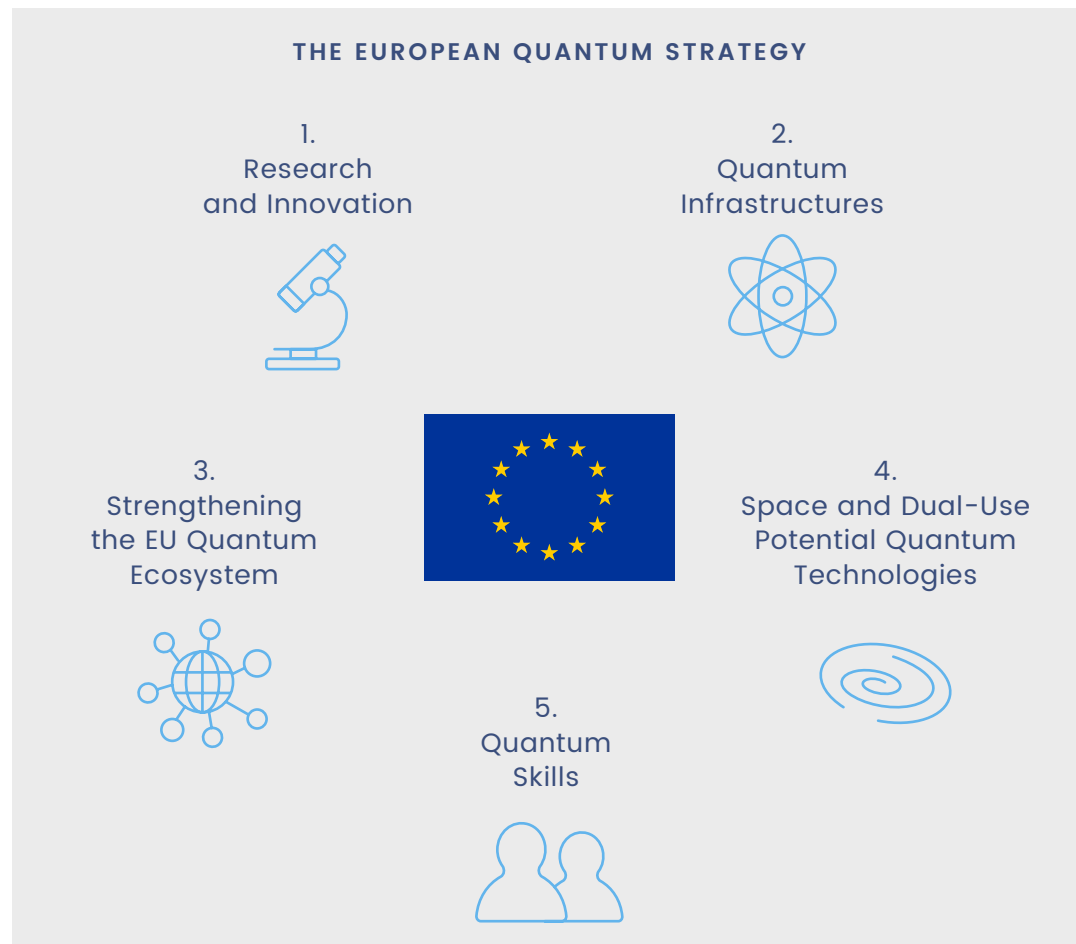
Le instabilità politiche e finanziarie a livello globale hanno messo in evidenza la necessità per l'Europa di diventare sempre più indipendente e autonoma dal punto di



vista scientifico, industriale ed economico nei settori di punta, in particolare in quelli *disruptive* come le quantum tech. Già dal 2023 infatti le tecnologie quantistiche sono riconosciute dall'UE tra quelle critiche per lo sviluppo e la sicurezza dell'Unione. La nuova Quantum Strategy mette in luce grandi risultati dal punto di vista scientifico all'interno dell'Unione a cui si accompagnano purtroppo una scarsa capacità di portare sul mercato le innovazioni e una grande frammentazione nei finanziamenti e nella gestione dei programmi di ricerca e industrializzazione.

La Quantum Strategy del 2025 si basa su cinque aree:

1. **Research and Innovation:** oltre a mantenere la leadership nella ricerca, l'UE vuole puntare sullo sfruttamento di questa conoscenza secondo i motti *From lab to the fab* e *Apply and Use*
2. **Quantum Infrastructures:** l'Unione e i suoi Stati membri sponsorizzano in concerto la creazione di infrastrutture abilitanti. Alcuni esempi ricadono sotto le iniziative EuroHPC JU, Quantum Communication Infrastructure – EuroQCI o



il nuovo programma satellitare IRIS². Tra le iniziative abilitanti ricadono quelle già avviate per il supercalcolo, quelle dedicate alle comunicazioni terrestri, spaziali e sicure, e anche nuove attività nel settore del sensing, con un focus sui gravimetri quantistici e le Risonanze Magnetiche Quantistiche, Q-MRI

3. **Strengthening the EU Quantum Ecosystem:** in questo caso il fine è ridurre la frammentazione in tutta la value chain del settore in Europa per favorire l'industrializzazione e la produzione di chip quantistici europei, anche attraverso iniziative dedicate come il *Chips Joint Undertaking Chips JU*. Le prime sei linee pilota per la produzione di chip quantistici saranno annunciate fra il 2025 e il 2026 per arrivare alle prime fonderie europee di chip quantum intorno al 2030. Una nuova *Quantum Chips Industrialisation Roadmap* sarà rilasciata entro il 2026. A livello nazionale dei singoli Paesi membri, è in corso di espansione la rete dei Quantum Competence Clusters – QCCs. Inoltre, sono previsti investimenti in startup e scale-up, nonché nella creazione di legislazione che faciliti la realizzazione di quantum tech
4. **Space and Dual-Use Potential Quantum Technologies:** il focus è su come integrare le tecnologie quantistiche con potenziale dual-use in tutte quelle strategie europee negli ambiti spaziali, della sicurezza e della difesa al fine di rafforzare sia l'autonomia strategica, sia la competitività dell'Unione europea
5. **Quantum Skills:** sebbene l'Europa possa vantare un'eccellente base accademica, esistono delle forti carenze di personale con competenze verticali e applicate. Nel 2026 sarà creata una

European Quantum Skills Academy che si accompagnerà ad un *Quantum Talent Portal*

A livello dei Paesi europei le iniziative sono molteplici e sempre più spesso realizzate in coordinamento con l'Unione europea e altri Stati membri.

La **Germania** può essere considerata la culla della meccanica quantistica grazie ai suoi grandi scienziati del '900. Oggi la Repubblica Federale ha dato il via a ingenti misure di finanziamento di tutte le tecnologie quantistiche sfruttando la sua ampia rete di centri di ricerca e di partnership pubblico-private, con in primo piano i centri Max Planck e i Fraunhofer. Uno dei principali cluster tedeschi si trova a Monaco di Baviera: la **Munich Quantum Valley** concentra le sue attività su alcune tecnologie per la realizzazione di processori quantistici e piattaforme software per il quantum computing e simulazioni complesse.



Munich Quantum Valley

Nella regione della Turingia, il focus del cluster locale è sulla fotonica e sul quantum sensing. Altri cluster stanno emergendo nelle regioni più industrializzate e nelle città universitarie di Amburgo e Berlino. La Germania può contare su una struttura industriale solida, anche nel settore dei semiconduttori, e su grandi aziende che stanno investendo nel quantum come Bosch, Zeiss, Deutsche Telekom, Siemens e Infineon.

La **Francia** da anni porta avanti una strategia chiara per costruire un ecosistema nazionale il più possibile completo e che comprenda tutte le tecnologie quantistiche. La prima fase de **La Stratégie Nationale Quantique** ha visto un investimento di circa un miliardo di euro nel periodo 2021-2025. Ulteriori fondi sono previsti per la strategia nazionale di crescita delle tecnologie *disruptive*, in cui rientra il quantum, entro il 2030. Il programma francese assegna un ruolo importante ai grandi centri di ricerca pubblici, anche nell'ottica di sfruttare le tecnologie quantum per applicazioni dual-use. Come la Germania, anche la Francia può contare su grandi gruppi industriali interessati allo sviluppo di tecnologie quantistiche come Thales, Orange, Airbus, EDF e altri.



La Stratégie Nationale Quantique

La Francia possiede tre cluster principali. La zona di Parigi e dell'Ile de France ospita un grande numero di università e centri di ricerca pubblici, fra cui emerge il Centre national de la recherche scientifique – CNRS. Le attività sono concentrate sulla fotonica e sulla realizzazione di macchine e chip quantistici. La presenza di startup e scale-up è in crescita, con due attori di primissimo piano sul panorama europeo: Pasqal e Alice & Bob.

La zona di Grenoble, caratterizzata da molti laboratori, si è specializzata nella quantum communication e nei circuiti quantistici. L'Aerospace Valley di Tolosa possiede invece una specializzazione nel quantum sensing, con focus su gravimetri e orologi atomici, per applicazioni utili al settore aeronautico e aerospaziale.

I **Paesi Bassi** presentano un ecosistema molto integrato e vivace, focalizzato su quantum computing e quantum communication. L'iniziativa nazionale **Quantum Delta NL** è partita nel 2021 con un orizzonte temporale al 2035. Il paese vuole sfruttare il grande numero di startup quantum e la qualità dei suoi centri di ricerca e delle sue università, con la TU DELFT in prima linea, per aumentare il numero delle aziende coinvolte sul tema. La joint venture fra la Delft University of Technology e la Netherlands Organisation for Applied Scientific Research – TNO ha dato vita al **QuTech**, uno dei centri di ricerca sul quantum computing e sulle tecnologie per la realizzazione della quantum internet in Europa.



Quantum Delta NL

All'interno dell'Unione europea altri cluster rilevanti sono presenti in:

- **Spagna** – Il paese iberico ha da poco adottato una pianificazione per favorire l'implementazione della tecnologia quantistica nelle comunicazioni, il **Plan Complementario de Comunicaciones Cuánticas**. La vivacità delle università e dei centri di ricerca sta promuovendo la nascita di startup e la partecipazione ai grandi progetti europei
- **Finlandia** – Il paese si è ritagliato un ruolo interessante di produttore *full-stack* ed *end-to-end* di tecnologia per il quantum computing, anche grazie alla presenza di una forte predisposizione alla progettazione di hardware in ambito elettronico e ai numerosi centri

di ricerca specializzati. **IQM**, presentata nel Capitolo 3, è un produttore di macchine quantistiche che sta emergendo nel panorama mondiale come uno fra i più interessanti, sia per elaboratori progettati per la ricerca, sia per computer quantistici pensati per funzionare in sinergia con i sistemi di High Performance Computing classici

- **Austria** – L'Austria ha un ruolo rilevante nella ricerca e nelle applicazioni quantistiche, con un focus sulle comunicazioni, anche in ambito spaziale grazie alle collaborazioni con l'Agenzia Spaziale Europea, nonché sul quantum sensing. Tra i poli pubblici fortemente trainanti il contesto spicca l'**Institute for Quantum Optics and Quantum Information – Vienna (IQOQI-Vienna)**.

Altri Paesi che stanno investendo o pianificando nuove attività nel settore delle quantum tech sono la **Svezia**, il **Lussemburgo**, il **Belgio** e la **Polonia**. In linea generale, anche grazie allo stimolo dell'Unione europea, la maggior parte dei suoi paesi sta sviluppando o ha in programma di sviluppare attività legate al quantum.

All'interno dell'Europa, ma al di fuori dell'Unione europea, Gran Bretagna e Svizzera sono player rilevanti.

In particolare, la **Gran Bretagna** è oggi uno dei player principali a livello globale nello studio e nella implementazione di tutte le tecnologie quantistiche.

Il paese può sfruttare un'ottima rete di centri di ricerca, di aziende high-tech e di investitori molto preparati per gestire tecnologie ad alto potenziale ma ancora immature. Il paese ha implementato già da anni una strategia chiara per favorire la nascita e la crescita di un ecosistema nazionale

che permetta di renderlo indipendente e, in prospettiva, esportatore di quantum tech. In particolare, il **National Quantum Technologies Programme – NQTP** supporta un numero molto ampio di startup, scale-up e progetti di ricerca in tutti gli ambiti correlati, con un focus sul quantum computing e sul quantum sensing.

La Gran Bretagna possiede un buon numero di importanti aziende interessate all'implementazione del quantum, fra cui Rolls-Royce, Airbus, Toshiba Europe e BAE Systems, e una grande quantità di università e centri di ricerca di primissimo piano a livello mondiale. I poli di Oxford, Birmingham, Glasgow e York collaborano con grandi aziende e scale-up.



National quantum strategy

La **Svizzera** può contare su un grande network di università e centri di ricerca, anche internazionali come il CERN, che le consentono, nonostante le dimensioni, di essere un vero e proprio hub della tecnologia quantistica. Il cluster di Ginevra può contare appunto sul CERN e sulle collaborazioni con l'Università di Ginevra: in questo contesto è nata una delle prime aziende europee che si è occupata di quantum communication, **ID Quantique**. Altri cluster sono presenti nella zona di Zurigo e Losanna, grazie ai grandi centri di ricerca delle loro università tecniche e ai loro laboratori dedicati, come il Quantum Center dell'ETH di Zurigo.

#use case

L'ecosistema italiano

L'Italia ha avviato un percorso strutturato per rafforzare il proprio posizionamento nel settore delle tecnologie quantistiche. Il sistema italiano sta lavorando per costruire una filiera quantistica nazionale, capace di integrare ricerca scientifica, sviluppo tecnologico e applicazioni industriali.

A guidare questa trasformazione sono due iniziative nazionali: l'**Istituto Nazionale per le Scienze e le Tecnologie Quantistiche - NQSTI**, un consorzio nazionale istituito nel 2022 e formato da 20 enti tra università e centri di ricerca pubblici distribuiti su tutto il territorio italiano e il **Centro Nazionale ICSC - Centro Nazionale di Ricerca in High Performance Computing, Big Data e Quantum Computing**, che ospita uno Spoke interamente dedicato al quantum e svolge un ruolo centrale nel trasferimento tecnologico e nella gestione delle infrastrutture computazionali ibride classico-quantistiche.



Spoke 10 - Quantum
Computing

Il progetto NQSTI rappresenta uno dei principali investimenti italiani nel campo del quantum: è stato finanziato dai fondi del PNRR con una dotazione complessiva di 115.9 milioni di euro. L'obiettivo è coprire l'intera catena dell'innovazione, dal rafforzamento della ricerca di base fino alla sperimentazione applicata, favorendo la nascita di startup e spin-off e contribuendo in particolare alla crescita del settore nel Mezzogiorno. Questa infrastruttura nazionale nasce per trasformare il potenziale scientifico italiano in applicazioni concrete, supportando lo sviluppo di computer quantistici e sistemi di comunicazione quantistica sicura.

In questo contesto, stanno emergendo alcuni poli strategici che rappresentano veri e propri laboratori di integrazione tra ricerca applicata e industrializzazione.

Uno dei principali protagonisti della trasformazione digitale e quantistica italiana è il CINECA, il più grande centro di calcolo in Italia e tra i principali in Europa. Fondato come consorzio interuniversitario, CINECA non è solo un'infrastruttura di calcolo classico ma sta assumendo un ruolo sempre più attivo nello sviluppo del quantum computing, testando diverse tecnologie. L'ente collabora con IQM (società finlandese specializzata in computer quantistici superconduttivi) per l'installazione, prevista fra la fine del 2025 e l'inizio del 2026, di un sistema quantistico da 54 qubit, che verrà integrato direttamente con il supercomputer Leonardo all'interno della sua sede bolognese.

L'azienda francese Pasqal fornirà, nell'ambito dello European High Performance Computing Joint Undertaking - EuroHPC JU, il computer quantistico EuroQCS-Italy. Il sistema da 140 qubit in analogico è progettato per essere aggiornato negli anni e per essere integrato nel supercomputer Leonardo: la macchina dovrebbe essere pienamente operativa entro il 2027. EuroQCS-Italy è cofinanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca - MUR e da EuroHPC JU.

Dal punto di vista tecnologico, la sfida non è solo scientifica ma anche infrastrutturale. Leonardo è uno dei supercomputer più potenti d'Europa, già operativo nell'ambito dell'EuroHPC (l'iniziativa europea per il supercalcolo). L'integrazione con un computer quantistico reale rappresenta un passaggio chiave verso **modelli ibridi HPC-quantum**, che costituiranno l'ossatura computazionale della ricerca e dell'industria nei prossimi decenni. Il ruolo del CINECA, all'interno della strategia nazionale, è quindi duplice: da un lato potenzia le capacità computazionali italiane con l'integrazione delle tecnologie quantistiche nei sistemi esistenti, dall'altro funge da polo di attrazione per competenze e progetti industriali, facilitando l'adozione del quantum computing da parte di università, aziende e pubbliche amministrazioni.



Cineca ospiterà IQM
Radiance 54, il computer
quantistico più potente
d'Italia

L'area di Napoli è particolarmente attiva grazie alla ricerca di base portata avanti da diversi dipartimenti dell'Università Federico II di Napoli. Presso il Dipartimento di Fisica "Ettore Pancini" è stato assemblato già nel 2023 un primo prototipo di elaboratore progettato per la ricerca e il test della tecnologia, il System Red, prodotto da SeeQC (presentata nel Capitolo 3).

Nel 2024, la Federico II ha inaugurato il primo computer quantistico a tecnologia superconduttiva italiano, **Partenope**, aperto al pubblico per attività di ricerca, sia a livello pubblico sia per i privati. Il sistema, dotato di un processore a 24 qubit, rappresenta un traguardo nell'ambito delle attività di ricerca e sviluppo promosse dall'ICSC. Partenope è accessibile via cloud e rappresenta un esempio virtuoso di come un'infrastruttura scientifica possa essere già oggi utilizzata da aziende e ricercatori per applicazioni reali.



Inaugurato all'Università
Federico II di Napoli il primo
computer quantistico
superconduttivo italiano

A maggio 2025, è stato acceso presso il Politecnico di Torino il primo computer quantistico IQM in Italia, un sistema a cinque qubit.

Questo progetto è il risultato della collaborazione tra il Politecnico di Torino, la Fondazione LINKS e l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica - INRiM, con l'obiettivo di mettere a disposizione della ricerca, dell'industria e dell'accademia una piattaforma avanzata per lo sviluppo di applicazioni quantistiche. Questa macchina è il primo computer quantistico commerciale in Italia e tra i primi al mondo. La particolarità sta nel fatto che, a differenza di molte altre installazioni ancora in fase prototipale o accessibili solo via cloud, questo sistema è operativo ed è orientato all'uso commerciale da parte di aziende e centri di ricerca.

La sua installazione segna un passaggio fondamentale nella strategia nazionale: per la prima volta l'Italia dispone di un'infrastruttura quantistica locale utilizzabile da imprese, enti pubblici e ricercatori, con potenziali applicazioni immediate in settori come la chimica, la logistica, la finanza e l'intelligenza artificiale.



LINKS, Politecnico di Torino
e INRiM: acceso il primo
computer quantistico IQM
d'Italia

A testimonianza del crescente interesse italiano per le tecnologie quantistiche, un dato importante è rappresentato dal numero di brevetti registrati. Secondo i dati del Quantum Technology Monitor 2025, l'Italia ha ottenuto **un totale di 1528 brevetti** nell'ambito delle tecnologie quantistiche, di cui 1443 nell'ambito del quantum computing, posizionandosi al decimo posto nella classifica, dopo UK e Corea del Sud.

2.2.2 Stati Uniti

Gli Stati Uniti da sempre sono considerati un esempio per la loro capacità di innovare e portare sul mercato prodotti e servizi all'avanguardia.

Anche nel caso delle tecnologie quantistiche, gli USA si confermano un ecosistema molto aperto e concorrenziale, dove agli investimenti pubblici a sostegno della ricerca si accompagnano ingenti finanziamenti privati che favoriscono la vivacità imprenditoriale di quel tessuto produttivo. L'approccio statunitense è orientato all'innovazione e alla competitività. In questo Paese le sinergie fra il mondo accademico e il settore industriale sono consolidate: il settore del quantum ha potuto beneficiare di questa impostazione. Gli Stati Uniti infatti sono l'unico attore a livello mondiale in cui sono presenti tutti gli stakeholders della value chain delle tecnologie quantistiche: il settore pubblico (incluso l'apparato militare), le *big tech*, le startup, le sinergie pubblico-private.

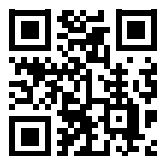
Stati Uniti: una value chain completa

La **National Quantum Initiative - NQI** è definita sul sito ufficiale del progetto come *"a whole-of-government approach to ensuring the continued leadership of the United States in quantum information science and its technology applications"*. Gli Stati Uniti mirano infatti a mantenere la loro posizione di leadership tecnologica su tutta la catena del valore. La NQI è stata firmata nel 2018, con il fine di creare su tutto il territorio statunitense dei cluster che facilitino la messa a terra della ricerca, le successive attività di test, tech transfer e standardizzazione.

Le attività portate avanti dal Governo statunitense si poggiano sulle linee guida evidenziate nel report, sempre del 2018, *A National Strategic Overview for Quantum Information Science* che individua sei aree su cui andare ad intervenire: *science, workforce, industry, infrastructure, economic security, and international cooperation*. La strategia proposta è olistica, in quanto orientata a rafforzare tutte le componenti che possono essere interessate dalla rivoluzione quantistica.

Queste tecnologie vengono considerate come necessarie dal punto di vista scientifico e industriale, anche per tutto il grande ambito della sicurezza nazionale in senso ampio, con un livello di coinvolgimento di stakeholders pubblici a privati molto ampio, tra i quali molte agenzie e ministeri, ed in particolare il Department of Defense - DoD, lo US Department for Homeland Security e la Defense Advanced Research Projects Agency - DARPA, ossia l'agenzia che gestisce la ricerca e l'implementazione di nuove tecnologie di frontiera, per applicazioni militari o dual-use.

Gli Stati Uniti stanno lavorando alacremente per consolidare la loro base industriale dedicata al quantum. La costruzione di infrastrutture per i test e le collaborazioni fra gruppi di ricerca e aziende viene vista come un metodo per favorire il trasferimento di conoscenze e accelerare la ricerca verso prodotti concreti. Inoltre, viene sottolineato quanto sia rilevante possedere una forza lavoro altamente qualificata in questo settore: la formazione e la presenza di ricercatori sono delineati come fattori abilitanti per conseguire risultati rilevanti nel portare le tecnologie quantistiche sul mercato. Tra le strategie suggerite dal Governo statunitense emerge la possibilità di individuare quelle risorse, soprattutto manifatturiere, che potranno essere utilizzate o riprogettate per lo sviluppo e la produzione di tecnologie quantistiche. La parte più cospicua dell'attenzione è focalizzata anche in questo caso sul computing.



National Quantum Initiative

La presenza delle cosiddette *Big Tech*, grandi aziende tecnologiche, si sta rivelando nell'ecosistema statunitense un volano per la ricerca e, in definitiva, un grande

vantaggio competitivo. IBM, Google, Amazon e Microsoft stanno investendo miliardi di dollari in attività di ricerca, collaborazioni con enti accademici e università, sviluppo di attività congiunte con altre aziende e startup. Queste multinazionali stanno agendo da catalizzatrici per la realizzazione in particolare di computer quantistici, come presentato ampiamente nel Capitolo 3 e in alcuni approfondimenti, come quello sul cloud applicato al quantum computing, nel Capitolo 4. La presenza delle *Big Tech* facilita la nascita e lo sviluppo di startup, che possono diventare fornitori di componenti e/o software. Inoltre, in molti casi le startup giocano un ruolo di apripista, in ottica di open innovation, con il supporto di queste grandi realtà.

Aziende specializzate sul quantum computing sono ormai ben finanziate e in alcuni casi anche già presenti sui listini azionari, come IonQ e Rigetti. Come presentato nei capitoli seguenti, a queste si accompagnano molte startup e aziende innovative di medie dimensioni anche nei settori della quantum communication e del quantum sensing. La dimensione territoriale degli USA, unita alla grande quantità di *Big Tech* e startup ha permesso la creazione di molteplici cluster dove si stanno concretizzando alleanze pubblico-private e viene favorita l'innovazione grazie alla sinergia fra università, centri di ricerca e settore privato.

Tra i principali centri emerge il **Chicago Quantum Exchange – CQE** che mette a fattor comune alcuni dei più importanti centri di ricerca degli Stati Uniti come la University of Chicago, l'Argonne National Laboratory, il Fermi National Accelerator Laboratory. Il Centro ha come scopo quello di favorire tutte le attività di generazione di conoscenza, test e sperimentazioni grazie a infrastrutture avanzate e di formazione

specialistica ad ogni livello. Il CQE è supportato dalla macro-regione Illinois-Wisconsin-Indiana per cui le tecnologie quantistiche sono viste come un'opportunità di sviluppo economico e sociale nell'immediato futuro, con importanti ricadute occupazionali e industriali.



Chicago Quantum Exchange

Altri cluster sono presenti in tutto la nazione. Tra i più attivi, in particolare per le sinergie fra pubblico, privato, università e centri di ricerca, emergono:

- Città di **Santa Barbara in California** – La California rappresenta un vero e proprio motore dello sviluppo del quantum computing dal punto di vista hardware e software. Sono presenti grandi università, come la University of California – UCLA, e *big tech* come Google e Microsoft
- **Boston Area in Massachusetts** – La zona di Boston ospita alcuni dei centri di ricerca e delle Università più prestigiosi del paese come il Massachusetts Institute of Technology (MIT) e Harvard. In questa area stanno nascendo molte startup dedicate a vari rami delle quantum technologies, in particolare orientate al computing. Nel 2025, il colosso NVIDIA ha annunciato un investimento in questa zona per la creazione di un centro di ricerca dedicato al quantum computing e alla sua integrazione con le architetture di High Performance Computing classiche
- **College Park in Maryland** – L'area ospita centri di ricerca molto attivi, fra

cui quello dell'Università del Maryland, e aziende specializzate, fra cui emerge IonQ, uno dei leader statunitensi del quantum Computing. A inizio 2025, è stata presentata la *Capital of Quantum Initiative*, a trazione pubblico-privata, per favorire fino ad 1 miliardo di dollari di investimenti nel settore del quantum, con un focus sul quantum computing

- **Boulder Area in Colorado** – L'area di Boulder si caratterizza per una notevole presenza di università e centri di ricerca. Questo cluster si caratterizza per il forte orientamento nella ricerca e nell'implementazione di tutte le tre tecnologie quantistiche. Lo U.S. Department of Commerce Economic Development Administration ha creato con partner locali, *Big Tech* e altre aziende il TechHub chiamato *Elevate Quantum*, una delle realtà più attive sul territorio statunitense per la messa a terra delle tecnologie quantistiche e la loro commercializzazione

L'ecosistema degli USA infine rappresenta un caso unico non solo per la sua estrema efficacia nell'attrarre capitale umano e investimenti esteri, ma anche e soprattutto per favorire nascita e capitalizzazione iniziale delle startup. Il numero dei fondi di **venture capital** è molto esteso, con alcuni di essi che sono verticali su tecnologie *disruptive*, come il quantum, e altri interessati ad un approccio cross-industry. In entrambi i casi, il risultato finale consiste nella creazione di un ambiente imprenditoriale in cui le startup possono nascere ed eventualmente scalare molto velocemente, con ricadute estremamente positive per tutto il sistema socioeconomico. Da questo punto di vista, il resto del mondo, ed in particolare l'Europa, sta inseguendo il modello statunitense sul quantum.

