

The background is a solid black field. Scattered across it are numerous gold-colored geometric shapes, primarily rectangles of varying sizes and orientations. A single, thin, gold diagonal line extends from the upper right towards the center. The overall effect is a modern, minimalist, and abstract composition.

QUANTUM TECHNOLOGIES

X-PLORE



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

02

2025 Market and Ecosystem

2.1	Mercato	29
2.2	Ecosistemi	34
2.3	Considerazioni finali	51

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

The background is a dark blue field filled with numerous glowing, out-of-focus lines in shades of cyan and yellow, creating a sense of depth and movement. Scattered throughout the scene are various geometric shapes, including squares, rectangles, and bars, in white, light blue, and grey. Some of these shapes appear to be floating or falling, adding to the abstract, digital aesthetic.

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

(incluse 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

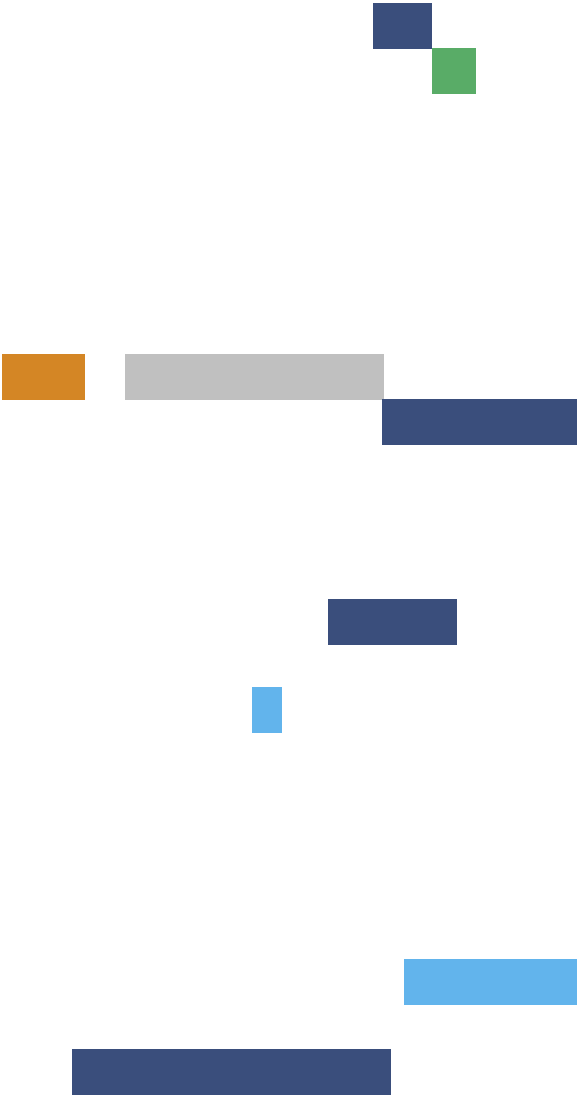
Il Capitolo 1 ha presentato i fondamenti delle tecnologie quantistiche e le principali famiglie applicative, mentre in questo secondo capitolo l'attenzione si concentra sull'evoluzione del mercato globale del quantum, analizzandone la struttura, gli attori chiave e le prospettive di crescita.

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.

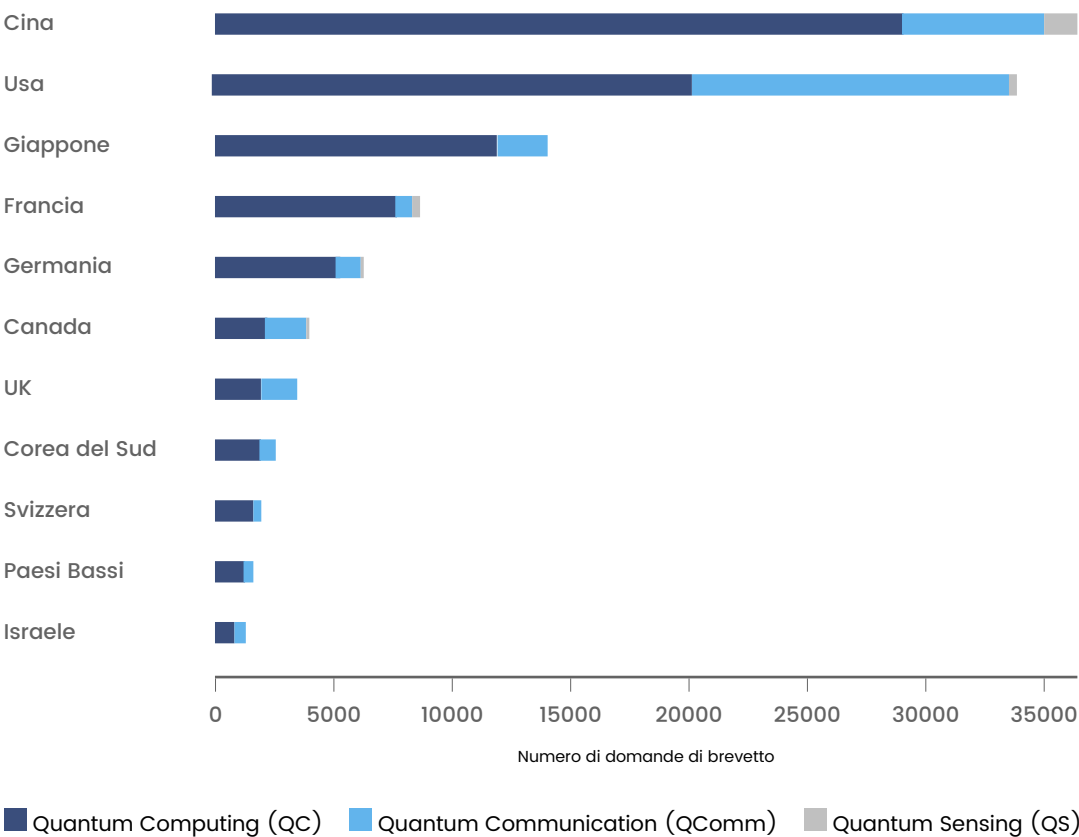
Spostando il focus sull'Unione Europea, gli investimenti hanno superato oltre 8 miliardi di dollari in fondi pubblici per le tecnologie quantistiche, posizionando l'UE al secondo posto globale. Questo valore include sia

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.