2.2.3 Canada

Il Canada si è posizionato come uno degli attori principali nello sviluppo delle tecnologie quantistiche grazie ad un approccio maturato negli anni e gestito a livello federale. Nel 2023, il Ministero Canadese per l'Innovazione **Innovation, Science and Economic Development Canada – ISED**, ha presentato la **National Quantum Strategy**, con una strategia ben precisa per posizionare il Canada tra gli attori più importanti a livello globale in tutte le tecnologie quantum: sensing, communication e computing. Secondo una ricerca richiesta dal National Research Council of Canada – NRC nel 2020, il settore del quantum nel 2045 potrebbe arrivare a 139 miliardi di dollari canadesi con una ricaduta di circa 200.000 posti di lavoro.



Canada's National
Quantum Strategy

La cosiddetta *Quantum Valley* dell'area di Waterloo–Toronto vede la partecipazione di enti di ricerca, università, industrie e investitori specializzati. In particolare, l'Institute for Quantum Computing dell'University of Waterloo, il Perimeter Institute specializzato in fisica teorica e il Transformative Quantum Technologies Program lavorano in modalità sinergica per portare avanti sia attività di ricerca di base, sia l'implementazione in prodotti e processi pronti per il mercato di quelle tecnologie quantistiche. Alcune delle aziende canadesi più attive sul quantum computing come D-Wave e Xanadu sono nate in questo contesto.

Il Canada ricopre una posizione rilevante anche nel settore delle quantum communication anche grazie alle cooperazioni fra enti pubblici, come l'Agenzia Spaziale Canadese, e società private. Il paese è un leader a livello mondiale nel settore del quantum sensing, in particolare nei settori legati alla geologia, al biomedicale, al monitoraggio avanzato e nella metrologia. Un esempio in Quebec, è il **DistriQ – The Quantum Innovation Zone of Sherbrooke**, che dal 2022 sta costruendo un vero e proprio ecosistema del quantum regionale. Il centro offre spazi attrezzati e accesso facilitato a finanziamenti e partner tecnologici e industriali.



DistriQ

2.2.4 Cina

La **Cina** adotta una strategia diversa dai suoi competitor.

L'approccio cinese è di lungo termine, pianificato, gestito dal Governo: tutte le attività o quasi sono gestite in modo centralizzato. Il fine del gigante asiatico in questo settore è quello di costruire in primo luogo una sovranità tecnologica per non essere dipendente da fornitori esterni, per arrivare nel medio-lungo periodo a diventare esportatore di prodotti e servizi basati sul quantum. Tutte le tecnologie quantistiche sono considerate un asset strategico per la crescita e la sicurezza nazionali.

Cina: pianificazione a lungo termine per diventare il leader

Il 14° Piano Quinquennale in vigore dal 2021 al 2025 aveva pianificato investimenti, normative e semplificazioni per la crescita digitale della Cina e delle sue aziende, puntando, oltre che al supercomputing classico, anche alle tecnologie quantistiche. Questo orientamento fa parte di un progetto di più lunga durata che prevede entro il 2035 l'indipendenza della Cina per quanto riguarda la produzione e la gestione di tecnologie digitali ed informatiche di frontiera.

Come presentato nella prima parte di questo capitolo, la Cina rappresenta il paese che oggi investe di più in queste tecnologie e che sta depositando più brevetti. Uno dei motivi fondanti di questa peculiarità cinese è dovuto alla forte volontà politica che sta premendo per far diventare la Cina leader

del settore quantistico sia in ottica commerciale, sia dal punto di vista militare e strategico. Infatti, la componente dual-use delle tecnologie quantum è considerata strategica.

La visione strategica e dirigista del modello cinese si è concretizzata in questi ultimi anni in una corsa alla realizzazione di laboratori e infrastrutture scientifiche di primissimo piano in tutte le grandi città universitarie. Anche il paese asiatico può contare su una platea molto estesa di grandi gruppi industriali e *big tech* locali interessate all'uso delle tecnologie quantistiche.

Gli ecosistemi cinesi dedicati al quantum si focalizzano nelle grandi aree urbane di **Shangai, Pechino e Hefei**, dove sono presenti istituti pubblici di ricerca e grandi aziende.

2.2.5 Giappone, Corea, Australia

L'area Asia-Pacifico costituisce un blocco caratterizzato da scambi e collaborazioni crescenti fra i Paesi che ne fanno parte. Questo approccio si riflette anche nel modo in cui principali attori affrontano il tema delle tecnologie quantistiche, esclusa la Cina che per dimensione e peso si è ritagliata un ruolo diverso e totalmente autonomo. Giappone, Corea e Australia hanno realizzato importanti investimenti per la ricerca e l'industrializzazione del quantum. Giappone e Australia hanno entrambi forti rapporti con gli ecosistemi europei e statunitensi che stanno lavorando direttamente sull'uso di tecnologie quantistiche.

Il **Giappone** ha una forte tradizione accademica nello studio della fisica quantistica ma, come nel caso europeo, solo recentemente ha effettuato un'accelerazione per portare sul mercato le applicazioni che la sfruttano. La prima iniziativa in questo senso – *Quantum Technology Innovation Strategy* – è partita nel 2020, raggiungendo un significativo punto di svolta nel 2025, quando è stato annunciato il via ad un nuovo programma di investimenti da circa 7.5 miliardi di \$ per favorire la ricerca e il trasferimento tecnologico. Oltre ai finanziamenti, il paese mira a incrementare le collaborazioni internazionali in questo settore, con un'accelerazione prevista proprio a partire dal 2025.

Giappone: il player emergente

Grazie ai nuovi fondi e un nuovo indirizzo politico molto chiaro, il Giappone mira ad ottenere una leadership nel quantum in tutte le sue declinazioni. Il fulcro delle operazioni vede una forte collaborazione fra i centri di ricerca pubblici e le grandi corporation giapponesi, come NTT, Toshiba, Fujitsu e Hitachi.

L'ecosistema giapponese del quantum fino ad oggi ha visto una forte concentrazione nella gigantesca area urbana di Tokyo, dove sono presenti molti laboratori di grandi aziende e centri di ricerca universitari, come ad esempio l'Università di Tokyo e il *RIKEN Center for Quantum Computing*.

L'approccio della **Corea del Sud** è indirizzato al pragmatismo: il paese vuole sfruttare la grande esperienza e forza industriale nel settore dell'elettronica e dei semiconduttori per applicarla alla filiera del quantum. La Corea è intenzionata a colmare il divario che la divide dai suoi principali competitor. Nel 2023 ha presentato una strategia nazionale che prevede tre fasi. Nella prima fase 2023-2027, l'attenzione si concentrerà sul consolidamento nel quantum sensing, quantum communication e formazione di risorse tecniche. La seconda fase 2028-2031 si concentrerà sul quantum computing e la sua industrializzazione. La fase finale 2032-2035 mira a far diventare la Corea uno dei paesi più avanzati nelle tecnologie quantistiche, anche in tutti quei settori che sono legati al dual-use e alla difesa.

La Corea si concentra oggi sul quantum lato hardware, grazie in particolare alle grandi aziende locali del suo apparato industriale, come Samsung e SK Telecom. La maggior parte delle attività si concentra nei laboratori pubblici e privati dell'area di Seoul. Uno dei principali attori è il **KIST – Korea Institute of Science and Technology**.

L'**Australia** rappresenta un altro grande attore dell'area pacifica. Il paese può contare su un mercato interno di dimensioni ridotte e non possiede grandi gruppi industriali legati all'elettronica o alla produzione di apparecchiature con tecnologia dual-use. Tuttavia, l'Australia possiede una serie di università e centri di ricerca molto attenti alle tecnologie quantistiche e con molte collaborazioni attive con Stati Uniti, Europa, Giappone, Corea del Sud e altri paesi tecnologicamente avanzati.

Il **Centre of Excellence for Quantum Computation and Communication Technology (CQC²T)** dell'Australian Research Council a Sidney rappresenta un fulcro attorno a cui si stanno concretizzando molte delle attività legate al quantum nel paese sia per quello che riguarda la ricerca, sia nell'ambito della generazione di imprese. L'Australia sta puntando in particolare sul settore della quantum communication dove ha avviato collaborazioni con attori da tutto il mondo. Il **Quantum Technologies Future Science Platform** del Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) propone oggi attività di ricerca avanzate in particolare nel sensing e nelle communication.

La **National Quantum Strategy** dell'Australia è stata presentata nel 2023 con l'obiettivo di rendere la nazione uno dei leader nelle tecnologie quantistiche a livello globale entro il 2030 attraverso investimenti mirati in infrastrutture, ricerca, capitale umano e collaborazioni con privati. La creazione dell'ecosistema australiano prevede una particolare attenzione anche ai temi legati all'implementazione di standard globali e all'uso etico di queste tecnologie.



National
Quantum Strategy

L'area di Sidney presenta una rilevante quantità di attori sia legati alla ricerca sia in ambito privato con molte startup, tra cui emergono Quantum Brilliance, Silicon Quantum Computing, o Q-CTRL. Inoltre, la sinergia fra il governo del New South Wales e le principali Università della regione (Macquarie University, UNSW Sydney, the University of Sydney and University of Technology Sydney) ha dato il via alla Sidney Quantum Academy, un centro focalizzato sull'educazione verticale sulle tecnologie quantistiche, sul trasferimento tecnologico e sulla promozione della conoscenza in questo ambito.



Sidney Quantum
Academy

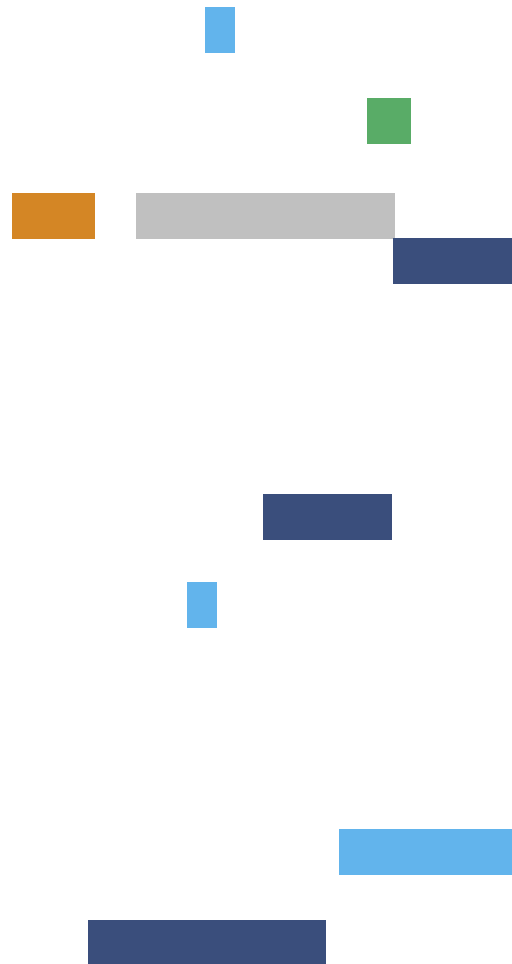
2.2.6

Altri attori emergenti: Israele e Singapore

A livello globale molti altri Paesi stanno investendo in tecnologie quantistiche o stanno approntando strategie nazionali per dare vita a tali attività. I casi di Singapore e Israele sono interessanti per comprendere come due piccoli Stati possano giocare un ruolo di primo piano anche se con obiettivi e modalità molto differenti fra di loro.

Singapore ha creato nel 2022 il National Quantum Office (NQO) che ha in carico la progettazione e l'implementazione della strategia nazionale sul quantum. Un significativo passo avanti è stato realizzato nel 2024 con il lancio della *Singapore's National Quantum Strategy* che prevede la realizzazione di infrastrutture per la ricerca, per il test di tecnologie e per la formazione di professionisti e ricercatori nell'ambito del quantum. Singapore pone un particolare interesse nelle quantum communication e nelle loro applicazioni per le telecomunicazioni e la sicurezza delle informazioni.

Israele può contare su laboratori e centri di ricerca di primissimo piano a livello globale nel settore della fisica e dei semiconduttori. Il paese si è dotato di una *National Quantum Initiative* per favorire la collaborazione fra enti pubblici, startup, grandi gruppi industriali e player internazionali. Tra i soggetti universitari più attivi emergono l'Israel Institute of Technology (Technion), il Weizmann Institute of Science e l'Università di Gerusalemme. Il paese possiede già un gruppo storico di startup che lavorano su diversi temi del quantum, come Classiq, e punta allo sfruttamento delle tecnologie quantistiche in ottica dual-use.



2.3 Considerazioni finali

Nel prossimo decennio le tre tecnologie quantistiche analizzate raggiungeranno un livello di maturazione e affidabilità che le porteranno ad entrare pesantemente nei rispettivi mercati di riferimento. Il quantum computing in particolare prevede di poter raggiungere prestazioni realmente utili per applicazioni concrete dal 2030 circa, come analizzato nel Capitolo 3. Le sfide da affrontare dal punto di vista scientifico, di quello della standardizzazione e dell'industrializzazione sono tuttavia ancora molte e complesse.

L'analisi fin qui portata avanti sembra far emergere una grande competizione fra aree geografiche e potenze industriali con due importanti temi in evidenza. Innanzitutto, la ricerca di una **sovranità tecnologica** nell'intera value chain delle tecnologie quantistiche: USA, Cina e Unione europea hanno le dimensioni e le risorse per cercare di costruire ecosistemi il più possibile autonomi. Questo approccio è tuttavia condiviso da Paesi più piccoli, anche se implementato su scala minore. Una parte della motivazione è di natura geopolitica, oltre che tecnologica in quanto le tecnologie quantistiche sono spesso dual-use. L'altro tema molto rilevante riguarda la capacità di rendere la ricerca e i suoi risultati traducibili in **prodotti e servizi reali** per il mercato.

La creazione di **filiere** industriali solide e ben organizzate rappresenterà un prerequisito essenziale per sfruttare il potenziale del quantum. Allo stesso modo, sarà importante riuscire a pianificare correttamente la **formazione** dei tecnici e dei ricercatori che operano in questo settore per garantire ai centri di ricerca, alle startup e alle aziende il capitale umano di cui hanno bisogno per

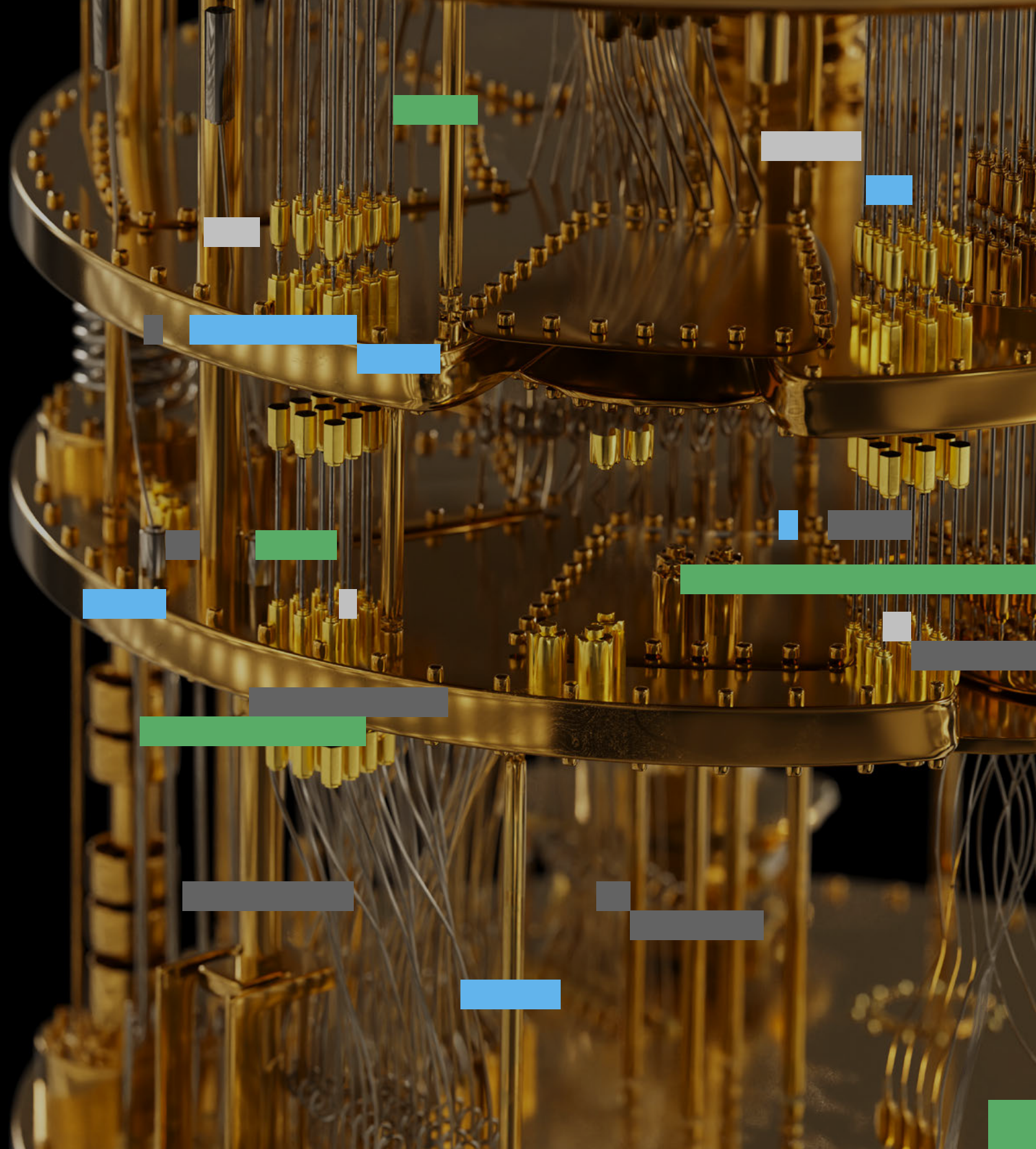
prosperare. Molte delle strategie nazionali puntano con forza a questo obiettivo di medio termine, anche per evitare le problematiche che molti cluster tecnologici e paesi stanno vivendo oggi nel 2025 nella ricerca di personale specializzato, come, ad esempio, nel caso dell'Artificial Intelligence.

Il mercato giocherà un ruolo fondamentale nel definire quali ecosistemi, filiere industriali e approcci tecnologici saranno vincenti. Da un punto di vista delle tempistiche, quantum sensing e communication sono avvantaggiati poiché in avanzata fase di industrializzazione, con alcuni prodotti già disponibili sul mercato. La sfida maggiore riguarderà invece il quantum computing che promette di rivoluzionare molti mercati, ma che è ancora relativamente lontano da una sua dimensione produttiva compiuta.



03/

Technologies

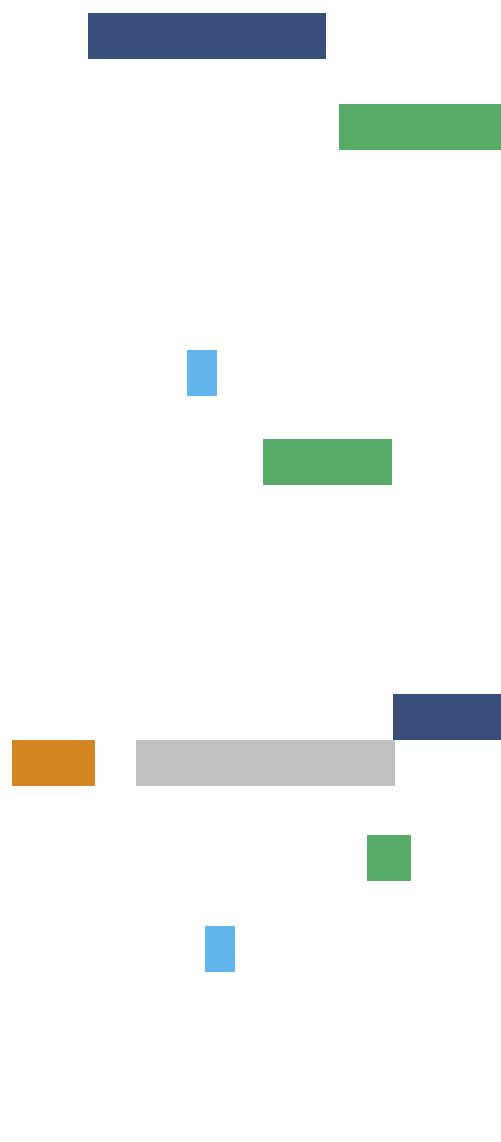


Nei settori della sensoristica, delle comunicazioni e del computing, come è stato presentato nel Capitolo 2, il mercato può essere considerato interessante per fatturato, distribuzione geografica e numero dei player coinvolti.

Le tecnologie quantistiche sono spesso accomunate alle tecnologie di frontiera, lontane da applicazioni pratiche. La realtà è ben diversa dal momento che molte di esse hanno oltrepassato i confini dei laboratori per approdare a settori industriali.

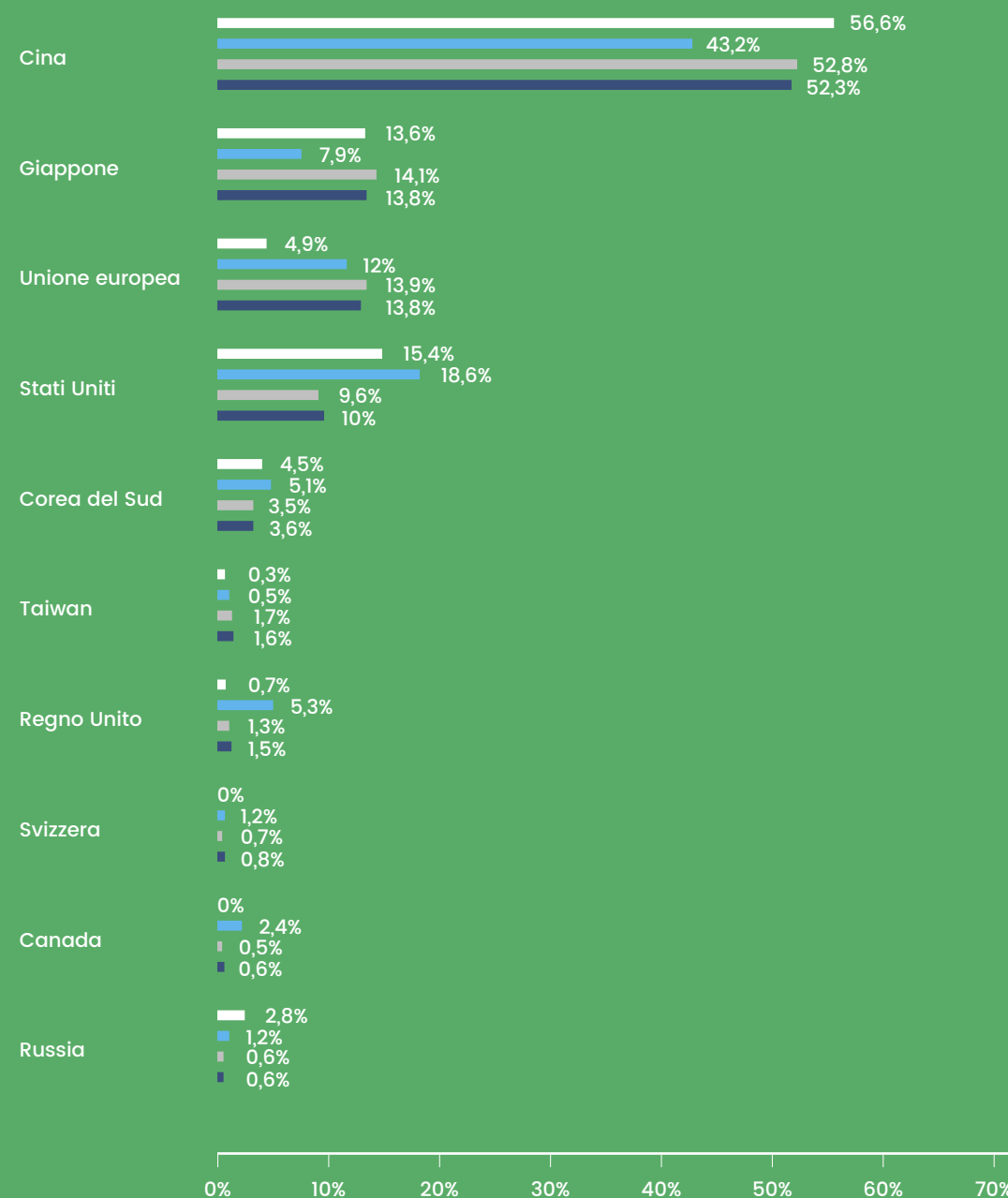
Da molti punti di vista le tre macrocategorie quantum rappresentano altrettante *killer application* che consentono al settore di espandersi e di raggiungere quella massa critica che alimenta l'innovazione.

Dal 2000 al 2022, i dati disponibili riguardo ai brevetti rilasciati nei tre settori del quantum evidenziano quanto la ricerca e l'innovazione in questo settore siano polarizzati su pochi grandi attori a livello globale: Cina, Giappone, Unione europea e Stati Uniti valgono l'89.9% dei brevetti.



Distribuzione percentuale dei brevetti sulle tecnologie quantum, per tipologia e nazione

Fonte: Statista



■ Total ■ Quantum Computing ■ Quantum Communication ■ Quantum Sensing

3.1 Quantum Sensing

Fra i settori industriali che più stanno utilizzando questi sensori, troviamo quelli che richiedono l'analisi di dati con grande precisione e potenzialmente in condizioni particolari o estreme.

L'adozione di sensoristica che sfrutta la proprietà della meccanica quantistica porta ad alcuni grandi vantaggi concreti rispetto alla sensoristica tradizionale: **precisione più elevata, maggiore sensibilità e velocità di rilevazione, miniaturizzazione.**

In linea generale, i sensori quantistici garantiscono prestazioni elevate nella misurazione delle grandezze fisiche, ed in particolare:

- **Tempo e frequenza**
- **Gravità e variazioni del campo gravitazionale**
- **Campi magnetici**
- **Campi elettrici**
- **Accelerazioni e rotazioni**
- **Proprietà ottiche quantistiche della luce**

La sensoristica quantistica risulta molto promettente per una vasta gamma di applicazioni nei settori medico, chimico-farmaceutico, energetico, per la geodesia e lo scan di aree geografiche, per il monitoraggio ambientale, per la navigazione nei settori della logistica e dei trasporti, per attività legate allo spazio e alla difesa. Lo sviluppo industriale di questa branca tecnologica rivoluzionerà i settori che necessitano di dati ultra-precisi per abilitare nuovi servizi.

PROPRIETÀ DEI SENSORI QUANTISTICI



Maggiore sensibilità

I sensori quantistici possono rilevare segnali estremamente deboli



Precisione più elevata

Consentono misure con una accuratezza superiore ai limiti classici



Velocità di rilevazione

Permettono acquisizioni rapide e monitoraggio in tempo reale



Economicità operativa

Richiedono meno costi e meno risorse rispetto ai sensori convenzionali

Fonte: elaborazione interna

Grandezza misurata	Strumenti di misura	Settori d'applicazione	Principali utilizzi
Tempo e frequenza	Orologi atomici	Navigazione, telecomunicazioni, finanza	Sincronizzazione ultraprecisa, timestamping
Gravità e variazioni del campo gravitazionale	Interferometri, gravimetri atomici	Geofisica, risorse naturali, vulcanologia, archeologia	Rilevamento strutture sotterranee, mappe 3D senza scavi
Campi magnetici	Magnetometri	Medicina, industria, difesa	Imaging cerebrale, controllo non distruttivo, monitoraggio avanzato
Campi elettrici	Sensori atomici con varie tecnologie	Diagnostica, elettronica avanzata	Rilevamento variazioni locali, monitoraggio componenti, manutenzione
Accelerazioni e rotazioni	Giroscopi, accelerometri quantistici	Logistica, trasporti, esplorazione spaziale	Navigazione autonoma, backup GNSS, orientamento di precisione
Luce e stati fotonici	Interferometri ottici	Metrologia, comunicazioni sicure, test fisici	Misure ottiche ultraprecise, quantum imaging, sensing ottico

Applicazioni e sfide nell'ambito dei sensori quantistici

Il report "Bringing Quantum Sensors To Fruition" dell'Executive Office del presidente degli Stati Uniti pubblicato nel 2022 individua cinque macro ambiti in cui la tecnologia quantistica ha rivoluzionato o avrà un impatto molto forte nel settore della sensoristica nell'immediato futuro:

1. Orologi atomici
2. Interferometri atomici
3. Magnetometri ottici
4. Dispositivi che utilizzano gli effetti ottici quantistici
5. Sensori atomici di campo elettrico

Per il Governo degli Stati Uniti queste applicazioni rappresentano l'avanguardia concreta di ciò che la sensoristica quantistica può oggi rappresentare per l'industria statunitense, molto orientata a prodotti e prodotti-servizi ad alto valore aggiunto. Infatti, i sensori quantistici offrono prestazioni molto interessanti ma sono spesso caratterizzati da costi più elevati rispetto alla sensoristica standard.



Bringing Quantum Sensors To Fruition

Una ricerca del 2024 portata avanti da ricercatori del McKinsey Center for Quantum Technologies, dell'Università di Heidelberg e dell'Università del Maryland sulla sensoristica quantistica ha messo in luce come questa tecnologia abbia già applicazioni reali e pronte per il mercato, con potenzialità di crescita rilevanti e ad alto impatto per diversi settori industriali e scientifici. La ricerca pone l'attenzione su quattro

tecnologie per la realizzazione di sensori quantistici: gli spin a stato solido, gli atomi neutri, i circuiti superconduttori, e gli ioni intrappolati. Ognuna di queste tecnologie presenta pro e contro a seconda del sensore che si vuole realizzare. Ad oggi, l'uso di spin a stato solido e di atomi neutri raccolgono molto interesse fra i produttori di hardware quantistico per la sensoristica grazie alla flessibilità e alle prestazioni che possono garantire.

La ricerca porta anche in evidenza alcune tipologie di sensori ritenute molto promettenti.

Gli **SQUID - Superconducting Quantum Interference Device** sfruttano la superconduttività in grado di misurare campi magnetici debolissimi grazie a interferenze quantistiche in specifici anelli superconduttori. Si tratta di sensori molto precisi che tuttavia operano in condizioni di criogenia, a temperature vicine allo zero assoluto, per cui hanno bisogno di una gestione termica molto complessa, spesso voluminosa ed energivora. Sono oggi utilizzati per applicazioni come la misurazione dei processi biologici, tra cui l'attività cerebrale (magnetoencefalografia), il monitoraggio di correnti e campi magnetici, le analisi geofisiche.

I **magnetometri atomici** sono basati su atomi in fase gassosa, in particolare il rubidio o il cesio, o sui difetti atomici nei solidi, come nitrogen-vacancy - NV centers nel diamante, per rilevare campi magnetici. Questa tipologia di sensore ha il grande vantaggio di operare spesso a temperatura ambiente pur potendo raggiungere in molti casi una sensibilità simile a quella dei sensori SQUID. La possibilità di lavorare a temperatura ambiente permette di realizzare macchine con sensori portatili e dal consumo molto più basso di quello di un equivalente SQUID grazie all'assenza di circuiti criogenici.

I **sensori ottici quantistici**, che adoperano alcuni stati quantistici della luce e dei fotoni. In questa categoria ricadono gli interferometri quantistici e gli orologi atomici, utilizzati per la gestione ultraprecisa del tempo in settori come la navigazione satellitare e la metrologia.



Quantum Sensing Can Already Make a Difference. But Where?

Nell'immediato futuro, è prevista una crescita significativa di tutto il settore della sensoristica quantistica.

Alcuni settori guidano la domanda per avere prestazioni sempre migliori: sanità, difesa, energia, geodesia, navigazione.

Fra i settori più interessanti emerge l'ambito sanitario dove il monitoraggio non invasivo di parametri fisiologici e per la diagnosi precoce di alcuni processi metabolici potrebbe rappresentare una applicazione in grado di aprire nuovi ed enormi mercati.

Anche il settore geofisico con la mappatura dettagliata delle variazioni gravitazionali per individuare risorse naturali, strutture sotterranee e falde acquifere promette di catalizzare un interesse notevole da parte di gruppi di ricerca e aziende. Inoltre, il momento di instabilità globale legato alle nuove forme di warfare sta favorendo l'utilizzo di questi sensori in ambito sicurezza e difesa per la creazione di sistemi radar avanzati, compatti e energeticamente efficienti, e nella navigazione ad alta precisione e/o inerziale. La maturazione di questi sensori non è tuttavia completa, in quanto permangono molte sfide legate alla miniaturizzazione, alla standardizzazione e all'integrazione con sensoristica e infrastrutture esistenti.

Orologi atomici

Gli orologi atomici sono presenti sul mercato da tempo: rappresentano una tipologia di sensoristica quantum radicata in nicchie specifiche e con mercati definiti e possono essere considerati il **primo** tipo di sensore che ha sfruttato la fisica quantistica, rivoluzionando il modo in cui viene tracciato il tempo grazie all'enorme precisione garantita.

I primi prototipi risalgono agli anni compresi fra la fine degli anni '40 e '50 del '900.

Gli orologi atomici sfruttano la caratteristica di frequenza di risonanza di alcuni atomi, e quindi la frequenza di transizione tra due livelli energetici di un atomo, per misurare in modo estremamente preciso il trascorrere del tempo. Le applicazioni più comuni degli orologi atomici sono quelle dove è necessaria una precisione il più possibile elevata nella rilevazione del tempo.

Gli orologi atomici più diffusi sono basati sull'atomo di cesio-133 e sull'atomo di rubidio-87. Cesio-133 è lo standard internazionale per la definizione del secondo: un secondo corrisponde a 9.192.631.770 oscillazioni della radiazione emessa dalla transizione tra due livelli energetici dell'atomo di cesio-133. Rubidio-87, invece, è meno preciso del cesio ma viene spesso usato in dispositivi portatili o meno costosi.

Molti Paesi posseggono un istituto di **metrologia** che utilizza orologi atomici per scala di tempo nazionale che poi contribuisce a quella globale. In Italia, il sistema che genera la scala di tempo nazionale italiana UTC(IT) è gestito dall'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica - INRiM, con sede a Torino. L'INRiM è noto a livello globale per le sue attività di ricerca avanzate ed è il contributore italiano al Bureau International des Poids et Mesures per il Tempo Atomico Internazionale. Il centro di ricerca utilizza un orologio

atomico con tecnologia a fontana di cesio raffreddato a 89 gradi Kelvin (-184,15 gradi Celsius) che permette di arrivare ad un'accuratezza del campione di $2 \cdot 10^{-16}$.



Definizione
del secondo

Il **settore aerospaziale** utilizza ampiamente gli orologi atomici nei satelliti per la navigazione satellitare, dove la precisione è un requisito fondamentale per garantire agli utenti a terra una localizzazione precisa.

Il sistema di navigazione satellitare civile dell'Unione europea, chiamato Galileo e realizzato dall'Agenzia Spaziale Europea - ESA, monta sui propri satelliti in orbita a circa 23.000 chilometri dalla superficie terrestre due tipologie di orologi atomici: al rubidio e *passive hydrogen masers*.

L'ESA afferma che gli orologi al rubidio dei satelliti Galileo sono così precisi da accumulare un ritardo di tre secondi su un milione di anni di operatività. Per l'ESA e per gli altri operatori di sistemi di navigazione satellitare questa enorme precisione risulta fondamentale per ottenere una localizzazione sempre migliore per gli utilizzatori a terra: uno scarto di pochi nanosecondi da una distanza di 23.000 km dalla superficie terrestre potrebbe infatti tradursi in uno scarto di posizionamento a terra di metri o al più di decine di metri.



How the Galileo atomic
clocks work

L'ESA ha firmato un contratto da 12 milioni di euro con un consorzio a guida Leonardo che include il menzionato INRiM per la realizzazione di nuovi orologi atomici ad altissime prestazioni per i satelliti Galileo di nuova generazione.

Il consorzio svilupperà una nuova generazione di orologio atomico al rubidio a pompaggio ottico pulsato. Il nuovo sistema permetterà di erogare un segnale ancora più "performante" con dimensioni e consumi energetici inferiori ai sistemi utilizzati oggi sui satelliti Galileo in orbita. Lo sviluppo dei nuovi orologi atomici ad altissime prestazioni sarà quindi funzionale al raggiungimento di nuovi standard di precisione per i servizi di PNT - Positioning, Navigation and Timing offerti a terra.



Firmato il contratto
per il nuovo orologio
atomico Galileo

Gli orologi atomici sono utilizzati anche in quegli ambiti dove è fondamentale la precisione relativa al momento in cui una determinata operazione si è svolta, come nel settore **finanziario** dove gli scambi azionari sono sempre più veloci. Per gli High-frequency trader avere accesso a questi asset può così rappresentare un vantaggio competitivo grazie a *time stamps* (etichetta digitale che registra la data e l'ora precise in cui viene registrato un evento o generato un dato) sulle transazioni che permettono di effettuare operazioni con un margine di precisione altissimo.

Orologi che perdono un centesimo di secondo ogni milione di anni

Nel 2025, è stato poi annunciato un passo avanti nella realizzazione di una nuova generazione di orologi atomici ancora più performanti: l'orologio atomico a fontana di cesio NIST-F4 dello statunitense National Institute of Standards and Technology (NIST) presenta una total systematic uncertainty pari a 2.2×10^{-16} che si traduce in una perdita di meno di un secondo su 140 milioni di anni di tempo misurato.

Questo nuovo strumento permetterà di rendere ancora più performanti quelle applicazioni che richiedono una certezza il più elevata possibile del tempo.



New Atomic Fountain
Clock Joins Elite Group That
Keeps the World on Time

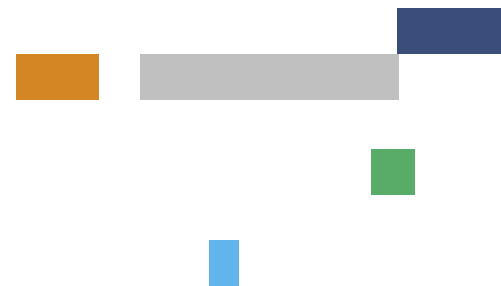
La precisione degli orologi atomici è sempre più richiesta in settori dove i time stamp giocano un ruolo fondamentale per la sincronizzazione di reti di telecomunicazione, sistemi di cifratura, attività economiche e finanziarie. Tuttavia, questi dispositivi richiedono spesso infrastrutture molto complesse per la loro gestione, anche dal punto di vista del loro raffreddamento.

Il NIST, in collaborazione con l'Università di Boulder in Colorado, ha creato una joint venture per testare nuovi orologi atomici come quelli basati su atomi di stronzio.

Un ricercatore proveniente da quel laboratorio ha co-fondato **Vector Atomic**. La startup ha l'obiettivo di portare la *quantum precision* in tutti quei settori critici dove è richiesta una precisione assoluta ma dove un orologio atomico standard non può essere adottato e dove uno miniaturizzato può non avere la precisione desiderata. Vector sta progettando una nuova generazione di orologi atomici e di magnetometri atomici con prestazioni elevate e dimensioni contenute in volumetrie simili a quelle di una valigia o di una workstation da inserire in un rack. Vector atomic ha già testato alcune sue soluzioni per la navigazione inerziale su navi in mare aperto.



Vector Atomic



Aquark Technologies è una startup inglese focalizzata sulla miniaturizzazione delle tecnologie quantum per il sensing e il computing. L'azienda sta lavorando a prodotti che rendano la tecnologia quantum il più possibile trasportabile e utilizzabile al di fuori dei laboratori, in contesti reali. AQlock, il loro prodotto principale, rappresenta la concretizzazione di questo approccio: si tratta di uno dei primi orologi atomici a freddo, cold atom clock, miniaturizzati ma ad alte prestazioni disponibili commercialmente. L'azienda ha sviluppato una metodologia proprietaria per raffreddare gli atomi senza campi magnetici esterni, riducendo la complessità dell'apparecchiatura. AQlock mantiene i vantaggi di un orologio ad atomi freddi proponendo un formato portatile. L'orologio è progettato per funzionare in ambienti difficili o estremi.



Aquark Technologies

Gli orologi atomici fin qui presentati sono estremamente performanti ma posseggono due grandi limiti: sono spesso di grandi dimensioni e molto costosi, il che li rende difficilmente realizzabili in grandi serie per un ampio utilizzo commerciale.

A partire dai primi anni 2000, è stato avviato un processo di miniaturizzazione che ha portato sul mercato i **Chip-Scale Atomic Clocks – CSACs**, che colmano una nicchia di attività dove i sistemi più complessi, e più grandi, non sono utilizzabili. Questa tecnologia è diventata realmente interessante dal punto di vista commerciale negli ultimi 5/10 anni grazie a dimensioni sempre più contenute e nuovi casi d'uso.

Nel settore dei trasporti, gli CSACs possono compensare la mancanza di copertura di segnali per la navigazione satellitare per garantire una navigazione inerziale performante. Droni e apparecchiature per la navigazione in contesti critici usano questa tecnologia sia in ambito civile sia in quello militare. I CSACs possono essere usati anche come fonti di scale di tempo di backup per applicazioni finanziarie o per sensori in aree remote o con scarso accesso ai satelliti in orbita.

La statunitense **Microchip Technology** è uno dei maggiori produttori di orologi atomici miniaturizzati. Grazie all'esperienza accumulata negli anni e ai feedback dei propri clienti, l'azienda sperimenta l'uso di questi suoi dispositivi in molti ambiti industriali e scientifici diversi. Microchip Technology è specializzata nella produzione di orologi atomici miniaturizzati al rubidio caratterizzati da un basso consumo energetico, un'alta affidabilità e resistenza. Gli orologi sono disponibili in diverse versioni, tra cui quelle rugged per applicazioni militari e nel settore spaziale, come sistemi di bordo e payload di satelliti di piccole dimensioni in bassa orbita terrestre.

Microchip Technology sta impiegando i propri orologi miniaturizzati anche in contesti estremamente sfidanti, come nel settore sottomarino dove è necessario avere accesso a sistemi di Position, Navigation and Timing – PNT pur non potendo ricevere i segnali per la navigazione satellitare dai sistemi in orbita. Questa nuova generazione di orologi atomici è progettata per garantire prestazioni costanti nel tempo nonostante le oscillazioni di temperatura e pressione che possono avvenire nei mari. Il loro uso permetterà di avere cluster di sensori molto più affidabili per quelle attività che sfruttano il timing ultrapreciso per il monitoraggio e la ricerca dei fondali

oceanici. La stessa tecnologia potrebbe poi avere un impiego per la navigazione inerziale di droni e robot sottomarini (tematica affrontata dall'X-Plore Ocean di questa collana).



Microchip Technology

Adamant Quanta ha progettato una nuova generazione di orologi atomici miniaturizzati che sfrutta cristalli di diamante realizzati artificialmente. Questi diamanti incorporano difetti caratterizzati da proprietà quantistiche ben precise che vengono sfruttate per il funzionamento dei device. Gli orologi atomici miniaturizzati della serie QDi.AC sono estremamente compatti e robusti. Sono progettati per essere integrati su circuiti stampati come componente elettronico standardizzato rendendolo compatibile con architetture già esistenti. La tecnologia a diamante sintetico come supporto atomico può essere vantaggiosa in alcuni casi specifici in cui permette di ottenere prestazioni superiori rispetto agli CSACs già disponibili, in particolare per quello che riguarda la stabilità dell'orologio e l'efficienza energetica. I QDi.AC sono utilizzati in ambiti applicativi in cui serve una continuità operativa in condizioni estreme, come il settore della difesa e delle comunicazioni.



Adamant Quanta

Interferometri atomici

Un'altra tipologia di sensori quantistici è quella degli **interferometri atomici**, progettati per sfruttare il comportamento ondulatorio della materia evidenziato dalla fisica quantistica.

Questi sensori spesso sono basati su atomi ultra-freddi posti in uno stato di sovrapposizione quantistica o possono utilizzare la luce (interferometri ottici).

Il vantaggio più rilevante rispetto ai sensori classici è che non è necessaria una continua calibrazione in quanto sono stabili nel tempo e possono operare senza derive anche in ambienti considerati difficili, nonché per lunghi periodi di tempo.

A livello scientifico e industriale, questa tipologia di sensori gioca un ruolo interessante nelle applicazioni di navigazione inerziale dove possono assumere la forma di accelerometri e giroscopi quantistici, nelle ricerche geofisiche e nel monitoraggio delle infrastrutture. Entrambe le famiglie di sensori hanno un ruolo sempre più rilevante nel settore dei trasporti e della logistica. In alcuni casi possono essere utilizzati in combinazione fra di loro, a seconda delle necessità applicative.

Fra gli interferometri atomici, i **gravimetri quantistici** emergono per la loro potenzialità in ambito industriale e scientifico.

Questa tipologia di sensori sta aprendo nuove possibilità per la rilevazione di oggetti sotterranei, falde acquifere o giacimenti di materiali specifici senza il bisogno di costose e lunghe operazioni di scavo. Alcuni prodotti sono già disponibili a livello industriale e scientifico.

Nel 2022, per la prima volta, sono stati usati per la caratterizzazione del sottosuolo di aree vulcaniche: l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – INGV italiano ha

usato un gravimetro quantistico per analizzare i movimenti del magma di una zona del vulcano Etna. L'esperimento ha dimostrato i vantaggi di questa tecnologia in termini di dati significativi collezionati in modo continuativo.

Creare mappe dettagliate del sottosuolo

In futuro, l'uso di questa tecnologia potrebbe permettere di ottenere dati molto più sfruttabili di quelli oggi a disposizione per comprendere l'evoluzione dei sistemi vulcanici e delle aree soggette a fenomeni vulcanici.

In questo particolare settore, alcune startup stanno investendo nella realizzazione di prodotti caratterizzati da alta affidabilità e dimensioni compatte, le due caratteristiche più importanti per un sensore di questa tipologia. I gravimetri quantistici promettono di rivoluzionare per tempistiche e costo l'esplorazione delle risorse sotterranee, sia a terra sia a livello marittimo.

Nel prossimo futuro, sarà possibile usare questi strumenti per mappare il sottosuolo in modo continuativo e non solo a campione come avviene oggi, identificando giacimenti di idrocarburi o di altre materie prime che non sono ancora stati mappati o lo sono solo in parte.

Atomionics da Singapore sta ingegnerizzando una nuova generazione di gravimetri che sfruttano le proprietà degli atomi di rubidio raffreddati a laser per indagare la struttura del sottosuolo.

Il loro prodotto di punta, chiamato Gravio, è un interferometro atomico molto compatto pensato per favorire l'esplorazione del sottosuolo su mezzi in movimento come van, elicotteri o navi. Il vantaggio dell'uso in mobilità è potenzialmente dirompente rispetto ai gravimetri oggi disponibili in quanto abilita la mappatura del sottosuolo con una precisione molto più alta, evidenziando più velocemente dettagli anche non rilevabili con i sistemi attuali. Questa maggiore precisione si traduce anche in una riduzione di costi: un'indagine su aree vaste può essere svolta in tempi ridotti e con maggiore precisione.

Il dispositivo è progettato per individuare variazioni gravitazionali che possono ricondurre a giacimenti di minerali o idrocarburi, a infrastrutture sotterranee come tubature o fogne, a zone che sono caratterizzate dalla presenza di acqua. Gravio è un prodotto in evoluzione e in futuro saranno disponibili versioni ancora più compatte, installabili su droni o su altre tipologie di veicoli per rilievi rapidi.



#video
*How does Gravio,
a quantum gravimeter,
work?*

M Squared ha per prima introdotto sul mercato britannico un gravimetro quantistico industriale a livello commerciale ingegnerizzato nel paese. L'azienda ha sviluppato tecnologie proprietarie per la realizzazione di prodotti che usano tecnologie quantistiche anche nel settore degli orologi atomici, dei computer quantistici e della navigazione inerziale avanzata. Il gravimetro quantistico industriale di M Squared sfrutta il raffreddamento laser per gestire atomi di rubidio-87. Il gravimetro misura con precisione l'area esaminata rilevando oggetti, strutture sotterranee e formazioni geologiche senza scavi. Il sistema è corredato da un software progettato per facilitare la lettura dei risultati. L'azienda si focalizza su usi legati ai settori della geodesia, del monitoraggio del sottosuolo per l'individuazione di giacimenti e dell'archeologia.



M Squared

Magnetometri quantistici

Nella famiglia in crescita del quantum sensing si stanno affermando nuovi sensori che usano diversi principi della meccanica quantistica per misurare campi magnetici estremamente deboli: questi sensori sono i **magnetometri quantistici**.

Lo sfruttamento degli stati quantistici degli atomi come fonte di raccolta dei dati consente di arrivare a precisioni e risoluzioni spaziali che i magnetometri classici non possono raggiungere per limiti fisici. Questa nuova generazione di magnetometri sta cominciando ad essere utilizzata prevalentemente in ambito industriale per attività di monitoraggio e manutenzione nel settore delle infrastrutture, dei macchinari e delle applicazioni biomediche.

Un altro ambito dove la ricerca sta progredendo velocemente è quello sanitario e medicale, ove questi sensori promettono di aprire nuove possibilità per diagnostica ultraprecisa e non invasiva.

In particolare, i **magnetometri Superconducting Quantum Interference Device – SQUID** sono diventati lo standard per le magnetoencefalografie – MEG, giacché rendono possibile la rilevazione dei debolissimi campi magnetici prodotti dall'attività delle cellule a livello cerebrale, non rilevabili a questo livello di dettaglio con la sensoristica standard. Tuttavia, gli SQUID richiedono macchinari complessi per mantenere la temperatura criogenica dei sensori, il che ne aumenta il consumo in termini di fabbisogno energetico.

Imaging molecolare e diagnostica di precisione

Questa tecnologia si sta rapidamente evolvendo grazie agli **Optically Pumped Magnetometers – OPM**. Gli OPM sfruttano le proprietà quantistiche di vapori atomici a temperatura ambiente: consumi e complessità del sistema calano drasticamente, non essendo necessario alcun apparato criostatico, così come la dimensione ridotta permette di progettare caschi di sensori indossabili, relativamente leggeri e sufficientemente confortevoli da indossare e che consentono un certo grado di libertà nel movimento, aprendo la strada a nuove forme di monitoraggio anche nel settore pediatrico.

Altri magnetometri atomici di nuova generazione sfruttano invece i difetti nei cristalli di diamante con la **tecnologia a Nitrogen Vacancy – NV**, arrivando a misurare campi magnetici anche a scala nanometrica. La precisione è tale da aver permesso in laboratorio di rilevare l'attività di singoli neuroni.

L'insieme di queste tecnologie, combinata con la crescente disponibilità di risorse di High Performance Computing in grado di processare grandi quantità di dati in tempi brevi, aprirà nuove prospettive per l'imaging molecolare e la diagnostica di precisione e personalizzata.

Cerca Magnetics nasce come spin-off dell'Università di Nottingham nel Regno Unito. La startup ha sviluppato con tecnologia proprietaria un sistema di magnetoencefalografia progettato per essere facilmente indossabile, per lunghi periodi e anche da soggetti pediatrici, grazie all'uso di OPM. Questi nuovi magnetometri sono più compatti rispetto a quelli della generazione precedente, pur garantendo una misurazione dei campi magnetici cerebrali ad alta precisione. Inoltre, il sistema non necessita di raffreddamento criogenico, consentendo di ridurre drasticamente i consumi energetici rispetto ai tradizionali MEG che richiedono raffreddamento. Cerca Magnetics sta concentrando le sue attenzioni sull'imaging cerebrale, con l'obiettivo a medio termine di identificare nuove metodologie per la diagnosi precoce di condizioni neurologiche debilitanti.



Cerca
Magnetics

La tedesca **Q.ANT** è specializzata in sensori fotonici quantistici di nuova generazione basati sulla tecnologia nitrogen vacancy. Il prodotto di punta dell'azienda si chiama Q.M 10, un magnetometro quantistico molto compatto, con un consumo di 10W e un peso di 600g. Offre un'altissima precisione di rilevamento: lo strumento è progettato per essere in grado di misurare campi magnetici estremamente deboli, con una sensibilità che può arrivare fino a 10 picotesla operando a temperatura ambiente. Tali caratteristiche consentono un impiego potenziale in molti contesti professionali, da quello medico in campo diagnostico a quello industriale per il monitoraggio ultra-preciso di macchinari e di rilevamento della qualità o dei difetti in alcuni tipi di materiali.



Q.ANT

KWAN-TEK progetta e realizza magnetometri basati sulla tecnologia nitrogen vacancy. L'azienda si è specializzata nel settore della metrologia quantistica avanzata e del controllo non distruttivo di materiali in ambito industriale. Il magnetometro High Field NV Magnetometer è progettato per essere ultra-stabile e quindi monitorare con efficacia le fluttuazioni del campo magnetico in tempo reale di quelle apparecchiature che producono campi magnetici molto forti come alcuni esperimenti nel settore della fisica, gli acceleratori di particelle o le macchine per la risonanza magnetica. L'uso di diamanti NV rende lo strumento stabile nel tempo, senza bisogno di calibrazioni periodiche, riducendo così i costi e aumentando la sua disponibilità operativa.



KWAN-TEK

La stessa risonanza magnetica – MRI sfrutta i principi alla base della meccanica quantistica per raccogliere dati che vengono poi processati per ottenere immagini diagnostiche non invasive sempre più dettagliate. La ricerca scientifica in questo settore è particolarmente interessante per ciò che in futuro potrebbe diventare possibile con i nuovi sistemi di MRI.

Un esempio arriva dalla tedesca **NVISION** che sta lavorando su una nuova tecnologia che sfrutta le recenti scoperte della fisica quantistica per risonanze magnetiche con una risoluzione estremamente più elevata di quelle disponibili, senza necessità di sostituire le macchine attualmente in uso. L'azienda intende aumentare la possibilità

delle MRI odierne nella detection di alcune forme tumorali grazie ad una forma di acido piruvico modificata per rendere lo spin nucleare dei suoi atomi di carbonio più "visibile" alla macchina. Grazie a questo approccio innovativo sarà a breve possibile ottenere scansioni molto più precise sullo stato di avanzamento di forme tumorali e metastasi, nonché del modo in cui essi reagiscono alle terapie anche poco dopo la loro somministrazione.



NVISION

Un approccio molto orientato all'innovazione nel mondo corporate è portato avanti dalla multinazionale tedesca **Bosch** che ha creato al suo interno una business unit che agisce come una vera e propria startup dedicata al quantum sensing, la **Bosch Quantum Sensing**. L'azienda ha come scopo nel medio periodo la realizzazione di una nuova generazione di sensori quantistici ad altissima precisione, compatti ed energeticamente efficienti. Bosch punta molto quindi sulla miniaturizzazione, garantendo al contempo prestazioni interessanti: in alcuni settori l'azienda mira a raggiungere misurazioni "quasi 1.000 volte più precise di quelle fatte dai sensori MEMS (micro-electro-mechanical system) di oggi".



Bosch Quantum Sensing

In Italia, lo spin-off dell'Università di Bari **QSENSATO** sta sviluppando sensori atomici di nuova generazione, capaci di eseguire misurazioni ultra-precise rilevando variazioni minime nei campi elettrici e magnetici. Il cuore della tecnologia è l'integrazione dei chip atomico-fotonici in dispositivi miniaturizzati, che trovano applicazione in ambiti strategici come la diagnostica medica, la geofisica, la navigazione senza GPS e il monitoraggio delle infrastrutture critiche. Fondata da un team di ricercatori, nel 2025 ha chiuso un round pre-seed da 500 mila euro grazie all'ingresso di LIFTT e Quantum Italia, due fondi italiani specializzati in deep-tech e tecnologie quantistiche. Questo investimento sosterrà lo sviluppo di nuovi prototipi, l'ingresso nel mercato europeo e quello statunitense e la crescita del team.



Qsensato

3.2 Quantum Communication

La meccanica quantistica sta rivoluzionando anche il settore delle telecomunicazioni. Le comunicazioni *quantum* impiegano i principi della fisica quantistica per rendere più performanti i sistemi o per proporre soluzioni e funzionalità non ottenibili con sistemi basati sulla fisica classica. La sovrapposizione e l'entanglement fra particelle diventano quindi strumenti abilitanti per reti di comunicazioni più sicure e più veloci.

Nel contesto della fisica quantistica, uno dei presupposti fondanti prevede che la misura o l'osservazione di un qualsiasi sistema quantistico in qualche modo ne disturbi lo stato. Il risultato è che chiunque tenti di osservare o manipolare una forma di comunicazione quantum lascerà una qualche forma di traccia rilevabile.

Il livello di sicurezza risulta essere, dal punto di vista teorico, molto più alto di quello ottenibile con tecniche non-quantum. Da questo punto di vista, l'uso di tecnologie quantum per le comunicazioni introduce alla possibilità di avere dei sistemi caratterizzati da **sicurezza intrinseca** poiché ogni intrusione o osservazione dei dati diventa fisicamente rilevabile.

Allo stesso modo, stanno emergendo studi e applicazioni pratiche mirate a sfruttare l'entanglement per generare correlazioni tra particelle poste a distanze molto rilevanti. In condizioni ideali di laboratorio è possibile raggiungere distanze di centinaia di chilometri su reti in fibra ottica e migliaia in condizioni di Spazio Libero, come nel vuoto fra satelliti in orbita terrestre o fra satelliti e reti a terra. In condizioni reali le distanze sono più brevi: su questo tema si sta concentrando la ricerca sia per migliorare le reti esistenti in funzione della tecnologia quantistica sia per trovare modi di gestire meglio il segnale quantistico con dei quantum repeaters, il cui sviluppo è ancora nella fase per lo più teorica e sperimentale. Queste correlazioni hanno il vantaggio di avvenire in modo istantaneo, senza subire alcun tipo di cambiamento dovuto a distanza, ad altre interferenze e a manomissioni intenzionali, garantendo una **comunicazione estremamente veloce e sicura** di un dato o di un pacchetto di dati.

Quantum Key Distribution e Sicurezza delle Comunicazioni

Nel grande settore delle comunicazioni quantum il protocollo **Quantum Key Distribution - QKD** emerge per importanza, attività di ricerca e applicazioni concrete. Rispetto alla sensoristica tutto il settore delle comunicazioni quantum si colloca su un livello di sviluppo industriale e commerciale inferiore. Tuttavia, all'interno di questo contesto, la QKD rappresenta il protocollo più prossimo alla diffusione di massa, con molte aziende che lavorano su applicazioni market-ready se non addirittura già commercializzate (quindi con un Technology Readiness Level alto).



Come sottolineato nel primo capitolo, il protocollo QKD non è utilizzato per trasmettere direttamente messaggi o informazioni: la QKD fornisce invece un insieme di chiavi di cifratura inviolabili da utilizzare per scambiare dati su canali classici. **La QKD è quindi un sistema per la distribuzione sicura delle chiavi crittografiche e non un sistema di crittografia.**

Questa sua caratteristica la rende molto interessante per l'aggiornamento delle infrastrutture di comunicazione esistenti, con un'attenzione a quelle in fibra ottica. Le implicazioni dell'uso di questa tecnologia sono rilevanti da molti punti di vista, sia economici, sia strategici, sia sociali. L'implementazione della QKD può contribuire in modo decisivo alla sicurezza e all'invio di informazioni sensibili alla base di società ed economie avanzate, in particolare di dati finanziari e bancari, legati all'individuo come i dati sanitari, derivanti da applicazioni o attività aziendali, e infine informazioni militari e strategiche, che possono includere anche quelle impiegate in attività di protezione dei cittadini, protezione civile e gestione delle emergenze.

La QKD e la tecnologia alla sua base sono ancora oggetto di studi e sperimentazioni in quanto alcune proprietà relative al loro sviluppo necessitano affinamenti tecnologici per essere utilizzati su larga scala. Uno degli aspetti in corso di studio riguarda l'attenuazione dei segnali quantistici su lunghe distanze in alcune tipologie di reti. La complessità tecnica incide inoltre sia su quella delle apparecchiature, sia sui relativi costi di produzione e gestione. Inoltre, la QKD necessita di essere integrata in modo efficace nei sistemi di trasmissione delle comunicazioni e con gli algoritmi di cifratura dei dati. Come per altre tecnologie simili

in passato, molte aziende e startup stanno lavorando sull'ingegnerizzazione di sistemi QKD più semplici, economici e versatili.

I principali provider tecnologici di tecnologia Quantum Key Distribution sono concentrati fra Europa e nord America. Le attività di ricerca e sviluppo, nonché la creazione di startup, stanno procedendo molto velocemente a livello globale, con un ruolo molto rilevante da parte della Cina (si rimanda al Capitolo 2 per approfondimenti). In questo particolare caso, è importante sottolineare quanto questa tecnologia sia considerata dual-use, utilizzabile sia in ambito civile sia in ambito militare e strategico. Questa versatilità della QKD ha creato molto interesse a partire dal periodo post-COVID19, in quanto la sicurezza delle comunicazioni ha assunto un ruolo di estrema rilevanza a causa delle crescenti tensioni internazionali e delle sempre più impattanti attività cybercriminali.

Un altro punto di interesse citato da molte aziende prende spunto dalla necessità di creare sistemi per la trasmissione, la gestione e l'archiviazione dei dati che risultino già sicuri, poiché i dati trafugati oggi potrebbero essere decrittati in futuro. L'orizzonte temporale ipotizzato entro il quale effettuare la sostituzione tecnologica è collocato da molti analisti intorno al 2030, quando i computer quantistici saranno una realtà utilizzabile per violare i sistemi di protezione dati esistenti oggi.

#use case

Focus Europa

Le iniziative europee finalizzate alla creazione di una rete di comunicazione altamente sicura sia a livello terrestre che spaziale, e alla collaborazione tra gli Stati membri per la salvaguardia di dati sensibili attraverso l'utilizzo della fisica quantistica, sono l'**European Quantum Communication Infrastructure - EuroQCI** e l'**Open European Quantum Key Distribution - OpenQKD**.



European Quantum
Communication
Infrastructure - EuroQCI



Open QKD

L'**EuroQCI** è un'iniziativa in cui la Commissione Europea collabora dal 2019 con i 27 Paesi membri e l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) alla progettazione e diffusione di una rete di comunicazione quantistica in fibra ottica, che collega siti strategici a livello nazionale e transfrontaliero, includendo anche una componente spaziale basata sui satelliti ed integrata nel nuovo sistema di comunicazione spaziale sicura IRIS² (Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite).

Il sistema a livello terrestre si avvale di infrastrutture esistenti per creare una rete di comunicazione sicura a livello nazionale. In merito, gli studi di progettazione e definizione dell'architettura dell'EuroQCI vengono effettuati da due consorzi industriali stabiliti dall'Unione europea. È inoltre previsto il coinvolgimento dell'Agenzia Spaziale Europea - ESA nell'ottica di integrare le tecnologie quantistiche negli asset spaziali dell'Unione.

L'**Open European Quantum Key Distribution** è un'iniziativa finanziata dall'Unione europea che coinvolge e riunisce team multidisciplinari provenienti da diversi paesi membri, tra cui Austria, Repubblica Ceca, Francia, Germania, Grecia, Italia, Paesi Bassi, Polonia, Spagna, Svizzera e Regno Unito. OpenQKD ha l'obiettivo di promuovere l'adozione della crittografia quantistica, fungendo da facilitatore e moltiplicatore per le soluzioni tecnologiche avanzate. Grazie alla cooperazione tra università, industria e startup europee vengono realizzati siti di test aperti in tutta Europa, accessibili a soggetti esterni per effettuare prove sul campo. Questa collaborazione aumenterà significativamente la consapevolezza e faciliterà il coinvolgimento con la QKD.

Il **QUID o Quantum Italy Deployment** è la realizzazione a livello italiano dell'EuroQCI, coordinata dall'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica di Torino. Questo progetto si propone di sviluppare nodi in reti di comunicazione quantistica metropolitane - QMANs, collegate tra loro attraverso l'Italian Quantum Backbone, l'infrastruttura basata su fibre ottiche commerciali che copre il territorio italiano distribuendo segnali di tempo e frequenza campione. Tra i vari obiettivi prevale anche l'unione di importanti siti per il collegamento tra la comunicazione in fibra ottica e il segmento spaziale del QCI europeo per sviluppare tecniche innovative legate alla QKD, per l'aumento della frequenza di trasmissione.



Prende avvio
il progetto QUID

La svizzera **ID Quantique**, fondata nel 2001, è stata considerata negli ultimi 20 anni un'azienda pionieristica e uno dei leader mondiali nella commercializzazione di prodotti basati su QKD e di tecnologie legate alla sicurezza quantistica. L'azienda è stata acquisita dal produttore statunitense di tecnologie quantistiche IonQ ad inizio 2025, pur mantenendo al momento una sua autonomia operativa.

ID Quantique si è contraddistinta nel tempo per i suoi prodotti che implementano protocolli per la Quantum Key Distribution, e per quelli che sfruttano i **Quantum Random Number Generators - QRNG** e i **Single-Photon Detectors - SPD**. I QRNG sfruttano i meccanismi probabilistici della meccanica quantistica al fine di generare serie di numeri puramente casuali, sia per protocolli QKD sia per altre applicazioni legate alla sicurezza, alla tokenizzazione e alla simulazione per modelli di statistica avanzata. Questo sistema è intrinsecamente non ricostruibile, al contrario degli Pseudo Random Number Generators - PRNG usati in molte applicazioni oggi. Anche gli SPD sono utilizzati per applicazioni QKD e per tutte quelle attività legate all'ottica ultraprecisa, dall'ottica quantistica alla spettroscopia.

I prodotti di ID Quantique sono stati integrati in reti di telecomunicazione e da fornitori di cloud, nei sistemi utilizzati da banche commerciali e pubbliche, e in sistemi di comunicazione governativi centrali. L'azienda ha sviluppato prodotti basati sul quantum, ad esempio per la trasmissione sicura di dati sensibili (dati interbancari, sanitari, governativi) o per le firme digitali certificate. ID Quantique ha sviluppato un chip QRNG estremamente compatto ed efficiente dal punto di vista energetico per applicazioni legate alla sicurezza delle informazioni, utilizzabile in una grande varietà di contesti applicativi: il *Quantis QRNG Chip*. ID Quantique partecipa attivamente ai progetti europei EuroQCI e OpenQKD, ed ha avuto un ruolo rilevante nella standardizzazione della QKD, attività intrapresa in ambito ETSI e ITU.

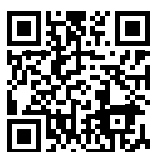


ID Quantique

evolutionQ, fondata nel 2015 in Canada e con una sede di R&D in Germania, lavora sul tema della QKD dal punto di vista dell'implementazione software per la sua integrazione in reti di telecomunicazioni esistenti. evolutionQ quindi non produce hardware QKD ma si è concentrata su tutto ciò che abilita l'uso efficace di quel protocollo, realizzando con tecnologie software proprietarie, piattaforme di integrazione per il monitoraggio dei protocolli di sicurezza quantistica in reti broadband, cloud e per tutte quelle tipologie di rete che necessitano di sicurezza molto elevata.



La *BasejumpQDN - Quantum Delivery Network* di evolutionQ è una piattaforma progettata per controllare e gestire tutta la catena di creazione e distribuzione di chiavi crittografiche. La piattaforma permette di integrare tecnologie e prodotti in ottica multi-vendor e multi-tecnologia per adattarsi all'evoluzione tecnologica e alle esigenze. evolutionQ porta avanti progetti e attività per valutare il grado di esposizione a minacce quantistiche di un ente o un'azienda, chiamato il **Quantum Risk Assessment**. Questa valutazione permette di comprendere e valutare in anticipo quanto siano resilienti le infrastrutture informatiche e le procedure messe in atto per contrastare attacchi complessi, ed in particolare quelli che potrebbero essere realizzati da computer quantistici. evolutionQ ha realizzato progetti con grandi aziende europee di telecomunicazioni e trasporto e partecipa a OpenQKD.



evolution

QuSecure è una società statunitense attiva dal 2019 nello sviluppo e nella progettazione di soluzioni software avanzate per la sicurezza delle comunicazioni con un approccio votato all'implementazione di **Post-Quantum Cryptography - PQC**. I software dell'azienda implementano crittografia post-quantistica QKD in potenzialmente tutte le reti digitali esistenti poiché la piattaforma software è progettata per essere del tutto agnostica rispetto agli hardware utilizzati. Questo approccio permette agli operatori di essere flessibili nella scelta dell'hardware e consente a QuSecure di fornire piattaforme considerate future-proof, in grado di adattarsi a nuovi macchinari. L'azienda sviluppa inoltre soluzioni ibride dove PQC e gestione delle chiavi di crittografia con QKD coesistono in modo dinamico.

QuSecure è stata nominata da Frost & Sullivan *2024 Product Leader in The Global Post Quantum Cryptography Industry* grazie al suo approccio alla sicurezza multilivello. La piattaforma QuProtect™ utilizza algoritmi post-quantistici e Quantum Key Distribution a cui viene aggiunto un livello di *orchestrazione crittografica* che permette di gestire in modo efficiente il passaggio da algoritmi classici a quelli quantum-safe in modalità *hot-swapping*, senza interruzioni di operatività. Il livello di sicurezza raggiunto è particolarmente alto e flessibile nel gestire le minacce, rendendosi così adatto alla protezione di infrastrutture critiche.



QuSecure

KEEQuant è stata fondata a Monaco di Baviera in Germania nel 2020. L'azienda si propone come partner affidabile per le applicazioni di QKD grazie alla sua tecnologia e anche per le modalità di finanziamento che finora sono state adottate. Dati aggiornati al primo semestre 2025 indicano che KEEQuant ha ricevuto esclusivamente fondi dall'Unione europea, senza altri finanziatori esterni: l'azienda si pone quindi come esempio di startup deep tech in un settore dove la sovranità tecnologica europea è strategicamente rilevante.

KEEQuant sviluppa sistemi con tecnologia *standard coherent telecommunication* con dispositivi fotonici integrati, progettati per essere facilmente scalabili. Il focus è su due famiglie di prodotti, una per la QKD per la generazione di chiavi crittografiche per reti a fibre ottiche e la seconda per sistemi di Key Management delle chiavi crittografiche per gli operatori di telecomunicazioni.



KEEQuant

LuxQuanta nasce nel 2021 come spin-off dell'Institute of Photonic Sciences di Barcellona in Spagna. I ricercatori si sono concentrati su quelle che sono le principali sfide legate all'implementazione di tecnologie quantistiche nelle reti di telecomunicazioni europee. Per questo motivo, LuxQuanta si è focalizzata sullo studio e sulla progettazione di sistemi per la Quantum Key Distribution che sfruttano una particolare tecnologia chiamata **Continuous Variable Quantum Key Distribution - CV-QKD**. Tale scelta è stata pensata per rendere i prodotti di LuxQuanta facilmente integrabili con le reti in fibra ottica in Europa, garantendo un'installazione in stile plug-and-play direttamente nelle dorsali esistenti, scalabile e con una buona tolleranza a perdite di segnale e rumore.

NOVA LQ®, il prodotto di punta dell'azienda, sfrutta queste caratteristiche per poter essere installato facilmente in rack dove sono presenti le apparecchiature per la gestione delle reti in fibra ottica, garantendo una copertura di distanze fino a 40km. LuxQuanta ha già all'attivo alcune collaborazioni con aziende telco europee finalizzate alla sperimentazione operativa in contesti reali di servizi QKD per la gestione di trasmissione di dati sensibili, anche su piattaforme cloud.



LuxQuanta

QEYnet intende unire le potenzialità garantite dalla QKD con quelle della New Space Economy. Partendo dal presupposto che i sistemi di crittografia attualmente predominanti potrebbero diventare inefficaci entro un decennio, l'azienda canadese propone una soluzione tecnologica radicale che consiste nel creare una costellazione di satelliti per la distribuzione di chiavi con tecnologia QKD globalmente disponibile. Per raggiungere questo ambizioso obiettivo, QEYnet si sta specializzando nella progettazione e nella realizzazione di terminali quantistici miniaturizzati per la QKD, efficienti dal punto di vista energetico. L'azienda sta studiando e valutando diverse possibilità per la gestione dei sistemi in orbita. Il loro hardware potrà essere montato come payload su satelliti commerciali o altre tipologie di mezzi specifici, anche in ride-share. La soluzione permetterà in futuro di creare una rete satellitare scalabile e potenzialmente in grado di sopperire alla mancanza di infrastrutture terrestri in tutte quelle zone dove non è possibile o economicamente sostenibile realizzarle. QEYnet sta collaborando con enti e centri di ricerca canadesi, come il National Research Council (NRC) of Canada o l'Agenzia Spaziale Canadese per i test dei suoi hardware e per dare il via a progetti pilota.



QEYnet

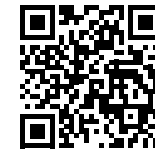
L'australiana **QuintessenceLabs** è riconosciuta come uno degli attori più interessanti nella protezione di dati e di reti di trasmissione dati nella regione Asia - Pacifico. L'azienda sta lavorando per diffondere la consapevolezza presso realtà private e istituzioni di quanto sia fondamentale proteggere fin da ora i dati, per scongiurare sia gli attacchi futuri provenienti da computer quantistici sia per evitare quegli scenari in cui i dati attualmente criptati vengono sottratti oggi per essere decrittati in futuro (il cosiddetto *harvest-now, decrypt-later scenario*). Questo scenario malevolo potrebbe infatti portare a enormi danni e perdite di informazioni su dati sensibili, anche a distanza di anni dal momento in cui i dati sono stati effettivamente trafugati. QuintessenceLabs propone diverse tipologie di Quantum Random Numbers Generators con un approccio *full entropy* e quindi caratterizzati da una generazione di numeri realmente randomica, e di QKD a variabili continue - CV-QKD per creare quella che definiscono *Quantum Resilience*, ossia lo sfruttamento delle tecnologie quantistiche più recenti per realizzare infrastrutture resilienti ad attacchi e manipolazioni presenti e future. L'approccio è definito dall'azienda come *crypto-agility*, in quanto permette di adattarsi in modo molto rapido alle potenziali nuove minacce e al contempo alle richieste dei regolatori governativi. Uno dei prodotti di punta, qProtect, è progettato per sfruttare queste tecnologie per proteggere dati critici e sensibili durante la loro trasmissione e successiva archiviazione crittografata.



QuintessenceLabs

Quantum Industries, basata in Austria, è stata fondata nel 2022 per portare sul mercato una versione della QKD che sfrutta una ricerca premiata con il Nobel per la Fisica sull'entanglement quantistico dei fotoni anche a grande distanza. La soluzione è chiamata **entanglement Quantum Key Distribution - eQKD**. Questa versione di eQKD sfrutta le proprietà intrinseche di una coppia di elettroni entangled fra di loro (polarization-entangled photon pairs) per garantire una QKD efficiente su distanze fino a 350km.

Il team di scienziati e ricercatori di Quantum Industries, è convinta che le minacce insite nel quantum computing siano relativamente prossime temporalmente. Per questo motivo campeggia nella homepage del loro sito web il famoso countdown della Cloud Security Alliance che prevede la nascita di un computer quantistico in grado di abbattere le forme di cifratura oggi in uso entro la data del 14 aprile 2030.



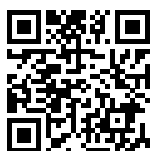
Quantum Industries

Nel settore delle comunicazioni quantum e della QKD il ruolo dell'Europa, delle sue aziende e dei suoi centri di ricerca è particolarmente rilevante, come presentato nel Capitolo 2. All'interno del contesto europeo, proprio nel campo della QKD, l'**Italia** si è ritagliata un ruolo particolarmente interessante per la vivacità del tessuto accademico e imprenditoriale.

Quantum Telecommunications Italy - QTI è stata una pioniera in Italia per la progettazione di soluzioni per la quantum communication ed in particolare per la Quantum Key Distribution. L'azienda è nata come spin-off dell'Istituto Nazionale di Ottica del Consiglio Nazionale delle Ricerche CNR-INO nel 2020. Nel 2021, durante il G20 dedicato alla scienza a Trieste, QTI ha realizzato la prima comunicazione quantistica sicura intergovernativa al mondo che ha coinvolto tre Stati: Italia, Slovenia e Croazia. QTI ha sviluppato una famiglia di dispositivi QKD, chiamata Quell-X, composta da due unità che lavorano insieme (1 unità Alice e 1 Bob, come approfondito nel Capitolo 1) pensata per essere implementata in reti di telecomunicazioni e per applicazioni scientifiche. QTI produce anche dei Quantum Key Management Entity - QKME e delle applicazioni Software Defined Network - SDN per integrare e gestire in modo efficiente la QKD in una rete. QTI punta a fornire famiglie di prodotti integrabili fra loro per realizzare reti sicure con tecnologia QKD in modo scalabile.

**Protegersi oggi
dalle minacce
di domani**

Telsy, l'azienda che si occupa di Cybersecurity e Crittografia di **TIM Enterprise**, è entrata nel capitale di QTI nel 2021. Nel 2024, in collaborazione con **Sparkle**, la società del Gruppo TIM che si occupa di servizi di telecomunicazione internazionale, ha realizzato una Proof of Concept – PoC, per la trasmissione ad alta velocità di dati protetti da QKD su una rete esistente fra due data center di Sparkle ad Atene. Il PoC ha dimostrato la fattibilità e le potenzialità della tecnologia e degli apparati progettati e prodotti da QTI. L'azienda partecipa inoltre al progetto nazionale QUID – Quantum Italy Deployment, e al progetto europeo EuroQCI.



QTI - Quantum
Telecommunications Italy

levelQuantum è una startup italiana che ha brevettato una soluzione proprietaria per una forma evoluta di QKD in grado di superare alcuni punti deboli dell'impostazione oggi utilizzata da molte aziende produttrici di dispositivi per la QKD. Il sistema proposto da levelQuantum può integrare rilevatori quantistici e promette un trasferimento sicuro delle informazioni anche nel caso le componenti hardware fossero compromesse da un qualche tipo di intercettatore.

L'architettura di levelQuantum permette di integrare la tecnologia QKD di nuova generazione direttamente nelle reti in fibra ottica. Le chiavi possono poi essere distribuite sfruttando torri radio e droni in spazio libero (*free-space quantum communication*) per aumentare la copertura, o reti satellitari per raggiungere aree ancora più vaste o lontane fra di loro (QKD satellitare).



levelQuantum

Lo spin-off dell'Università di Padova, **ThinkQuantum** è specializzata nella progettazione e realizzazione di dispositivi QKD a variabili discrete – DV-QKD. L'azienda si è specializzata nella produzione di sistemi hardware QKD facilmente integrabili nelle reti in fibra ottica con dimensione metropolitana e regionale. ThinkQuantum sviluppa anche una famiglia di moduli Quantum Random Number Generator – QRNG per la generazione ultra veloce di sequenze di numeri realmente casuali, sfruttabili per incrementare la sicurezza di molte tipologie di applicazioni IT in ambito aziendale e commerciale. L'azienda propone come punto di forza l'uso di una value chain europea e il suo radicamento in Italia.



ThinkQuantum

Random Power è una startup italiana specializzata nella progettazione di QRNG. L'azienda sfrutta processi quantistici, in particolare il rumore ottico o quello elettronico, per superare i limiti dei generatori pseudo-casuali oggi molto usati in ambito IT per la protezione delle comunicazioni. Random Power ha sviluppato una gamma di QRNG eterogenea che comprende dispositivi hardware molto compatti e plug-and-play via USB, un modulo per rack inseribile nei server e data center esistenti e un chip facilmente integrabile in sistemi considerati security-critical.



Random Power

Applicazioni future

In prospettiva futura, le tecnologie quantistiche saranno utilizzate in svariati campi riguardanti le comunicazioni, oltre a quelli citati precedentemente e legati alla sicurezza e alla crittografia.

Particolarmente interessante risulta lo sfruttamento di protocolli di **teletrasporto quantistico** per la realizzazione di una **rete internet quantistica** caratterizzata da velocità e sicurezza molto più elevate di quelle ottenibili oggi.

Questa forma di "teletrasporto" non prevede che avvenga un trasporto di materia da un punto ad un altro, ma solo delle informazioni relative ad un sistema quantistico.

Teletrasportare le proprietà delle particelle

Quando si parla di **quantum internet** l'idea è quella di realizzare non solo delle reti in grado di trasmettere dati in modo più veloce e sicuro di quelle attuali, ma anche di reti in grado di gestire e trasportare in modo efficace informazioni quantistiche: questo tipo di tecnologia è quindi da considerare abilitante per quelle che saranno le reti quantistiche del futuro utilizzate per connettere infrastrutture quantistiche per la trasmissione dati, per la sensoristica quantistica e anche per attività legate al distributed quantum computing.

Gli studi per sfruttare l'entanglement fra particelle per la trasmissione ultraveloce e ultrasicura delle informazioni a lunga distanza sono in corso da tempo. Un esperimento dell'Agenzia Spaziale Europea del

2012 confermò la possibilità di teletrasportare alcune proprietà di particelle con entanglement come spin o polarizzazione. Nel test questo risultato venne ottenuto su una distanza di 143 km fra il telescopio Jacobus Kapteyn Telescope sull'isola La Palma e l'Optical Ground Station dell'ESA sull'isola di Tenerife.

Tra il 2012 ed oggi, svariati gruppi di ricerca hanno dimostrato la fattibilità del teletrasporto di informazioni quantistiche fra punti sempre più lontani fra di loro e con metodologie diverse, anche sfruttando le reti in fibra ottica ad alta velocità già disponibili.

Ad inizio 2025, per la prima volta a livello mondiale, un gruppo di ricercatori dell'Università di Oxford è riuscita nell'impresa di realizzare una dimostrazione del teletrasporto quantistico di porte logiche, ossia le componenti unitarie mediante le quali è possibile descrivere un algoritmo. L'entanglement fra i fotoni presenti in due computer quantistici distanti fra loro due metri ha permesso di teletrasportare dal punto di vista quantistico un algoritmo e far lavorare insieme le due macchine. I dati sono stati "teletrasportati" con una fedeltà di circa l'86%. Questo esperimento può essere considerato come un'importante tappa nella realizzazione di cluster di computer quantistici che saranno in grado di lavorare insieme, seppur a distanza, mediante il **distributed quantum computing**. Inoltre, la stessa tecnologia potrà essere applicata per realizzare reti per l'internet quantistico.



*Paving the way
to quantum
supercomputers*

Gli esperimenti su reti reali hanno messo in evidenza il crescente ruolo dei **ripetitori quantistici** e dei device che estendono la portata dei segnali quantistici. In concreto, questi ripetitori avranno nelle future reti quantistiche lo stesso ruolo che oggi hanno i ripetitori di segnale per le reti radio o per i canali a fibra ottica in uso. La tecnologia dei ripetitori quantistici è ancora in una fase di sviluppo perlopiù teorica o prototipale.

In Germania, il progetto **Quantenrepeater. Net - QR.N**, finanziato con 20 milioni di euro dal Ministero federale della Ricerca, della Tecnologia e dello Spazio (Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt) sta indagando quali siano le migliori tecnologie e i migliori approcci per la realizzazione e l'implementazione pratica di quantum repeaters nelle reti di comunicazione oggi esistenti e, in ottica futura, in quelle di nuova generazione. Il progetto è capitanato dall'Università del Saarland e coinvolge buona parte del mondo accademico tedesco che lavora in questo settore.



*Quantenrepeater.Net -
QR.N*

Qnnect ha lavorato per realizzare una prima generazione affidabile di quantum repeaters. L'azienda mira a diventare un provider di tecnologie per rendere scalabile la rete di comunicazione quantistica dell'immediato futuro. Qnnect propone una serie di prodotti progettati per implementare la quantum communication su reti esistenti, in particolare quelle a fibre ottiche. La tecnologia dell'azienda è inoltre pensata per essere usata anche nei settori del quantum sensing e del quantum computing.



Qnnect

La canadese **Photonic** sta progettando hardware con diverse proprietà sia legate alla comunicazione quantistica sia al quantum computing. L'azienda sta implementando una nuova architettura *silicon spin-photon interface* per creare dei veri e propri nodi di rete, utilizzabili per comunicazioni quantistiche e per calcolo quantistico distribuito, anche in collaborazione con grandi gruppi del cloud computing come Microsoft.



Photonic

Un'altra Azienda canadese, **Quantum Bridge**, sta testando una tecnologia che potrebbe rendere i quantum repeaters più affidabili per le reti di telecomunicazioni e più semplici da integrare rispetto a quelli in progetto da parte di molte aziende concorrenti. Quantum Bridge sta progettando un all-photonic quantum repeater che non contiene quantum memories in modo da ridurre i costi e semplificare la struttura del repeater. Il prodotto dovrebbe permettere in futuro di superare distanze molto importanti senza perdite rilevanti di segnale quantistico.



Quantum Bridge

È probabile che nell'immediato futuro emergeranno prodotti ibridi in grado di combinare il teletrasporto quantistico con le tecnologie e le reti già disponibili, al fine di gestire la fase di transizione fra una tecnologia e l'altra. L'interesse verso l'internet quantistico è considerevole. Fra i vantaggi più immediati emergono la velocità e la sicurezza di trasmissione, alle quali potrebbero aggiungersi anche una miglior **efficienza energetica**. Infatti, questa tecnologia potrebbe abilitare la possibilità di realizzare reti di trasmissione dati meno impattanti dal punto di vista energetico, soprattutto sulle lunghe distanze.

3.3 Quantum Computing

Fra le tecnologie quantistiche odierne, il quantum computing è quella probabilmente più conosciuta a livello mediatico. Nel Capitolo 1 sono state presentate alcune delle caratteristiche fondanti di questa tecnologia. L'attenzione, gli investimenti e i programmi dedicati alla realizzazione di computer quantistici sono in crescita ovunque nel mondo. Oltre all'analisi sui cluster, gli ecosistemi e sulle loro caratteristiche, presentati nel Capitolo 2, è interessante chiarire la motivazione principale alla base di tale hype industriale e scientifico: i computer quantistici promettono nell'immediato futuro di rivoluzionare l'elaborazione dei dati con una capacità, una velocità e un'efficienza energetica nettamente superiori rispetto ai sistemi di High-Performance Computing disponibili oggi. La **grande capacità di elaborazione dati** permetterà di analizzare enormi quantità di informazioni e di effettuare simulazioni più complesse con ricadute scientifiche e industriali potenzialmente dirompenti (tema analizzato nel Capitolo 4).

La realizzazione di macchine quantistiche prevede la scrittura di **software appositi** e, in alcuni casi, la concezione di **nuovi linguaggi di programmazione**. Molte aziende, sia di grande sia di piccola dimensione, stanno lavorando alacremente su questo aspetto, proponendo approcci molto diversi fra di loro, che spaziano dalla realizzazione di piattaforme proprietarie all'uso di linguaggi di programmazione molto conosciuti e diffusi come Python. Il grande limite da questo punto di vista risiede nella mancanza di standardizzazione dovuta alla fase ancora prototipale in cui si trova il quantum computing. L'approfondimento sui software è presentato nel Capitolo 4. Nello stesso capitolo sarà trattato in dettaglio anche l'accesso alle macchine quantistiche via cloud.

Riguardo al tema della **sostenibilità**, sempre più rilevante nel contesto economico attuale, i computer quantistici potrebbero giocare un ruolo rilevante, incidendo in maniera positiva sul dispendio di risorse critiche come energia e acqua, le quali vengono consumate in abbondanza dai data center classici, dedicati al cloud computing e all'intelligenza artificiale.

Secondo un report del MIT Technology Review pubblicato nel maggio 2025 i consumi di questi centri per il supercalcolo hanno superato nel 2024 la soglia di 200 terawatt-ora di elettricità, pari a quanto consumato da un intero paese come la Thailandia con 72 milioni di abitanti. Pur non prendendo ancora in considerazione il quantum computing tra le potenziali soluzioni, è comunque presumibile ritenere che la seconda rivoluzione quantistica in atto possa giocare un ruolo importante nella riduzione della CO₂ emessa dalle applicazioni che necessitano di molta potenza computazionale.



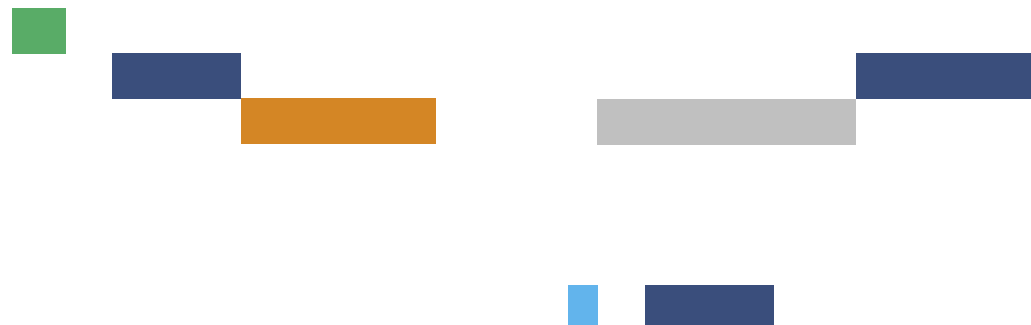
We did the math on AI's energy footprint. Here's the story you haven't heard

Il momento in cui un computer quantistico sarà in grado di risolvere un problema intrattabile per un computer classico è generalmente indicato come **quantum advantage**.

Molte grandi aziende e gruppi di ricerca lavorano da anni in questa direzione. Nel 2019, una prima dimostrazione teorica di questo potenziale vantaggio computazionale è stata ottenuta durante un test sul processore quantistico *Sycamore* di Google. *Sycamore*, in quel caso specifico e definito senza una reale utilità applicativa, riuscì a computare il risultato in modo estremamente più rapido (nell'ordine di un miliardo di volte) del sistema *Summit* di IBM, il supercomputer all'epoca più veloce al mondo. Google dichiarò quindi di aver raggiunto la cosiddetta **quantum supremacy**. A differenza di un più compiuto quantum advantage, la quantum supremacy attesta solamente il primato di un computer quantistico su uno tradizionale nella risoluzione di un singolo compito.



Quantum supremacy using a programmable superconducting processor



#use case

Quantum Supremacy

La **supremazia quantistica** definita da John Preskill, un fisico teorico del California Institute of Technology, è il punto in cui un computer quantistico raggiunge la capacità di risolvere un compito, utile o meno, che un computer tradizionale non è in grado di svolgere in un arco di tempo ragionevole. Tale traguardo ha lo scopo di dimostrare, unicamente e in modo empirico, un vantaggio concreto nella capacità di calcolo.



#video

*Quantum Computing
con Simone Severini
(Amazon Web Services)*

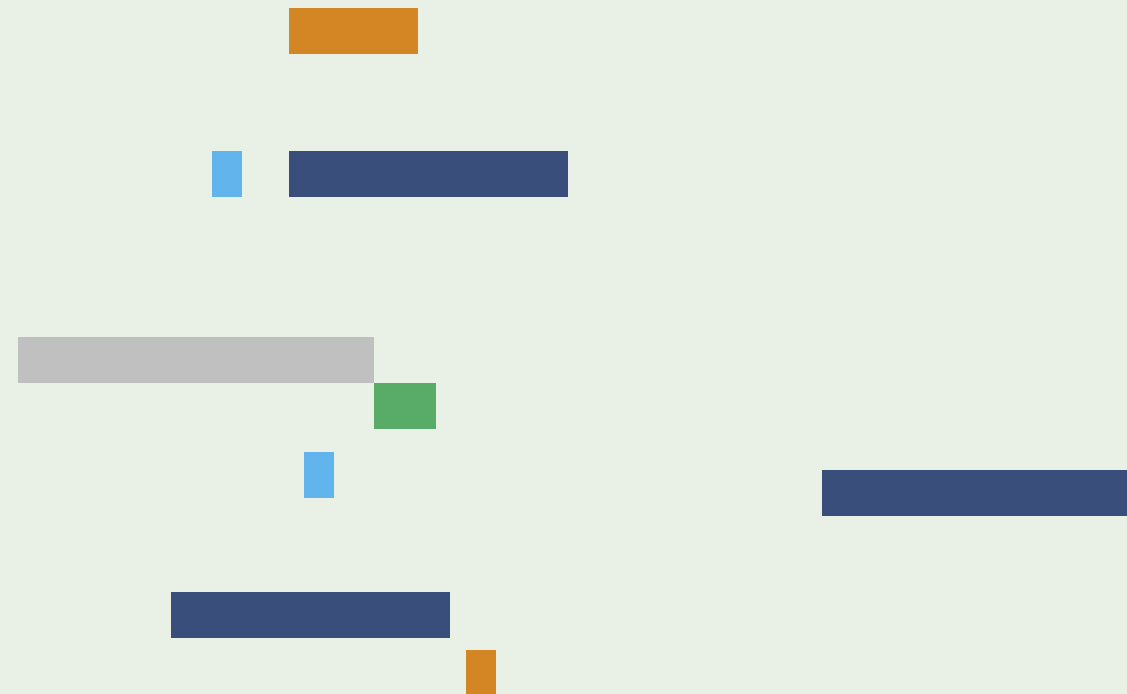
Nel caso del test realizzato da Google nel 2019 si è trattato di una simulazione di circuiti quantistici casuali eseguita in due minuti e trenta secondi, per la quale era stato ipotizzato che Summit avrebbe impiegato millenni a portare a termine. Successivamente, IBM ha ridimensionato l'affermazione di Google, affermando che grazie ad algoritmi migliorati un supercomputer tradizionale sarebbe in grado di completare la medesima simulazione in un intervallo di giorni. Questo episodio ha mostrato che la supremazia quantistica non è solo una questione teorica, ma una sfida tecnologica concreta e competitiva. Anche la comunità scientifica a partire da quell'esperimento ha dato il via a molteplici dibattiti per chiarire il punto. Come sottolineato da esperti del settore, Google ha probabilmente usato la locuzione supremazia quantistica anche per questione di marketing.



#video

*Quantum supremacy:
A three minute guide*

Il traguardo del quantum advantage rappresenterà un momento di svolta geopolitico e industriale. I governi hanno iniziato ad investire massivamente nell'ultimo quinquennio. Gli Stati Uniti hanno lanciato la National Quantum Initiative, la Cina ha stanziato la Quantum Science Initiative e l'Unione europea ha avviato il programma Quantum Flagship. Tutte iniziative con lo scopo di ampliare le proprie capacità scientifiche e di favorire il progresso industriale. Dall'altro lato, anche nel campo privato c'è notevole competizione, in cui le grandi Big Tech, come Google, IBM e Microsoft stanno accelerando gli investimenti, facendo della tecnologia quantistica una delle sfide più promettenti del XXI secolo. Questa vera e propria corsa al vantaggio quantistico evidenzia quanto questa tecnologia abbia un grande margine di sviluppo e quanto siano alte le aspettative. La tecnologia quantistica come elemento strategico per investimenti pubblici governativi e privati è approfondita nel Capitolo 2.



Dal punto di vista dell'implementazione della tecnologia, i computer quantistici devono ancora oggi risolvere il grande problema della **correzione errori**, al fine di rendere sempre attendibile il risultato del calcolo.

Molti computer quantistici producono allo stato attuale tassi di errore di circa 10^{-3} (ovvero, 1 errore ogni 1.000 operazioni per unità di tempo). Oltre al limite della correzione errori, queste macchine scontano anche una difficoltà di realizzazione legata alla possibilità di fabbricare qubit affidabili, software di controllo e infrastruttura hardware necessarie al funzionamento della macchina stessa. Il passaggio fondamentale che porta da una dimostrazione di laboratorio verso un vantaggio concreto è rappresentato da una riduzione del cosiddetto **tasso di errore fisico per operazione**: la soglia di correzione dovrebbe essere inferiore a 10^{-4} (ovvero, 1 errore ogni 10.000 operazioni quantistiche).

Ridurre il tasso di errore per arrivare al Quantum Advantage

Al momento della scrittura di questo report il processo è ancora in atto e, per quanto esistano delle tecnologie prevalenti, sarà necessario del tempo per arrivare a standard condivisi per la realizzazione di computer quantistici realmente utilizzabili e integrabili con le infrastrutture tecnologiche esistenti. Le opinioni su quando e come questi tassi di errore saranno corretti sono varie. In linea di massima, si prevede che questa soglia sarà raggiunta intorno al 2030. Infatti, molti studiosi sono allineati alla stima esposta in uno studio del 2019 del National Academies of Sciences degli

Stati Uniti in cui si prevedeva un tempo di circa 10 anni. Altri ricercatori prevedono un impatto notevole da parte di questi elaboratori anche prima del raggiungimento di questa soglia, ma da questo punto di vista il dibattito è aperto.

Al momento attuale si può affermare che le sperimentazioni degli ultimi anni, e in particolare dal 2019, hanno dimostrato che il vantaggio dei computer quantistici non è solo potenziale ma reale. È tuttavia ancora prematuro affermare che questa tecnologia sia matura o pronta per la commercializzazione. Per rendere realmente implementabile un computer quantistico rimane quindi necessario sia ridurre il tasso di errore fisico per operazione, sia incrementare il numero dei qubit utilizzabili. Superare quella che viene definita la **soglia fault-tolerant** di questi due parametri, sopra la quale i risultati non sono ritenuti affidabili, rimane l'ostacolo più importante per far sì che il quantum computing rivoluzioni realmente i settori industriali e scientifici in cui potrà essere impiegato.

Nel settore del quantum computing è sempre più citato il concetto di **MegaQuops** (a million quantum operations), vale a dire la possibilità di effettuare un milione di operazioni quantistiche affidabili prima che gli errori rendano il sistema inattendibile. Il **quops - quantum operations** è l'equivalente quantistico del **flops - floating point operations per second** in ambito classico.

La soglia di un milione di operazioni quantistiche è ritenuta da molte aziende il punto di svolta per implementare algoritmi che abbiano un impatto reale nella risoluzione di alcuni problemi pratici che i supercomputer odierni faticano a indirizzare, ad esempio a causa dei tempi di elaborazione troppo lunghi.

Spesso vengono citati come primi esempi lo studio del folding delle proteine nella ricerca biomedica, la scoperta di nuovi materiali mai teorizzati precedentemente, l'ottimizzazione o l'evoluzione di sistemi complessi in campo scientifico o industriale.

Verso il traguardo del MegaQuop

Tecnologia di ingegnerizzazione dei qubit	Scalabilità	Velocità di esecuzione	Tempo di coerenza
Superconduttori	+++	+++	+
Ioni intrappolati	+	++	+++
Fotonici	++	++	+++
Atomi neutri	+++	++	++
Spin in silicio	++	++	+
Topologici	+++	+	+++
Nitrogen-Vacancy Center	+	+	++

Scalabilità = capacità di una tecnologia quantistica di aumentare il numero di elementi quantistici (qubit o sensori) senza compromettere la stabilità e le prestazioni complessive del sistema, garantendo la fattibilità tecnica ed economica del processo.

Velocità di esecuzione = velocità con cui un sistema quantistico può completare operazioni quantistiche, determinata dal numero di operazioni logiche quantistiche eseguibili nell'unità di tempo.

Il raggiungimento del MegaQuop è spesso annunciato nella roadmap sullo sviluppo delle tecnologie quantistiche presentato da grandi gruppi o da startup. La maggior parte delle aziende ipotizza come realistico il raggiungimento di questo traguardo entro il 2030 o comunque entro i primi anni del prossimo decennio. L'importanza del superamento di questa soglia giustifica ingenti investimenti da parte di governi e grandi player industriali a livello internazionale.

Gli approcci ingegneristici per la realizzazione dei chip quantistici si differenziano a seconda della scalabilità, della velocità di esecuzione e tempo di coerenza.

Tempo di coerenza = intervallo di tempo durante il quale uno stato quantistico mantiene le sue proprietà quantistiche (superposizione ed entanglement) prima che la decoerenza ne comprometta l'informazione, rappresentando dunque il limite temporale entro cui il sistema può eseguire operazioni affidabili.

Qubit superconduttori

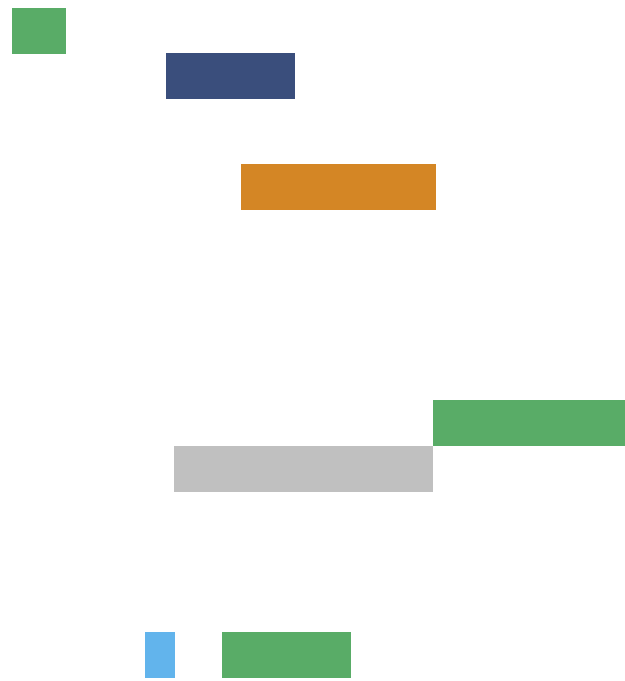
La tecnologia a **qubit superconduttori** opera a temperature estremamente basse, vicine allo zero assoluto. Questa tecnologia è considerata oggi quella più scalabile dal punto di vista industriale grazie ad alcuni punti di contatto con le tecnologie sviluppate negli ultimi decenni per l'elettronica non quantistica sui circuiti a stato solido. Per questo motivo è la piattaforma tecnologica scelta da molte grandi aziende e alcune startup per realizzare processori quantistici scalabili grazie all'esperienza maturata nei circuiti elettronici a stato solido.

IBM si è ritagliata da subito un ruolo da pioniera nello studio e nello sviluppo del quantum computing con tecnologia superconduttiva. IBM sta realizzando un vero e proprio ecosistema legato al computer quantistico che integra l'hardware, il software e la componente cloud. Dal 2020 ad oggi il colosso dell'informatica ha progettato e realizzato una serie di processori quantistici sempre più performanti, e accessibili a ricercatori e sviluppatori attraverso un cloud IBM (già disponibile dal 2016). A partire da luglio 2025, il sistema ha cambiato piattaforma, passando all'ultima versione hardware e software disponibile. I chip IBM si sono succeduti velocemente negli ultimi 5 anni. Nel 2024, è stato lanciato il chip *Heron* a 156 qubits in grado di gestire 5,000 gates (operazioni logiche) a due qubit. Dalle informazioni pubblicate da IBM, il nuovo processore ha elevato molto le capacità di calcolo rispetto alla generazione precedente. Il nuovo sistema è perfettamente integrato con l'ambiente di sviluppo software *Qiskit* progettato per rendere agevole la scrittura e l'esecuzione di software quantistico a fini scientifici e applicativi. L'attenzione dell'azienda si concentra oggi sulla correzione di errori. IBM è considerata

la leader industriale nel settore dei sistemi quantistici, nella loro commercializzazione grazie all'accesso via cloud e nella loro promozione: IBM continua a stringere accordi e promuovere l'installazione dei propri sistemi quantistici presso enti pubblici, di ricerca e presso aziende private a livello globale. La roadmap di IBM prevede la realizzazione di sistemi quantistici operativi e funzionali per svariate applicazioni entro il 2030.



IBM Quantum is building a large-scale, fault tolerant quantum computer



Google rappresenta un altro player di fondamentale importanza a livello globale per lo sviluppo di processori quantistici di nuova generazione. Nel 2019, il processore *Sycamore* a 53 qubit ha permesso alla società di annunciare il raggiungimento della *supremazia quantistica*. Da quel momento, l'azienda si è concentrata sullo sviluppo di generazioni successive di processori e sulla riduzione degli errori. Nel 2023, Google ha dimostrato il concetto di *quantum error correction* secondo cui è possibile ridurre gli errori del sistema aumentando il numero di qubits disponibili: questo risultato è stato ottenuto grazie al processore *Willow* a 105 qubits utilizzabili. Nella documentazione tecnica che descrive le capacità del processore Willow, viene affermato "Estimated time on Willow vs. classical supercomputer" è pari a "5 minutes vs. 10²⁵ years" per l'esecuzione di uno specifico algoritmo.



#video
Demonstrating Quantum Error Correction

Google sta portando avanti un approccio olistico alla ricerca sul quantum computing, indagando varie tipologie di tecnologia e una forte integrazione con la componente software necessaria per la compilazione e l'esecuzione di software quantistici. Google ha reso disponibile *Cirq*, una libreria open source in Python per la programmazione di computer quantistici. Inoltre, Google sta investendo in altre tecnologie e in aziende per la produzione di chip quantistici. In particolare, nel 2024, ha investito in QuEra, specializzata nella ricerca e sviluppo di chip quantistici ad atomi neutri. Nel breve periodo, ossia entro la fine di questo decennio, Google mira a realizzare dei veri e

propri data center quantistici per proporre ai suoi clienti e alla ricerca scientifica una potenza di calcolo di enorme portata per applicazioni legate alla fisica dei materiali, alla ricerca e alla simulazione biomedica, alla gestione di big data per l'ambito finanziario e per tutte quelle attività che potrebbero trarre un vantaggio da questa enorme potenza di calcolo.



Explore Google Quantum AI

Fondata nel 2013 in California, **Rigetti Technologies** è stata una delle prime startup che si sono concentrate sulla realizzazione di un computer quantistico con qubit superconduttivi e il relativo software per la gestione della macchina. Rigetti ha realizzato uno stabilimento per la produzione in serie dei chip quantistici, il primo del settore, chiamato *Fab-1*. In questo stabilimento viene prodotta la Quantum Processing Unit a 9-qubit *Novera™*, commercializzata nel 2024 a partire da 900 mila dollari. A fine 2024 è stato presentato il processore *Ankaa-3* a 82 qubit. I computer quantistici di Rigetti sono disponibili attraverso una piattaforma di cloud proprietaria e anche attraverso altre piattaforme cloud business. Rigetti sta lavorando per ridurre la soglia di errore dei suoi processori e il numero di qubit disponibili, con nuove release previste entro fra la fine del 2025 e il primo semestre 2026. L'azienda è una delle poche al mondo ad avere una vera e propria capacità *full-stack*, integrando la progettazione e la realizzazione delle piattaforme hardware, software, linguaggi di programmazione e cloud. Rigetti ha sviluppato un quantum instruction language chiamato *Quil*, delle API

per facilitare l'integrazione con altri software e piattaforme, creando un ecosistema hardware e software integrato e scalabile. Questo approccio è pensato anche in ottica futura, per fornire alle aziende e ai centri di ricerca che oggi accedono alla tecnologia quantistica delle risorse future-proof.



[Rigetti Computing](#)

In Europa, il leader di questo tipo di tecnologia è **IQM Quantum Computers**. L'azienda finlandese, fondata nel 2018, ha realizzato due famiglie di quantum computer che sta già commercializzando a livello globale. IQM sviluppa tutte le componenti facenti parte di un computer quantistico per fornire tutta l'infrastruttura chiavi in mano ai clienti, con un approccio on-premises. A ottobre 2025, IQM ha raccolto finanziamenti per un totale di 592,18 milioni di dollari.

L'azienda ha costruito in Finlandia l'unica fabbrica di chip quantistici end-to-end in Europa e ne ha annunciata una seconda nel 2024 in Francia per aumentare la sua capacità produttiva. Nello stesso stabilimento vengono realizzati e assemblati fino a 20 computer quantistici all'anno. Oltre ai computer, IQM propone anche servizi di quantum computing via cloud, anche grazie ad un Quantum Data Center a Monaco in Germania realizzato per lo scopo.

IQM propone una roadmap simile a quella degli altri produttori, prevedendo di raggiungere il quantum advantage entro il 2030, per poi arrivare alla realizzazione di computer quantistici fault tolerant con 1 milione di qubits. Oggi l'azienda ha una strategia molto precisa di proposte commerciali. La prima con la macchina

quantistica *Spark* propone una potenza di calcolo di 5 qubit. Spark è pensato prevalentemente per centri di ricerca e università. Il primo computer quantistico commerciale italiano, inaugurato a maggio 2025 da Politecnico di Torino, Fondazione LINKS e INRiM a Torino è un elaboratore di questo modello. La seconda famiglia, ad alte prestazioni, è chiamata *Radiance*: i computer di questa categoria possono contare su 20 qubit aumentabili a 54, e nel prossimo futuro espandibili a 150.



[IQM Quantum Computers](#)

Un altro attore rilevante a livello europeo è **Oxford Quantum Circuits - OQC**. La startup inglese ha ingegnerizzato una nuova tipologia di chip quantistico che si sviluppa in tre dimensioni. Il chip *Coaxmon* ha una struttura pensata per mantenere alta l'affidabilità dei qubit e al contempo migliorare la scalabilità del sistema, pur mantenendo una notevole semplicità strutturale. Il Coaxmon è alla base del computer quantistico dedicato alle aziende *Toshiko Gen 1*, con una potenza di calcolo di 32 qubit. OQC ricalca l'offerta commerciale di molti produttori di macchine quantistiche, vendendo sia potenza di calcolo via cloud, con un approccio commerciale di *Quantum Computing as a Service*, sia direttamente la macchina quantistica.

OQC vede come occasione di sviluppo nei prossimi anni la realizzazione di macchine ibride, dove la componente quantum va a complementare quella classica di un supercomputer per l'High Performance Computing, con un approccio definito come *quantum colocation*. L'azienda ha ricevuto

un importante finanziamento di Serie B nel 2023 considerando il contesto europeo, per un totale di 100 milioni di dollari, per finanziare la sua crescita dal punto di vista della ricerca e della capacità produttiva.



[Oxford Quantum Circuits](#)

SeeQC è una startup statunitense che sta lavorando ad un approccio ibrido nella realizzazione di chip quantistici. SeeQC ha brevettato una tecnologia chiamata *Single Flux Quantum (SFQuClass) processors* per la produzione di System-on-a-Chip quantistici. Questo approccio tecnologico permette di integrare sia i qubit sia i circuiti necessari per gestirli, semplificando notevolmente la struttura criogenica necessaria alla gestione termica della macchina. Viene semplificato enormemente anche il sistema per la gestione di input e output delle informazioni. Il risultato dovrebbe tradursi in una netta riduzione dei costi di realizzazione, secondo alcune stime fino al 97%, e dei consumi energetici.

SeeQC ha costruito una fonderia per la realizzazione dei suoi chip quantistici customizzati secondo le indicazioni dei suoi clienti. La fonderia interna permette di controllare tutta la supply chain per garantire la qualità della produzione e non dipendere da fornitori esterni. La piattaforma hardware + software di SeeQC si presta bene per essere integrata in computer ibridi a supporto di supercomputer classici e per realizzare application-specific integrated circuit in ambito industriale o nel settore della ricerca. SeeQC ha attivato collaborazioni con laboratori nel Regno Unito e in Italia, dove nel 2023 ha dimostrato la capacità

di costruire un computer quantistico full-stack nei suoi laboratori di Napoli.



[SeeQC](#)

La canadese **D-Wave Systems** ha invece intrapreso un percorso diverso, abbracciando un tipo di computazione quantistica non universale, ma orientata alla risoluzione di problemi di ottimizzazione, chiamato calcolo adiabatico. D-Wave propone sul mercato *Advantage2*, un cosiddetto Quantum Annealer, ossia un particolare tipo di computer quantistico che sfrutta il fenomeno di Quantum Annealing, una strategia quantistica per risolvere velocemente problemi complessi cercando la soluzione migliore tra numerose opzioni. La quantum processing unit in questione contiene oltre 4400 qubit superconduttivi ed è accessibile anche attraverso un servizio di cloud dedicato. D-Wave è stata fra le prime aziende ad annunciare la *quantum supremacy* della sua macchina quantistica nella risoluzione di un problema di calcolo reale ad inizio 2025.



[D-wave Systems](#)

La tecnologia a qubit superconduttori è in via di sviluppo anche da parte di altri attori tecnologici in Asia, dove Giappone e Cina stanno portando avanti diverse attività sia a livello di ricerca sia a livello industriale.

Qubit a ioni intrappolati

Un'altra tipologia di qubit è costituita da **ioni intrappolati** in campi elettromagnetici e manipolati attraverso laser ad alta precisione. Tali qubit sono in genere apprezzati per la loro uniformità dovuta all'uso di atomi dello stesso elemento. Questa caratteristica rende queste macchine particolarmente affidabili. Tuttavia, l'uso di laser rende complessa la loro realizzabilità e scalabilità su grandi dimensioni. Questo approccio comporta velocità inferiori rispetto ad altri tipi di quantum computer, come quelli basati sui superconduttori.

IonQ sviluppa calcolatori quantistici in vuoto ultra-spinto, controllati da impulsi laser ad altissima precisione. La piattaforma hardware risulta essere molto performante in termini di stabilità e accuratezza, con tempi di coerenza alti e con una fedeltà prossima al 100 %. Nel 2024 l'azienda ha annunciato di aver superato le *three 9's*, quindi con una soglia del 99,9 % di fedeltà nei gate a due qubit su un prototipo di processore quantistico di nuova generazione a ioni di bario. Per IonQ questo è un passo fondamentale per la gestione dell'errore fisico sotto la barriera fault-tolerant.

L'azienda adotta una metrica interna per la valutazione della potenza di calcolo delle sue macchine chiamata Algorithmic Qubits – AQ che fonde diversi parametri, inclusi i qubit fisici. Con questa catalogazione, il processore di punta di IonQ raggiunge oggi gli AQ 35. Entro l'inizio 2026, dovrebbe essere resa disponibile una nuova versione con AQ 64: secondo l'azienda, il nuovo processore *IonQ Tempo* avrà prestazioni tali da garantire un *commercial advantage* per alcune tipologie di applicazioni.



IonQ

Dall'unione di Honeywell Quantum Solutions e Cambridge Quantum, nel 2021 è nata **Quantinuum**. L'azienda rappresenta una delle più grandi realtà mondiali nella progettazione e nel calcolo a ioni intrappolati. Quantinuum ha sedi negli USA, in UK, Germania e Giappone, grazie a cui integra tutta la supply chain, dalla progettazione dei chip quantistici, alla produzione dell'elettronica e della refrigerazione necessarie alla macchina quantistica. Quantinuum produce una famiglia di computer quantistici, la H-Series. La nuova generazione H2, rilasciata in commercio nel 2024, raggiunge una fedeltà a due qubit superiore al 99,7 %. L'azienda lavora anche all'integrazione dei computer quantistici in supercomputer classici.

Nel 2025 Quantinuum ha implementato una soluzione ibrida nel computer quantistico installato a complemento del supercomputer classico del centro di ricerca giapponese RIKEN. La macchina ibrida sarà utilizzata per applicazioni ad alta complessità, in particolare nel settore dell'energia. Quantinuum commercializza altri prodotti quantistici, fra cui un generatore quantistico di numeri casuali *Quantum Origin* e una piattaforma software per la simulazione avanzata di composti chimici e della fisica dei materiali.



Quantinuum

Universal quantum è uno spin-off dell'Università del Sussex che ha sviluppato una piattaforma modulare a ioni intrappolati con tecnologia proprietaria progettata per la scalabilità verso i milioni di qubit. La particolare costruzione riduce la complessità di cablaggio e semplifica l'architettura generale, sempre in ottica di favorire la scalabilità. Universal quantum ha dato il via ad una collaborazione con l'Agenzia aerospaziale tedesca – DLR vincendo un bando da 67 milioni di euro per la realizzazione di due computer quantistici di nuova generazione nella sede DLR di Amburgo. Il primo computer sarà un dimostratore single-chip con l'intera logica quantistica integrata, mentre il secondo adotterà un'architettura multi-chip modulare, con a disposizione fino a 100 qubit. I due sistemi sono caratterizzati da alta affidabilità, bassi consumi e un'architettura criogenica semplificata. Grazie alla loro collocazione nello stesso sito, saranno utilizzati dai ricercatori e dalle aziende per attività di comparazione e test fra le due tecnologie quantistiche.



Universal Quantum

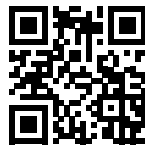
Qubit fotonici

L'approccio **fotonico** presuppone l'uso di qubit con chip in grado di manipolare e gestire singoli fotoni. I fotoni hanno il vantaggio di avere un **tempo di coerenza** molto alto entro il quale si mantengono le proprietà quantistiche, rendendoli ideali sia per realizzare qubit, sia per trasportare informazioni a lunga distanza. L'evoluzione in questo particolare settore sta progredendo in modo veloce, permettendo di avere accesso a sorgenti di fotoni sempre più performanti e a sistemi integrati su chip.

PsiQuantum ha una missione molto chiara, "To build and deploy the first useful quantum computers.". PsiQuantum sta lavorando sulle componenti hardware e software per la realizzazione di computer quantistici fault-tolerant e con un milione di qubit logici. L'azienda insiste molto sul concetto di *useful quantum computers*, poiché ritiene che i computer quantistici con un reale impatto saranno quelli realizzabili e utilizzabili facilmente. Per questo motivo l'azienda sta sviluppando una serie di tecnologie e degli impianti di produzione per circuiti fotonici su silicio. Per lo stesso motivo il linguaggio di programmazione per gli algoritmi è Python, conosciuto a livello globale da anni. La visione di PsiQuantum ha convinto gli investitori, che finora hanno investito nell'azienda circa 1.3 miliardi di dollari.

Ad inizio 2025, PsiQuantum ha annunciato il processore *Omega*, un chipset quantistico

fotonico progettato per essere prodotto in massa. Il chipset sarà gestito da un'unità criogenica di nuova generazione con un form factor cubico, caratterizzata da una maggiore efficienza energetica e semplicità. L'azienda sta costruendo due data center per testare le capacità di questa soluzione tecnologica, uno negli Stati Uniti e uno in Australia.



PsiQuantum

Xanadu è stata fondata in Canada nel 2016 per sviluppare computer quantistici basati su fotoni. La tecnologia proprietaria di Xanadu sfrutta stati di luce compressa, noti come *squeezed states*. L'azienda ha portato avanti una serie di test dal 2022 per dimostrare la bontà della sua tecnologia quantistica rispetto a sistemi di High Performance Computing classici. Xanadu sta industrializzando un computer quantistico di 12 qubit a tecnologia fotonica: *Aurora*. Il sistema è progettato per operare a temperatura ambiente, con un'architettura modulare, facilmente espandibile e integrabile con sistemi di supercomputing già esistenti. Xanadu lavora anche sulla componente software dei suoi sistemi quantistici: ha sviluppato una libreria open-source per la scrittura, il test e lo sviluppo di algoritmi ibridi quantistico-classici chiamata *Pennylane*.



#video
Introducing Aurora:
First modular, scalable
and networked quantum
computer

Quandela è un'azienda francese che ha sviluppato una piattaforma hardware, software e cloud per offrire servizi di quantum computing diventando un produttore full-stack nel segmento delle apparecchiature quantistiche fotoniche. Il chip *Pro-metheus* sfrutta la tecnologia dei quantum dots per emettere fotoni singoli che vengono poi usati come *flying qubit*. Quandela dal 2022 ha attivato un cloud dove ricercatori e aziende possono accedere ad un framework open-source per attività di sviluppo software, concezione di nuovi algoritmi quantistici ed esecuzione di simulazioni. Le tecnologie sviluppate da Quandela sono state impiegate per realizzare una piattaforma di quantum computing modulare chiamata *Mosaiq*. Il sistema è modulare e personalizzabile, con un'architettura che scala da 6 a 24 qubit fotonici. Quandela ha presentato nel 2024 una roadmap che prevede la realizzazione del primo qubit logico (senza errori) entro il 2025 e l'implementazione di un sistema di quantum networking che connetta più computer quantistici entro il 2028. Inoltre, mira a rendere disponibile un quantum computer fotonico fault-tolerant entro il 2030.



Quandela

Qubit ad atomi neutri

Un altro approccio tecnologico prevede lo sfruttamento di atomi non ionizzati, raffreddati e controllati tramite opportuna strumentazione ottica per ottenere dei **qubit ad atomi neutri**. Questa soluzione permette di ottenere un buon bilanciamento tra scalabilità e coerenza. Le aziende che stanno sviluppando questo approccio tecnologico sono relativamente poche a livello mondiale, con una concentrazione importante negli Stati Uniti, dove emergono per finanziamenti ricevuti e attività di ricerca QuEra, Atom Computing e Infleqion.

QuEra è basata vicino a Boston negli Stati Uniti e prende vita da attività di ricerca portate avanti dal MIT e dall'Università di Harvard. I qubit di QuEra sono basati su atomi neutri di rubidio, raffreddati a temperature prossime allo zero assoluto e controllati via laser ad alta precisione. L'azienda è impegnata nello sviluppo sia di un computer quantistico analogico, sia di uno digitale, disponibili entrambi su una piattaforma cloud proprietaria oltre che su AWS. Il prodotto di punta è il processore *Aquila* a 256 qubit, al momento disponibile pubblicamente per la progettazione e la sperimentazione di algoritmi quantistici. Ad inizio 2025, QuEra ha ricevuto un finanziamento da 260 milioni di \$ che ha visto fra i principali finanziatori Google.



QuEra

Atom Computing usa un approccio simile, puntando alla realizzazione di un computer quantistico estremamente scalabile. L'azienda sta collaborando con Microsoft, con la quale ha dimostrato a fine 2024 di essere in grado di creare e gestire 24 qubit logici ad atomi neutri entangled tra di loro, un risultato mai raggiunto in precedenza. Atom Computing sta progettando un computer quantistico di nuova generazione, ancora in fase di studio, con più di 1000 qubit.



#video

Atom Computing
Technology Advantage

Infleqtion lavora su diverse tecnologie quantistiche. Nel settore del computing sta progettando e realizzando sistemi ad atomi neutri facilmente scalabili. Ha attivato importanti collaborazioni con player industriali, in particolare con NVIDIA con cui ha dimostrato la fattibilità di simulazioni quantistiche per la ricerca su nuovi materiali sfruttando la piattaforma CUDA-Q. L'azienda ha adottato una strategia per l'implementazione di nuovo hardware con il relativo software per arrivare alla realizzazione di un computer quantistico fault-tolerant con 100 qubit.



Infleqtion

A livello europeo, la francese **Pasqal**, spin-off dell'Institut d'Optique di Parigi, rappresenta in caso più interessante. Pasqal sta realizzando Quantum Processing Units fortemente orientate all'integrazione con sistemi di High Performance Computing classici e altamente scalabili. Il sistema *Orion Gamma* può contare su circa 140 qubit con tecnologia ad atomi neutri, il suo successore *Vela* in consegna dal 2027 dovrebbe superare i 200 qubit. Pasqal ha già attivato numerose collaborazioni industriali e i suoi computer quantistici sono disponibili via cloud attraverso i servizi erogati da Google e Azure. Pasqal mira a dimostrare la capacità di gestire qubit logici senza errore entro il 2026, con una roadmap serrata per arrivare ad una macchina con 10.000 qubit entro il 2030.



Pasqal

Qubit Nitrogen-Vacancy Center

L'approccio tecnologico che sfrutta i **Nitrogen-Vacancy Center**, dove i **qubit corrispondono ai difetti puntuali nel reticolo cristallino di un diamante**, propone un'alternativa interessante. Il vantaggio principale dei qubit realizzati in questo modo risiede nella loro elevata stabilità anche a temperatura ambiente: non sono quindi necessarie attrezzature per mantenere la macchina quantistica a temperature criogeniche. Tuttavia, questi sistemi sono teoricamente più complessi da scalare dal punto di vista industriale proprio perché si basano su impurità di reticoli cristallini come quelli dei diamanti sintetici, complessi da gestire su larga scala.

Quantum Brilliance è una società australiana fondata nel 2019 che sviluppa hardware per computer quantistici e *acceleratori quantistici*. Questi acceleratori sfruttano qubit a nitrogen vacancy per realizzare dei co-processor che vanno ad integrarsi in macchine esistenti per l'High Performance Computing. Il sistema è quindi pensato per funzionare in sinergia con i supercomputer esistenti, ottimizzando i calcoli e i processi dove l'approccio quantistico può portare ad un vantaggio reale per gli utilizzatori. I sistemi sono estremamente compatti poiché possono operare a temperatura ambiente e possono essere integrati nei rack dei comuni data center. Ad oggi i prodotti di Quantum Brilliance hanno pochi qubit con una roadmap per incrementarli entro la fine del decennio.



Quantum Brilliance

SaxonQ è uno spin-off dell'istituto di ricerca tedesco Felix Bloch Institute of Solid State Physics dell'Università di Leipzig. Il progetto della startup punta sulla semplificazione della struttura della macchina quantistica per ridurre peso, dimensioni e complessità operativa. La scelta di utilizzare qubit quantistici a NV permette di implementare la tecnologia di SaxonQ in molti ambienti operativi. La startup sta lavorando ad un computer quantistico portatile adatto a scenari d'uso realistici e operativi che sarà caratterizzato dalla facilità d'uso, dalla possibilità di lavorare a temperatura ambiente, garantendo così consumi energetici contenuti. Una prima dimostrazione è avvenuta ad aprile 2025 presso la Hannover Messe con una demo che ha confermato le capacità di real-time image recognition di un tale computer quantistico portatile.



SaxonQ



Tecnologie emergenti

Altre tecnologie per la produzione di chip per computer quantistici sono in sviluppo da parte di grandi gruppi industriali per rispondere a determinate richieste del mercato che ben si adattano a delle nicchie tecnologiche e, in parte, per sfruttare il vantaggio tecnologico che alcune aziende possiedono in specifici mercati. Il colosso statunitense dei semiconduttori Intel ricade in questa categoria. **Intel** sta investendo nella tecnologia per la produzione di **qubit a spin in silicio**, dove i qubit corrispondono agli spin degli elettroni confinati in strutture di semiconduttori. Intel ha deciso di puntare su questo approccio tecnologico anche per sfruttare appieno il suo enorme background scientifico, brevettuale e industriale per la progettazione e realizzazione di chip in silicio.

Gli Intel Labs stanno lavorando alla progettazione di macchine quantistiche sia dal punto di vista hardware sia da quello software, come altri grandi gruppi e startup simili. Il chip quantistico *Tunnel Falls* di Intel è realizzato usando la stessa tecnologia litografica *extreme ultraviolet lithography* – EUV oggi impiegata nella produzione di transistor commerciali con tecnologia CMOS. Nello specifico, *Tunnel Falls* contiene 12 qubit. Intel punta alla maggiore scalabilità possibile per accelerare la produzione di massa e sfruttare appieno il suo bagaglio tecnologico e brevettuale. Lato software viene distribuito l'*Intel® Quantum SDK* per aiutare aziende, enti di ricerca e scienziati a sfruttare il potenziale delle macchine quantistiche. L'SDK propone un ambiente ottimizzato per scrivere e testare applicazioni unito ad un'interfaccia intuitiva. Intel sta proattivamente lavorando alla costruzione di un ecosistema dedicato al quantum, in particolare negli Stati Uniti dove il chip è stato distribuito presso enti, centri di ricerca e università selezionate.



[Discover Quantum Computing](#)

Recentemente sta emergendo la possibilità di realizzare **qubit topologici** (vedi Capitolo 1) utilizzando delle quasiparticelle esotiche per i qubit. Questo settore della ricerca quantistica si trova ad un livello di sviluppo basso rispetto a quelli presentati precedentemente: la tecnologia è quindi ancora in una fase teorica, con pochi attori coinvolti a livello globale rispetto agli altri ambiti del quantum computing. Tuttavia, dal punto di vista teorico l'uso dei qubit topologici porta in dote alcuni vantaggi interessanti ed in particolare una tolleranza agli errori intrinseca.

In questo particolare settore, **Microsoft** è il principale attore. La multinazionale statunitense ha presentato ad inizio 2025 il primo chip quantistico con qubit topologici, il *Majorana 1*. Il nome del chip è un omaggio al fisico italiano Ettore Majorana che teorizzò per primo queste quasi-particelle negli anni '30 del '900. La struttura del chip è molto complessa, con una combinazione fra materiali semiconduttori e superconduttori. Il chip ha sviluppato una natura topologica al raggiungimento di temperature prossime allo zero assoluto. La prima versione di *Majorana 1* contiene 8 qubit, con la potenzialità secondo Microsoft di scalare per arrivare a posizionare fino ad un milione di qubit su singolo chip.

Il chip *Majorana 1* è stato progettato come acceleratore quantistico per operazioni da portare avanti in sinergia con macchine di High Performance Computing classiche, in cui solo alcune operazioni che possono beneficiare di un approccio quantistico vengono demandate all'acceleratore.



[#video Majorana 1 Explained: The Path to a Million Qubits](#)

Ai giganti del tech statunitense, ed in particolare dei servizi cloud, Google e Microsoft, si è aggiunta recentemente nell'arena della ricerca sui nuovi processori quantistici anche **Amazon**. Nel 2025 Amazon Web Services ha annunciato *Ocelot*, sviluppato dal team interno dell'AWS Center for Quantum Computing presso il California Institute of Technology. *Ocelot* sfrutta un nuovo tipo di design basato su **cat qubit**, così chiamati per via dell'esperimento di Schrödinger alla base della teoria che spiega il loro funzionamento. Questa configurazione dovrebbe rendere più semplice e fattibile la correzione degli errori. *Ocelot* promette infatti di essere in grado di ridurre drasticamente il costo legato alla correzione e mitigazione di tali errori grazie al suo approccio che l'azienda definisce "*error correction built in*", aprendo la strada ad un uso commerciale della tecnologia quantistica.



[Amazon announces Ocelot quantum chip](#)

04/

Industry Applications



Negli ultimi anni le tecnologie quantistiche sono state oggetto di molteplici discussioni circa il loro potenziale impatto positivo in alcuni settori industriali ed economici.

Il dibattito si è intensificato dal 2019 con la dichiarazione di Google che affermava di aver raggiunto la supremazia quantistica (vedi Capitolo 3). Nel capitolo precedente è stato presentato il mercato di riferimento delle tre principali tecnologie quantistiche, dalle quali stanno emergendo nuove applicazioni industriali, ossia quantum sensing, quantum communication e quantum computing.

Il perimetro di utilizzo di queste tecnologie si sta progressivamente allargando anche a comparti industriali diversi da quelli per cui le stesse erano state originariamente pensate e progettate. Tale tendenza è peraltro comune a molte tecnologie emergenti in grado di risolvere problemi complessi: ad esempio, si pensi all'utilizzo delle schede grafiche (GPU), inizialmente nate per migliorare la fluidità delle immagini video, ora largamente impiegate in ambito machine learning e intelligenza artificiale.

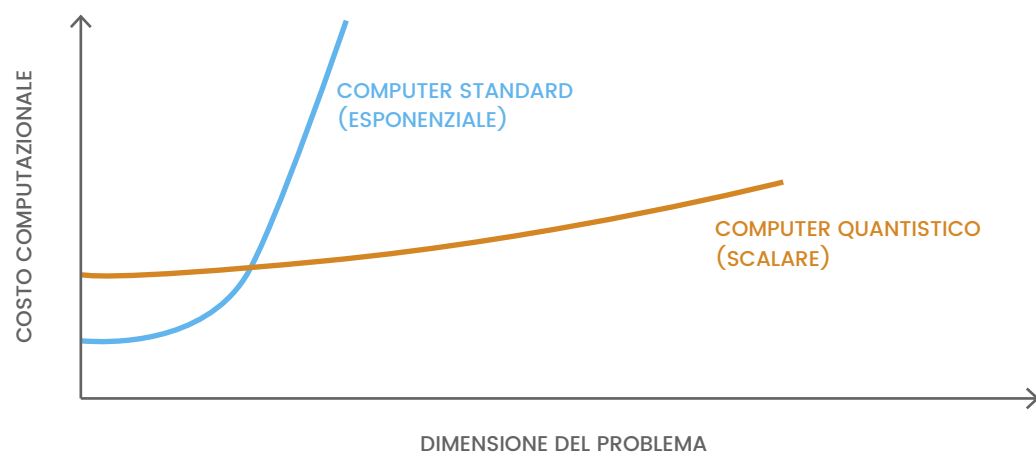
Dal punto di vista dell'applicabilità cross-industry delle tecnologie quantistiche, se il quantum sensing e le quantum communication si concentrano naturalmente su alcuni settori specifici (rispettivamente biomedicale, militare e geodetico il primo, cybersecurity e telecomunicazioni le seconde), il quantum computing permette invece di affrontare problemi oggi non trattabili con tempi e costi ragionevoli in settori industriali plurimi, dal chimico-farmaceutico alla logistica, passando per l'automotive e l'energy supply, fino ai servizi finanziari.

Il diverso grado di maturità tecnologica, le peculiarità tipiche di ogni ambito industriale e infine la disponibilità di finanziamenti incidono in modo importante sull'uso cross-industry delle tecnologie quantum.

Il quantum computing esprime al meglio il suo potenziale rispetto ai sistemi di calcolo tradizionali nei contesti caratterizzati da elevata complessità, grazie alla sua elevata efficienza che si traduce in minori costi computazionali.

Potenziale del quantum computing

Confronto qualitativo del costo computazionale di simulare un sistema quantistico con un computer standard rispetto a un computer quantistico



Healthcare, chimica e scienza dei materiali sono considerati tra i settori industriali dove le potenzialità di queste tecnologie si concretizzeranno più rapidamente.

Si tratta di ambiti molto vasti, caratterizzati da una grande quantità di tecnologie abilitanti per il loro sviluppo, sia dal punto di vista della ricerca sia dal punto di vista della produzione industriale. Per questi tre settori l'impatto dirompente che le tecnologie quantistiche avranno a medio termine (5-10 anni) è elevato: il quantum sensing abilita nuovi sistemi di misurazione ultra-precisi, mentre il quantum computing apre le porte a simulazioni estremamente complesse e dettagliate, e soprattutto eseguibili in tempi brevi o addirittura quasi in real-time.

La potenza di calcolo diventerà abilitante per la creazione di nuovi business e l'accelerazione nella scoperta di processi metabolici, interazioni biologiche tra molecole, **la scoperta di nuovi farmaci e materiali**. Inoltre, la combinazione di più tecnologie come quantum sensing e computing, renderà possibile la creazione di **digital twins di oggetti complessi**, anche dal punto di vista biologico, per comprenderne sempre meglio il funzionamento, l'evoluzione e quindi poter intervenire con nuovi approcci terapeutici o legati alla manutenzione predittiva avanzata.

Anche le reti energetiche e le reti di trasporto trarranno beneficio dalle quantum technologies per aumentare efficienza, sicurezza e resilienza in condizioni di stress. In particolare, il quantum computing promette un significativo impatto in termini di **sostenibilità**, grazie all'ottimizzazione di sistemi complessi coinvolgenti un elevato numero di variabili come, ad esempio, quelli legati alla gestione delle reti energetiche e

di trasporto. Il quantum computing contribuirà in modo rilevante anche sul fronte dell'**ottimizzazione dei trasporti e della logistica**, migliorando la pianificazione delle rotte e la gestione del traffico, l'allocazione dinamica delle risorse in sistemi complessi e la sincronizzazione delle catene di fornitura. I benefici diretti saranno tangibili: riduzione dei costi operativi, aumento dell'affidabilità e diminuzione delle emissioni legate alla logistica.

Infine, le istituzioni finanziarie, sia pubbliche sia private, sono state fra le prime ad intuire il ruolo dirompente e trasformativo delle tecnologie quantistiche per il loro impatto sulla sicurezza e sulla resilienza del settore. L'interesse si è focalizzato sul quantum communication, per la sua utilità nello sviluppare sistemi di **crittografia avanzata**, e sul quantum computing, in quanto strumento utile a migliorare l'analisi di grandi volumi di dati e a rafforzare i meccanismi di gestione del rischio finanziario.

L'uso della quantum communication ricade per lo più nell'implementazione di protocolli sicuri e nell'uso di tecniche di Quantum Key Distribution per proteggere i flussi di informazioni. Il quantum computing, con la sua potenza di calcolo, caratterizzata da flessibilità e velocità di esecuzione delle operazioni, viene visto come un nuovo step tecnologico per processi di ottimizzazione, fraud detection, attività di anti-money laundering e analisi di grandi database per promuovere attività di monitoraggio o di investimento.

#use case

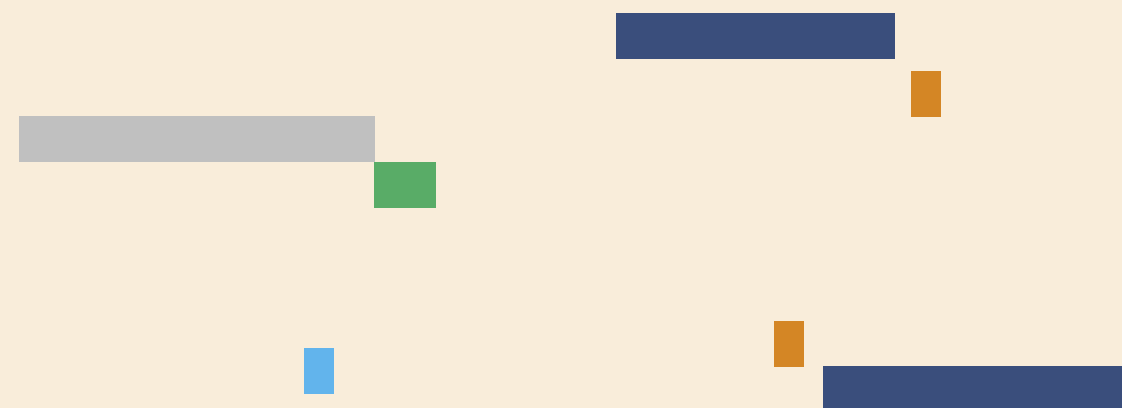
Quantum Computing as a Service

Il **Quantum Computing as a Service - QCaaS**, facendo leva sulle infrastrutture di Cloud Computing, rappresenta un servizio abilitante per l'accesso, la sperimentazione e lo sviluppo del calcolo quantistico, specialmente in un contesto tecnologico frammentato in cui la disponibilità dell'hardware è ancora piuttosto scarsa.

In questo scenario, il QCaaS consente ad aziende, università e centri di ricerca di testare algoritmi quantistici e implementare applicazioni accedendo da remoto a macchine quantistiche reali o simulatori, senza la necessità di possedere in loco o gestire l'hardware fisico, ancora relativamente molto costoso e complesso da mantenere in modo autonomo.

Il Cloud Computing abbate quindi le barriere d'ingresso, rendendo la tecnologia quantistica democratica e scalabile. Questo approccio permette ad aziende di ogni dimensione di confrontare le performance di diversi hardware quantistici e di sperimentare algoritmi su più piattaforme senza particolari vincoli legati al fornitore.

C'è però da considerare che l'assenza di standard comuni a livello internazionale costituisce un ostacolo significativo alla portabilità dei software e all'interoperabilità tra i diversi sistemi. Ogni provider adotta un proprio framework, linguaggi e API specifici (es. Qiskit di IBM, Cirq di Google, Q# di Microsoft), rendendo difficile il riuso di codice e la comparabilità tra piattaforme.



I tre grandi operatori cloud che guidano l'offerta di QCaaS sono:

- Google Cloud, che mette a disposizione accesso alla propria piattaforma Sycamore tramite Cirq, oltre a IonQ, AQT e Pasqal, e simulazioni quantistiche ad alte prestazioni
- Amazon Web Services (AWS), con il servizio Amazon Braket, che consente l'accesso a più tecnologie quantistiche da produttori come IonQ, Rigetti, QuEra e IQM
- Microsoft Azure Quantum, che offre un'architettura integrata per accedere a macchine quantistiche di partner selezionati (Quantinuum, Rigetti e Pasqal) e integra un ambiente di sviluppo (Q#) focalizzato sulla modularità e scalabilità



*Amazon Braket – AWS
Quantum Computing*



Microsoft Azure Quantum



Google Quantum AI

La disponibilità di queste piattaforme come servizi non solo accelera la sperimentazione e la ricerca, ma permette anche di creare un ecosistema in crescita che include startup, laboratori pubblici, fornitori di hardware e sviluppatori software. Il QCaaS diventa quindi il collante infrastrutturale di un settore in forte evoluzione, ancora privo di una tecnologia predominante ma ricco di potenzialità trasformative.



4.1 Healthcare, chimica e scienza dei Materiali

Nel Capitolo 3 sono state presentate aziende e startup che stanno già oggi utilizzando alcune peculiarità della meccanica quantistica per accrescere la precisione e la velocità di macchinari per l'analisi medica. In generale, il quantum sensing sta dimostrando di poter migliorare in modo netto la **sensibilità dei dispositivi di accertamento delle patologie** e di poter dare vita a nuove forme di diagnostica in grado di analizzare e rilevare dei biomarcatori a concentrazioni molto basse, spesso non rilevabili con le tecnologie tradizionali.

Diagnostica avanzata e ricerca di nuove molecole

Un esempio sono le nuove forme di risonanza magnetica che sfruttano questi fenomeni per fornire scansioni che aumentano significativamente la precisione e il dettaglio, entrambi fondamentali per la diagnosi molto precoce di malattie degenerative, oncologiche, cardiovascolari e metaboliche.

Il quantum sensing sta dimostrando di poter misurare variazioni minime, spesso quasi impercettibili per gli standard attuali, di campi magnetici, elettrici o gravimetrici, anche a livello cellulare.

In generale, le tecniche usate convenzionalmente per il rilevamento di proteine e marcatori di vario tipo (come quelli tumorali), incontrano dei limiti intrinseci dovuti alla complessità dell'ambiente fisiologico in cui lo scan viene effettuato, in quanto sono presenti altri fluidi, come il sangue, e altre

componenti biologiche. In questo contesto emergono le potenzialità delle nuove famiglie di sensori quantistici che usano la Nitrogen Vacancy (NV) dei diamanti sintetici per superare ostacoli come quello che si presenta nello *screening di Debye* in cui le cariche di alcune biomolecole non possono essere rilevate oltre una distanza assai limitata. Questi nuovi sensori permetteranno ad esempio di rilevare microRNA di biomarcatori tumorali chiave, aumentando la capacità diagnostica attuale e riducendo potenzialmente i costi e la complessità di questi esami. La stessa tecnologia, ancora in via di sviluppo, potrà essere utilizzata per rilevare virus sia in ambito neuroscientifico sia per la biologia molecolare avanzata.

La svizzera **Qnami** progetta, sviluppa e produce sensori che sfruttano la NV di diamanti artificiali a temperatura ambiente per scansioni estremamente precise. L'azienda si sta concentrando sulla realizzazione di scan ad alta risoluzione per il monitoraggio dei deboli campi magnetici emessi dai tessuti biologici, da raggruppamenti o singole cellule, per attività di monitoraggio diagnostico in vari settori, da quello neurologico a tutto ciò che può rientrare nella medicina personalizzata. La tecnologia di nanoscale imaging di Qnami può essere utilizzata sia in campo biomedico sia per analisi dei materiali. ProteusQ™ è il prodotto di punta di Qnami, un microscopio quantistico utilizzabile per analizzare i campi magnetici di vari materiali.



Qnami

Oltre a Cerca Magnetics, presentata nel Capitolo 3 e considerata fra le più promettenti nel settore, altre aziende stanno mettendo a punto dispositivi per il monitoraggio avanzato di parametri vitali.

MAG4Health è una startup francese che sta sviluppando nuovi magnetometri ottici, Optically Pumped Magnetometers (OPM), per magnetoencefalografie (MEG) ad altissima risoluzione. La tecnologia OPM permetterà di realizzare device compatti, facilmente indossabili e con costi di gestione più bassi dei dispositivi odierni, anche di quelli che utilizzano la tecnologia quantistica SQUID, la quale richiede per poter funzionare temperature criogeniche, comportando relativi aggravii in termini di costi infrastrutturali.



MAG4Health

Anche il settore healthcare beneficerà delle quantum communication per gestire con livelli di sicurezza e privacy più stringenti i dati sensibili come quelli sanitari. Ancorché in questo specifico ambito siano state avviate delle sperimentazioni, lo sviluppo delle stesse risulta meno avanzato rispetto a use case analoghi che riguardano altri settori come quello dello scambio di informazioni di intelligence o la gestione delle transazioni finanziarie.

Il quantum computing nel settore dell'healthcare, della chimica e dei materiali avrà un impatto che molti analisti prevedono essere dirompente e trasformativo. La concorrenza dei sistemi di High-Performance Computing classici già disponibili sia in

termini di capacità di calcolo sia, entro certi limiti, di efficienza energetica rappresenta una sfida concreta. Tuttavia, il quantum computing sarà particolarmente interessante in tutti quei casi in cui sono previste simulazioni particolarmente complesse e in particolare dove è previsto un uso sinergico con l'Artificial Intelligence.

La combinazione di queste due tecnologie permetterà di affrontare in modo efficiente dal punto di vista dei consumi energetici e dei tempi di esecuzione tutti quei calcoli che oggi sono difficilmente trattabili con metodi "classici" o addirittura che non sono affrontabili da un punto di vista computazionale (vedi Capitolo 3). Il quantum computing potrebbe rivelarsi particolarmente adatto a generare simulazioni, tipiche in ambito chimico farmaceutico, caratterizzate da un considerevole numero di variabili con un grado di accuratezza molto elevato.

Questo approccio sarà quindi in grado di rivoluzionare i seguenti ambiti:

- Simulazioni per la scoperta di nuovi farmaci, molecole, composti chimici e materiali
- Creazione di digital twins avanzati di sistemi biologici complessi per test virtuali e/o per il monitoraggio di pazienti reali
- Folding delle proteine e della loro evoluzione
- Machine learning avanzato per il monitoraggio di parametri vitali o per l'analisi di big data provenienti da esami medici, immagini diagnostiche e database clinic

Il report *The convergence of healthcare and pharmaceuticals with quantum computing: A new frontier in medicine* dello UK National Quantum Computing Centre

(NQCC) sottolinea come il quantum computing sia potenzialmente molto promettente per effettuare simulazioni molecolari e favorire la scoperta di nuovi composti farmacologici. La stessa tecnologia può avere un'applicazione pratica nell'ottimizzazione dei trial clinici che, per loro stessa natura, sono estremamente complessi da gestire, per la divisione in cluster dei pazienti e l'analisi dei dati ottenuti.

Le potenzialità presentate nel report dell'ente britannico sono condivise con altri settori che necessitano di simulazioni altrettanto complesse e ad alta intensità di calcolo. Oltre ai limiti dettati da una tecnologia per molti versi non matura e ancora in fase di sviluppo e di standardizzazione, emerge anche il limite dell'accesso ai dati sanitari e biomedici, nonché delle competenze specialistiche necessarie per far diventare l'uso del quantum computing realmente utilizzabile.



[Quantum computing for healthcare and pharmaceuticals](#)

IBM ha da tempo investito pesantemente per diventare un operatore a tutto tondo nel settore del quantum computing, dall'hardware al software, passando per il cloud e tutto quello che vi ruota attorno. Entro il 2029, IBM costruirà un nuovo computer quantistico ad alte prestazioni, Starling. La nota stampa dell'azienda lo definisce come una macchina con prestazioni eccezionali "To represent the computational state of an IBM Starling would require the memory of more than a quindecillion (1048) of the world's most powerful supercomputers. With Starling, users will be able to fully explore

the complexity of its quantum states, which are beyond the limited properties able to be accessed by current quantum computers." Fra i casi d'uso previsti per il nuovo computer emergono la scoperta di nuovi farmaci, la ricerca nei settori della chimica e dei nuovi materiali.



[IBM Sets the Course to Build World's First Large-Scale, Fault-Tolerant Quantum Computer at New IBM Quantum Data Center](#)

Qubit Pharmaceuticals sta lavorando per creare una piattaforma che sia in grado di sfruttare le tecnologie quantistiche per la simulazione molecolare. La startup francese sta implementando una serie di tecnologie diverse, ma complementari fra loro, per arrivare alla possibilità concreta di simulare come proteine e farmaci possano interagire con il corpo umano. L'uso di tecniche ibride tra High Performance Computing e quantum computing, insieme ai nuovi modelli di simulazione con dati di origine sintetica per quel che riguarda la chimica molecolare, permetteranno di ottenere un livello di accuratezza non disponibile oggi. Qubit Pharmaceuticals punta così alla possibilità di simulare ciò che accade a livello molecolare e in futuro anche atomico, per guidare lo sviluppo di nuovi farmaci, capire come ottenere il massimo dell'efficacia da quelli oggi disponibili puntando così ad inaugurare una medicina realmente personalizzata.



[Qubit Pharmaceuticals](#)

La startup finlandese **Algorithmiq** sta lavorando alla progettazione e implementazione di nuove soluzioni software per la simulazione quantistica di molecole, per la scoperta di nuove molecole e farmaci, e di nuovi materiali e processi per la green transition. L'azienda ha creato una Digital Quantum Interface che riesce ad integrare efficientemente la potenza di calcolo proveniente da sistemi di High Performance Computing classici e da macchine quantistiche.

Algorithmiq ha progettato una famiglia di algoritmi proprietari per la ricerca di nuove soluzioni nel campo della chimica. La startup propone un approccio multiscale che unisce il meglio del potenziale offerto dal quantum computing e dalle tecniche di Artificial Intelligence per proporre modellazioni avanzate dei meccanismi molecolari che sono alla base delle interazioni tra i farmaci e i loro bersagli biologici. Lo stesso approccio è utilizzato per attività legate alla scoperta di nuove molecole e nuovi farmaci. L'azienda collabora con IBM dal 2023: il Tensor-network Error Mitigation – TEM di Algorithmiq è oggi usato in simulazioni complesse per aumentare la qualità dei risultati ottenuti e ottenere un guadagno generale dell'efficienza computazionale dei computer quantistici IBM utilizzati per simulazioni complesse.



[Algorithmiq](#)

Quantistry è specializzata nella progettazione di architetture software per la simulazione nei settori della chimica computazionale, per la ricerca di nuovi materiali e molecole. La startup tedesca ha puntato sulla realizzazione di una piattaforma che offre agli utilizzatori un ambiente cloud native. La piattaforma QuantistryLab adotta un approccio multiscale, dalla scala atomica a quella macroscopica, nella simulazione di molecole e materiali complessi. Inoltre è stata progettata per fornire un ambiente di facile uso per i ricercatori. Quantistry unisce le potenzialità del machine learning con quelle dell'Artificial Intelligence per arrivare al quantum computing per poter fornire, appena sarà disponibile, il cosiddetto quantum advantage anche grazie alle collaborazioni già in essere con importanti partner industriali.

Quantistry si sta focalizzando su alcuni comparti industriali dove questo tipo di simulazioni potrebbero avere un ruolo rilevante nel portare sul mercato nuovi prodotti, come l'energy storage e lo sviluppo di nuove chimiche per batterie, lo sviluppo di nuovi metalli, leghe metalliche e ceramiche, catalisi, chimica organica, materiali ottici e semiconduttori, polimeri e lubrificanti.



[Quantistry](#)

Programmi governativi per lo sviluppo di nuovi materiali

Il Governo degli Stati Uniti d'America ha lanciato a fine 2024 un programma finalizzato a sfruttare le potenzialità del quantum computing nel settore della chimica e dei materiali con un focus sul tema dell'energia. Il **Quantum Computing for Computational Chemistry program - QC³** ha come obiettivo la creazione di nuovi metodi e processi per la simulazione di nuove chimiche e materiali per alcune settori industriali come catalizzatori, batterie e accumulatori di nuova generazione, superconduttori ad alta temperatura per reti di trasmissione di energia. Le aziende che partecipano al programma si impegnano a trovare soluzioni che siano in grado di performare almeno 100 volte meglio dei sistemi attualmente utilizzati nell'industria al fine di portare sul mercato nuovi approcci e metodologie che possano essere considerati realmente trasformativi. Per ottenere questo risultato molto impegnativo si richiede la capacità di portare avanti sia nuovi sviluppi nell'hardware dedicato al quantum computing sia nello sviluppo di error correction algorithms.



Quantum Computing for Computational Chemistry program (QC3)

Il progetto di ricerca europeo **PASQuans2 - Programmable Atomic Large-Scale Quantum Simulation 2.1**, attivo fino al 2026 e seguito del progetto PASQuans, ha come obiettivo la progettazione e lo sviluppo di una nuova generazione di simulatori quantistici per la risoluzione di problemi computazionali nei settori della chimica, dell'ottimizzazione industriale e della scienza dei materiali. Il progetto ricade fra le iniziative della cosiddetta Quantum Flagship della Commissione Europea, pensata per favorire la nascita e l'espansione di tecnologie quantistiche all'interno dell'Unione Europea con tutta la relativa supply chain. Il consorzio di PASQuans2 è guidato dal centro di ricerca tedesco Max Planck con circa 30 partner da tutta Europa. Il progetto svilupperà dei simulatori quantistici programmabili in grado di gestire macchine quantistiche con una potenza di calcolo fino a 1.000 qubit ad atomi neutri. La piattaforma sarà pensata per far girare in sinergia la parte hardware con quella software in ottica di scalabilità e flessibilità, anche per poterla facilmente adattare ad ambiti industriali diversi. PASQuans2 è sostenuto da enti di ricerca sia pubblici sia privati, nonché da partner industriali nell'ottica di favorire il trasferimento tecnologico in modo efficiente e portare così i risultati ottenuti dalla ricerca fondamentale più velocemente sul mercato.



PASQuans2

4.2 Energia e Trasporti

Le reti di trasporto e distribuzione rappresentano una parte fondamentale di come l'energia viene oggi non solo prodotta ma anche erogata, poiché devono adattarsi a fonti energetiche rinnovabili, come eolico e solare, per loro natura discontinue: parliamo quindi di **smart grids**, dinamiche e adattabili in tempo reale al contesto in cui si trovano.

Le quantum communication, in particolare quelle basate sulla Quantum Key Distribution, contribuiranno allo scambio di informazioni sicure all'interno delle smart grids, le quali risultano oggi sempre più interconnesse e conseguentemente vulnerabili ad attacchi informatici e di cyberterrorismo.

Mettere in sicurezza le reti elettriche

Negli Stati Uniti, la startup **Atom Computing** ha avviato una collaborazione strategica con il **National Renewable Energy Laboratory (NREL)** per applicare il quantum computing alla gestione della rete elettrica. L'obiettivo è quello di ottimizzare la riconfigurazione automatica delle linee di distribuzione per prevenire blackout e ridurre i tempi di risposta ai guasti. Utilizzando un'interfaccia "**quantum-in-the-loop**", i ricercatori collegano simulazioni in tempo reale dello stato della rete elettrica a un processore quantistico per risolvere istantaneamente problemi di instradamento dell'energia. Rispetto ai metodi tradizionali, la soluzione quantistica consente di reagire in frazioni di secondo, garantendo una maggiore resilienza e sostenibilità.



Atom Computing

Nel 2025, **Toshiba Europe**, in collaborazione con altri partner europei, ha pubblicato i risultati di un test avvenuto con successo dove è stato implementato un sistema di **Quantum Key Distribution (QKD)** su una rete in fibra ottica lunga oltre 250 km, utilizzando il protocollo avanzato Twin-Field QKD. La rete ha trasmesso chiavi crittografiche quantistiche a 110 bit/s **senza necessità di sistemi criogenici**, rendendo la soluzione più scalabile e integrabile nelle infrastrutture esistenti. Questa dimostrazione è particolarmente significativa per il settore energetico e delle infrastrutture critiche, poiché apre la strada alla protezione avanzata dei dati di controllo e comunicazione in scenari sempre più vulnerabili

ad attacchi informatici. L'iniziativa mostra come le tecnologie quantistiche non siano più solo teoriche, ma pronte per applicazioni operative su larga scala.

L'ottimizzazione delle smart grids rappresenta una sfida crescente. L'allacciamento alle reti di trasmissione di un numero crescente di impianti rinnovabili, per loro stessa natura incostanti, pone notevoli problematiche di gestione e bilanciamento della rete. L'uso di potenza di calcolo generata dal quantum computing permetterà nel prossimo futuro di gestire reti sempre più complesse in modo efficiente, aumentando la resilienza dei sistemi elettrici.

In particolare, si stima che il quantum computing potrà fornire una soluzione performante per la risoluzione del cosiddetto **Unit Commitment Problem (UCP)**, ossia il problema relativo alla scelta ottimale di quali sistemi di produzione energetica attivare a seconda del carico di rete. Il quantum computing fornirà risultati attendibili e con tempistiche molto competitive per valutare quali centrali accendere. Questo tipo di applicazione è studiata da vari operatori di smart grids e di produzione di energia elettrica. I sistemi attuali sfruttano prevalentemente algoritmi euristici, che mostrano limiti sempre più evidenti al crescere della complessità del mix energetico. La capacità del quantum computing di gestire calcoli complessi con molte variabili permetterà di raggiungere nuovi livelli di ottimizzazione, in particolare sfruttando i Variational Quantum Algorithms (VQAs).

Il tema dell'ottimizzazione di reti elettriche, in particolare con metodi e algoritmi ibridi di quantum-classici, ha dato il via nel 2025 alla collaborazione fra **Classiq**, che si occupa di software per il quantum computing, **Wolfram Research**, focalizzata sul calcolo computazionale, e l'**Open Quantum Institute del CERN**. La collaborazione mira a proporre soluzioni che sfruttino modelli computazionali complessi in grado di fornire informazioni e simulazioni altamente attendibili ai sistemi di decision making per le smart grids. L'attenzione in questo caso è posta anche sulla replicabilità e sulla reale scalabilità delle soluzioni quantum e quantum-ibride, soprattutto per la gestione dello UCP, che saranno testate nei prossimi anni.



Classiq and Wolfram Join CERN's Open Quantum Institute to Develop Quantum Optimization for Smart Power Grids

Tra i progetti che toccano tematiche simili, il progetto **Grid Research, Integration and Deployment for Quantum (GRID-Q)**, finanziato da alcuni uffici ministeriali statunitensi nel 2024, unisce laboratori e attori industriali del quantum, come IonQ, per ricercare e testare nuove tecnologie quantistiche per l'ottimizzazione delle smart grids, mettendo insieme quantum sensing, communication e computing.

In Europa, tra le iniziative più concrete spicca la sperimentazione dell'azienda energetica spagnola **Iberdrola**, che dal 2024 sta testando una soluzione per l'ottimizzazione della collocazione e della gestione di sistemi di accumulo di grandi dimensioni per la stabilizzazione della rete elettrica. Il test è realizzato in collaborazione con **Multiverse Computing**, azienda specializzata

nella realizzazione di algoritmi quantistici, e con il **Gipuzkoa Quantum Program** che mira a promuovere l'implementazione di tecnologie quantistiche nei Paesi Baschi. Iberdrola ha implementato e testato la piattaforma Singularity di Multiverse Computing progettata per gestire software quantum e quantum-inspired. Il progetto ha testato nuove metodologie per l'ottimizzazione della rete in una regione caratterizzata da una significativa produzione di energie rinnovabili incostanti, da consumi industriali e domestici a loro volta influenzati dalle elevate fluttuazioni delle temperature, e dall'impatto della crescita della rete di ricarica per la mobilità elettrica.



Iberdrola and Multiverse Computing announce pilot project success to optimise battery installation in the grid

Da una collaborazione fra il gigante energetico **ENI** e **ITQuanta** è nata la joint venture **Eniquantic**. ENI è già attivo nel settore dell'High Performance Computing con una delle macchine per il supercalcolo più potenti al mondo (ossia HPC6 inserito nel 2025 nella Top 10 internazionale) per sfruttare la potenza di calcolo per attività legate alla transizione energetica, per la geodesia e la ricerca di nuovi depositi di idrocarburi, nonché per la modellazione avanzata di nuovi materiali e di reti complesse per la gestione dell'energia. Eniquantic sta lavorando alla realizzazione di una macchina quantistica full stack (hardware e software). Eniquantic potrà sfruttare il supercomputer HPC6 di ENI per attività di test e per la dimostrazione di attività di calcolo ibride quantum e supercalcolo tradizionale. In futuro, ENI e ITQuanta hanno identificato tre casi d'uso molto rilevanti per il settore

energetico: gli ambiti della generazione e dello stoccaggio dell'energia, in particolare in reti caratterizzate dalla presenza di rinnovabili, simulazione e modellazione avanzate per la fusione nucleare, analisi avanzate di sistemi complessi anche per attività legate al trading dell'energia e di quelle commodities che fanno parte della catena del valore.



Nasce Eniquantic: la nuova società di Eni per lo sviluppo tecnologico del quantum computing

Molti operatori di reti di trasmissione di energia affermano di essere interessati a lavorare sul quantum nel lungo periodo, esplorando con vari gradi di approfondimento le possibilità offerte da questa tecnologia a 360 gradi. In Italia, ad esempio, il gestore della rete **Terna** ha adottato un approccio all'innovazione chiamato Modello 70 - 20 - 10, dove l'ultima cifra rappresenta il 10% dei progetti di innovazione portati avanti su tecnologie *disruptive* tra cui il quantum computing, sempre nell'ottica di individuare potenziali nuove soluzioni per l'ottimizzazione della rete.



Trasporti e logistica: risoluzione dei problemi NP-Hard

I trasporti costituiscono un altro ambito di applicazione delle tecnologie quantistiche molto interessante, in particolare per le potenzialità offerte dal quantum computing. I trasporti e la logistica sono estremamente complessi da gestire e da pianificare in termini computazionali, dato l'altissimo numero di variabili da considerare e i tempi stretti per l'elaborazione dei dati. In alcuni casi, le reti di trasporto urbano o le supply chain necessitano di attività di ottimizzazione che possono includere molte variabili interdipendenti, spesso non collegate direttamente al settore dei trasporti, ma che hanno comunque un potenziale impatto su di esso, come ad esempio i dati legati alla meteorologia.

La possibilità per i computer quantistici di elaborare simultaneamente molte combinazioni di soluzioni diverse permetterà di gestire i cosiddetti *Non-deterministic Polynomial-time Hard* (NP-Hard).

I problemi NP-Hard elaborati con i computer tradizionali richiedono tempi di calcolo che crescono esponenzialmente con la dimensione del problema analizzato, rendendo così la risoluzione esatta in molti casi di fatto impraticabile.

Due esempi tipici di questa categoria di problemi sono il *Travelling Salesman Problem* (TSP), il cui obiettivo è individuare il percorso più breve per visitare almeno una volta tutti i nodi del cammino per poi tornare al punto di partenza, e il *Vehicle Routing Problem* (VRP), utilizzato per l'assegnazione di rotte e percorsi ottimali a flotte di veicoli sottoposte a vincoli come quelli temporali.

Al crescere del numero di queste variabili i corrispondenti problemi ricadono nella categoria NP-hard rappresentando una sfida notevole in termini di complessità risolutiva.

Le problematiche legate alla gestione dinamica dei flussi sono state finora indirizzate prevalentemente con modelli euristici o con altri algoritmi di ottimizzazione. Questi modelli funzionano molto bene nelle casistiche in cui la variabilità è limitata ma sono poco scalabili e poco reattivi in caso di condizioni mutevoli. Il quantum computing potrà quindi fornire una soluzione reale ai limiti di scalabilità e reattività, riducendo i tempi di elaborazione rispetto ai sistemi HPC ad oggi disponibili.

Nel settore dei trasporti e della logistica questo si traduce, ad esempio, nella possibilità di considerare fenomeni meteorologici ed eventi straordinari all'interno dei modelli con maggiore flessibilità e garantendo al contempo una miglior accuratezza dei risultati. Questa capacità sarà particolarmente rilevante nei prossimi anni quando flotte di veicoli a guida autonoma si muoveranno accanto ai guidatori umani sulle nostre infrastrutture.

IBM propone diversi use case dove l'uso di macchine quantistiche contribuiscono all'ottimizzazione nel settore dei trasporti e della logistica, dalla gestione delle consegne dell'ultimo miglio in una grande città al routing sostenibile nel settore marittimo. Lo use case delle consegne dell'ultimo miglio ha coinvolto un gestore di veicoli commerciali dell'area urbana di New York. Il sistema è stato in quel caso progettato per pianificare rotte e consegne, tenendo in considerazione tutti i vicoli temporali, meteorologici e urbanistici della zona presa in considerazione. L'introduzione di un quantum layer nella gestione di queste consegne ha permesso di ottimizzare costi e tempi, con i conseguenti benefici ambientali, sociali ed economici.



[Exploring quantum computing use cases for logistics](#)

In Francia, **Pasqal** e **CMA CGM** hanno dato via nel 2024 ad una Proof of Concept (PoC) per dimostrare le potenzialità del quantum computing applicato alla gestione della logistica portuale, ed in particolare alla movimentazione di container, migliorando così le supply chain connesse. La PoC sfrutterà una macchina quantistica dedicata prodotta da Pasqal ed installata a Marsiglia, con il fine di favorire l'interscambio di conoscenze fra utilizzatori reali e operatori del computer quantistico. Il sistema permetterà di ottimizzare la gestione delle azioni di carico, scarico e movimentazione dei container in base a dei parametri predefiniti dalle aziende, per ridurre i costi e l'impatto ambientale.



[CMA CGM Group and Pasqal join forces to leverage quantum technologies for maritime transport and logistics](#)

Le tecnologie quantistiche possono fornire nuove modalità per affrontare quelle che oggi rappresentano delle sfide importanti nello sviluppo dei **veicoli a guida autonoma** o semi-autonoma, anzitutto aumentando la sicurezza delle comunicazioni e dei sistemi di navigazione dei veicoli mediante il quantum sensing.

Nel Capitolo 3 sono state illustrate alcune delle principali aziende e startup che stanno lavorando sulla sensoristica quantistica di nuova generazione e che sfruttano l'estrema precisione di questi dispositivi per la navigazione in tutti quei contesti dove i sistemi satellitari, come GPS e Galileo, non sono disponibili. In particolare, gli orologi atomici, gli accelerometri e i giroscopi quantistici rendono possibili servizi di Positioning, Navigation and Timing (PNT) quantistici con precisioni assimilabili a quelle ottenibili con la navigazione satellitare.

Questi nuovi sensori abilitano forme di navigazione inerziale estremamente performanti, utilizzabile sia in ambito dual-use sia come sistema di sicurezza ridondante per i veicoli a guida autonoma. Le applicazioni dual-use, con un potenziale uso sia civile sia nell'ambito della sicurezza, stanno guidando lo sviluppo di questa nicchia di mercato. Lo scopo principale è infatti quello di fornire soluzioni hardware/software che garantiscano la continuità dei servizi di positioning e navigation in qualsiasi condizione operativa.

La statunitense **Infleqtion** sta lavorando sulla tematica dei sensori quantistici per la navigazione inerziale avanzata con il progetto Quantum Enhanced Inertial Navigation Systems (Q-NAV), finanziato dal Governo britannico attraverso Innovate UK. L'azienda sta collaborando con la Royal Navy e con altri partner industriali per realizzare una piattaforma di navigazione inerziale che sfrutti le tecnologie quantistiche. I test con la Royal Navy in condizioni d'uso reale sono stati effettuati fra il 2024 ed il 2025, dimostrando l'efficacia della soluzione.



Infleqtion

Negli Stati Uniti, un raggruppamento di imprese che comprende **Lockheed Martin**, **Q-CTRL**, e **AOSense** sta lavorando ad un sistema di navigazione quantistica per quegli ambienti in cui i sistemi di navigazione satellitare non sono disponibili per motivazioni naturali o per interferenze intenzionali. Il sistema è progettato per abilitare una navigazione quantistica autonoma, Quantum-enabled Inertial Navigation System (Qu-INS), per droni e veicoli sfruttando un interferometro atomico di nuova generazione (vedi Capitolo 3). Un sistema di questo tipo è quindi immune ad attività di jamming e/o di danneggiamento dei segnali di navigazione satellitare, permettendo di ampliare la capacità di movimento ad alta precisione dei mezzi che lo utilizzano.



#video

Quantum Navigation:
A New Way to Find Your
Way

L'evoluzione di questo approccio tecnologico vede come prossimo e probabile ambito di espansione quello della guida autonoma di mezzi terrestri ed aerei nel settore civile. Una serie di test a riguardo è stato realizzato nel 2024 nella rete della metropolitana di Londra. Il gruppo di ricerca Imperial Centre for Cold Matter dell'**Imperial College London** ha dimostrato le potenzialità di un accelerometro quantistico ad alte prestazioni che ha permesso ai ricercatori di definire la posizione del treno della metropolitana su cui era montato senza bisogno di segnali esterni. Applicato alla rete di una metropolitana, un sistema di questo tipo permetterebbe di abbattere i costi di implementazione e gestione di tutta l'infrastruttura di localizzazione dei treni. Il risparmio di tempo e costi potrebbe essere quindi rilevante, sia nella fase di costruzione sia in quella di gestione dell'infrastruttura.



'It's the perfect place': London
Underground hosts tests for
'quantum compass' that
could replace GPS

Nonostante i risultati ottenuti e quelli promessi da queste tecnologie in ambito smart grids e trasporti, le aziende e i centri di ricerca devono affrontare problematiche ancora oggi molto rilevanti per utilizzare questi strumenti in massa in contesti reali. Le sfide più pressanti arrivano dalla miniaturizzazione dei componenti e dai consumi energetici, così come dalla mancata standardizzazione delle interfacce hardware e software.

Un'ulteriore sfida che sta emergendo riguarda l'integrazione delle tecnologie quantistiche nelle infrastrutture e nei sistemi commerciali già esistenti. Questo processo richiede di assicurare la retrocompatibilità con gli standard in uso, la scalabilità delle nuove soluzioni e l'interoperabilità fra componenti hardware e software eterogenei.

Proprio il tema dell'integrazione di queste tecnologie nei prodotti e nelle infrastrutture esistenti sembra essere ad oggi uno degli ostacoli più rilevanti per lo sviluppo delle quantum technologies nei settori dell'energia e dei trasporti.

4.3 Financial Services

Il settore finanziario e quello assicurativo sono tra i più esposti e, al tempo stesso, fra i più interessati all'emergere delle tecnologie quantistiche. Queste potranno essere usate per analizzare ed elaborare in tempi estremamente ridotti, fino al quasi real-time, enormi volumi di dati per supportare decisioni critiche nel trading, nella gestione del rischio o nell'allocazione degli asset finanziari. Inoltre, potranno essere usate per implementare strumenti avanzati di sicurezza per proteggere comunicazioni e transazioni. Gli investimenti di grandi gruppi bancari e assicurativi nel quantum rappresentano dunque una risposta ad una sfida strategica e al contempo uno strumento per rafforzare la competitività del settore nel medio-lungo periodo.

Le applicazioni più rilevanti secondo un'analisi proposta da McKinsey saranno:

- Ottimizzazione di portafogli finanziari
- Simulazioni rapide e avanzate di indicatori di rischio e pricing di assets
- Individuazione di frodi e attività di anti-money laundering
- Credit scoring e calcolo della probabilità di insolvenza
- Ottimizzazione delle operazioni e del back office

Una ricerca pubblicata da Evident nel 2025 evidenzia l'interesse del settore bancario per le tecnologie quantistiche, con l'80% dei 50 gruppi bancari analizzati che hanno in essere attività in questo ambito o hanno manifestato un'intenzione di avviarle. Le tecnologie quantistiche legate alle comunicazioni sono considerate importanti per garantire la sicurezza delle transazioni e delle comunicazioni finanziarie, mentre il quantum computing, oltre che per il tema della cybersecurity, viene ritenuto utile per la risoluzione di diversi tipi di problemi, tra cui ottimizzazione e fraud detection.

Gestione del rischio e protezione delle informazioni

Il report vede come banca trailblazer nell'adozione di tecnologie quantistiche la statunitense JP Morgan Chase. Come strong second sono indicati la britannica HSBC e l'italiana Intesa Sanpaolo.



Special Edition | Banks'
Quantum Solace

Una delle motivazioni pratiche che sta spingendo molti enti del settore finanziario e assicurativo nell'implementare soluzioni sicure basate sulle quantum communication, e in particolare sulla QKD, è il timore di **attacchi Harvest Now, Decrypt Later (HNDL)**. Questa tipologia di attacchi si basa sulla possibilità di intercettare e archiviare oggi informazioni sensibili per poi decrittellarle in futuro, quando sarà disponibile la potenza di calcolo necessaria ad eseguire l'algoritmo di Shor (vedi Capitolo 1).

Per ovviare a questa tipologia di attacchi diventa necessario criptare fin da subito le comunicazioni e i database contenenti informazioni sensibili con le tecnologie più *future-proof* disponibili, come la QKD, poiché molti dei dati considerati critici oggi manterranno, del tutto o quasi, la loro rilevanza anche nel prossimo futuro. Il settore finanziario è particolarmente esposto agli attacchi HNDL per la quantità di transazioni che gestisce quotidianamente e per la necessità di conservare alcuni dati per periodi di tempo molto lunghi, fino a 10 anni.

Toshiba è uno degli attori più attivi nell'implementazione di applicazioni QKD per il mondo finanziario, con collaborazioni con grandi gruppi bancari come HSBC (il funzionamento della QKD è stato presentato nel Capitolo 3). Il sistema QKD di Toshiba è progettato per essere facilmente integrato nelle infrastrutture IT esistenti, aggiungendo un layer di protezione. Questo approccio è portato avanti da molti player del settore, sia grandi aziende sia startup.

Oltre alla QKD, sempre più spesso vengono implementate soluzioni che impiegano tecnologie considerate *quantum-safe* come gli algoritmi di **Post-Quantum Cryptography (PQC)**.

Nel 1995, l'articolo di Peter W. Shor "Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer" ha dimostrato che un opportuno algoritmo, sfruttando la potenza di calcolo di un computer quantistico, nel momento in cui fosse stato disponibile, sarebbe stato in grado di violare i protocolli standard di crittografia a chiave pubblica utilizzati comunemente all'epoca.

Oggi, a distanza di trent'anni, essi costituiscono ancora uno standard di sicurezza adottato in una quota significativa delle comunicazioni sicure che transitano su reti informatiche, rendendo la dimostrazione di Shor di estrema attualità. Lo stesso calcolo necessario per rompere lo schema crittografico RSA necessiterebbe di un tempo enorme (trilioni di anni) con un sistema di calcolo ad alte prestazioni classico, ma solo poche ore con un computer quantistico sufficientemente coerente e stabile.

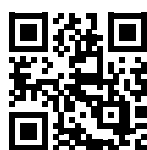
Le PQC non utilizzano direttamente tecnologie quantistiche dal punto di vista fisico, bensì sono algoritmi classici in grado di essere eseguiti su computer tradizionali, che però sono in grado di resistere ad attacchi quantistici. Molte aziende e startup stanno lavorando a tecniche di PQC; tuttavia, sono ancora poche quelle che si focalizzano sull'implementazione di questa tecnologia in un ambito fortemente regolamentato come quello finanziario.

Cryptonext Security è una startup francese che ha sviluppato una serie di strumenti per aggiungere un layer di protezione ai dati e alla loro trasmissione in ottica *quantum-safe*. L'azienda ha implementato una piattaforma modulare che analizza i sistemi di comunicazione esistenti, integrandosi in essi. Cryptonext Security propone un sistema basato sulla transizione graduale dalla crittografia classica verso quella PQC. Questo approccio progressivo è stato pensato per tutti quegli ambiti altamente regolamentati, come quello bancario o assicurativo, dove ogni elemento deve essere verificato con estrema attenzione. La startup collabora già oggi con grandi gruppi bancari e industriali europei



Cryptonext Security

PQShield è uno spinoff dell'Università di Oxford specializzata nell'implementare soluzioni hardware e software nell'ambito PQC. La natura deep tech della startup ha reso possibile la sua partecipazione a tavoli di definizione degli standard internazionali relativi alla sicurezza post-quantistica (NIST, ESTSI, ISO). PQShield propone soluzioni ibride e scalabili pensate per tutti i settori in cui la sicurezza delle comunicazioni è ritenuta fondamentale. Fra i casi d'uso che l'azienda sta sviluppando, oltre a quelli più tradizionali, ne emergono alcuni che permettono di comprendere come la tecnologia PQC possa essere applicata in molteplici ambiti, come gli Industrial IoT – Internet of Things e l'Identity e Paymentech.



PQShield

Un approccio simile è proposto da **pQCee**, focalizzata sulla post-quantum cybersecurity. L'azienda di Singapore si concentra su tutti quegli ambiti ad alta intensità di dati che necessitano di PQC. pQCee lavora in particolare su sistemi che siano compatibili con gli standard già oggi in essere, in particolare nei settori ad alta regolamentazione. Uno dei primi use case gestiti dall'azienda riguarda la protezione dell'autenticità e dell'integrità dei dati relativi alle transazioni finanziarie. pQCee ha un ruolo di primo piano nella diffusione della tecnologia PQC nelle istituzioni e nelle aziende del sud-est asiatico, dove molte attività potenzialmente molto impattanti sulla privacy e la sicurezza sono eseguite su dispositivi mobili e con protezione non adeguata.



pQCee

In particolare, tra gli indicatori di **rischio finanziario** più accuratamente e velocemente calcolabili da un quantum computer, si annoverano il Value at Risk (VaR) e le perdite medie attese Conditional Value at Risk (CVaR), metriche complesse da calcolare a causa della grande quantità di variabili presenti.

4.4 Considerazioni Finali

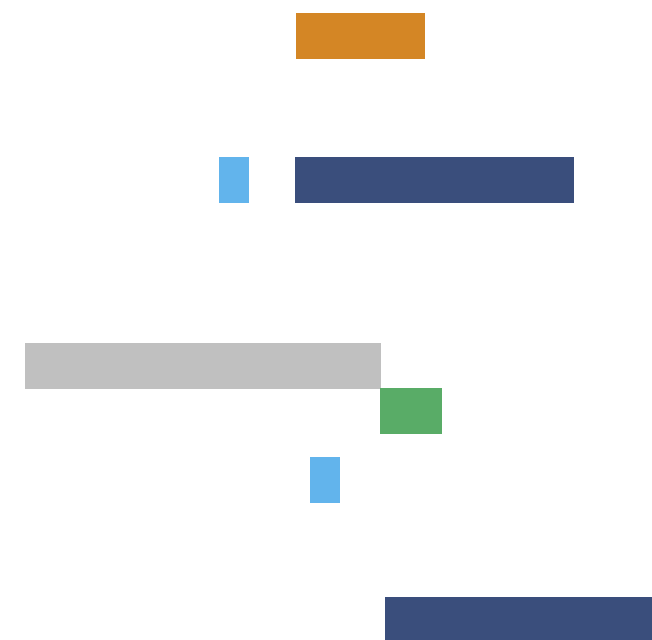
Le tecnologie quantistiche si stanno affermando in vari settori come affinamento di tecnologie esistenti mentre in altri ambiti impatteranno così profondamente da ridefinire il modo in cui vengono concepiti il calcolo ad alte prestazioni, la sicurezza delle comunicazioni, le modalità di misurare l'infinitamente piccolo.

Il quantum sensing proseguirà la sua strada verso la miniaturizzazione e la certificazione di componenti e macchinari. Uno sviluppo probabile vedrà la comparsa di dispositivi indossabili e clinicamente validati. I tempi di questa rivoluzione della sensoristica non sono al momento determinabili.

La quantum communication vede l'interesse di grandi gruppi industriali, di centri di ricerca e di startup per il suo enorme potenziale commerciale, sia in ambito civile sia in quello dual-use. Questa famiglia di tecnologie risponde in modo efficace e concreto ad una serie di richieste provenienti da istituzioni, gruppi di telecomunicazioni, enti commerciali, aziende e apparati militari: tutti soggetti che hanno la necessità crescente di garantire la solidità delle reti di comunicazione e la sicurezza delle informazioni trasmesse.

Nel quantum computing è prevista la realizzazione di sistemi *fault-tolerant*, con la capacità di eseguire calcoli sotto una determinata soglia di errore che li rende utilizzabili a partire dal 2030 circa. La transizione, prevista nei prossimi 5/10 anni circa, non sarà probabilmente lineare. Tuttavia, non è assolutamente chiaro quale tecnologia o gruppo di tecnologie diventerà lo standard. Molte aziende stanno cercando di ridurre questa incertezza lavorando a piattaforme modulari, ibride, in grado di adattarsi a differenti tipologie di macchine quantistiche e di integrarsi con i sistemi di HPC classico. La stessa incertezza sullo standard dominante si delinea anche lato software e algoritmico. Anche da questo punto di vista, la strada verso piattaforme ibride e adattabili sembra una risposta concreta alle sfide esistenti.

Il tema forse più rilevante a livello sistemico nei prossimi 5 anni, a prescindere dalla tecnologia quantistica, sarà quello della **sovranità quantistica**: diventerà sempre più strategico avere il controllo sullo sviluppo della tecnologia e sulla supply chain per implementarla. Il controllo dell'ecosistema sarà un punto cruciale per assicurarsi il vantaggio competitivo che le tecnologie quantistiche promettono, soprattutto per ciò che riguarda il quantum computing.



Informazioni su: Intesa Sanpaolo Innovation Center

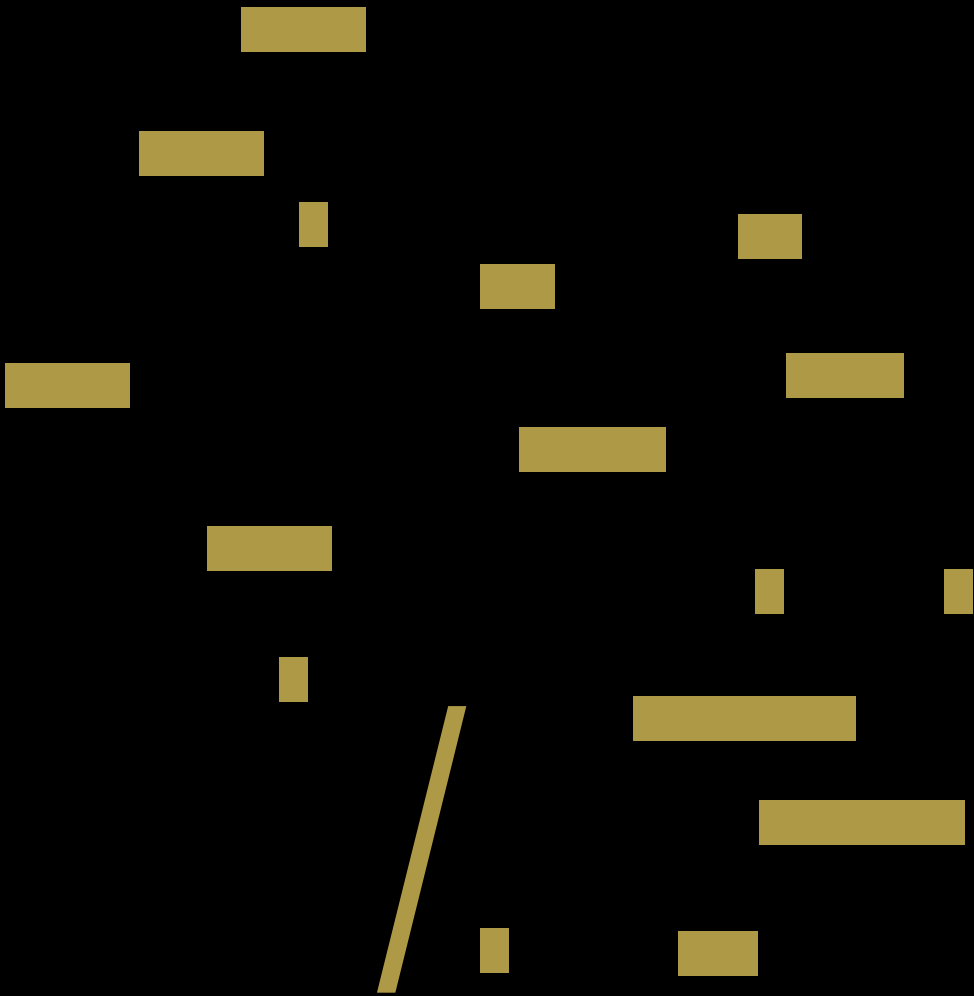
Intesa Sanpaolo Innovation Center è la società del Gruppo Intesa Sanpaolo dedicata all'innovazione di frontiera. Esplora scenari e trend futuri, sviluppa progetti multidisciplinari di ricerca applicata, supporta startup, accelera la business transformation delle imprese secondo i criteri dell'Open Innovation e della Circular Economy, favorisce lo sviluppo di ecosistemi innovativi e diffonde la cultura dell'innovazione, per fare di Intesa Sanpaolo la forza trainante di un'economia più consapevole, inclusiva e sostenibile.

Con sede al 31esimo piano del grattacielo di Intesa Sanpaolo e un network nazionale e internazionale di hub e laboratori, l'Innovation Center è un abilitatore di relazioni con gli altri stakeholder dell'ecosistema dell'innovazione – come imprese, startup, incubatori, centri di ricerca, università, enti nazionali e internazionali – e un promotore di nuove forme d'imprenditorialità nell'accesso ai capitali di rischio, con il supporto di fondi di venture capital, anche grazie alla controllata Neva SGR.

Informazioni su: Fondazione LINKS

Leading Innovation and Knowledge for Society è un ente di ricerca e innovazione privato che vanta come soci fondatori il Politecnico di Torino e la Fondazione Compagnia di San Paolo. Contribuisce a un processo di sviluppo fondato su principi di coesione sociale e di sostenibilità, al fine di favorire il progresso nella ricerca scientifica e tecnologica, nonché la crescita culturale e professionale della collettività. I valori fondanti dell'operato di LINKS sono la produzione, l'attrazione, la conservazione, l'elaborazione critica e il trasferimento della conoscenza nei campi dell'ingegneria, dell'architettura e delle altre scienze politecniche, anche attraverso i servizi al territorio.

La Fondazione persegue obiettivi di utilità sociale, allo scopo di favorire lo sviluppo civile, culturale ed economico dei contesti in cui essa opera. LINKS opera come piattaforma di trasferimento della conoscenza da atenei, centri di ricerca o dalla conoscenza presente in letteratura, rendendola disponibile all'industria, alla pubblica amministrazione, agli enti culturali e al terzo settore. Il ruolo di LINKS è quello di far maturare una tecnologia, o una soluzione innovativa, operando con impatto grazie alla presenza di ricercatori con forti competenze tecnico-scientifiche.



INTESA SANPAOLO
INNOVATION CENTER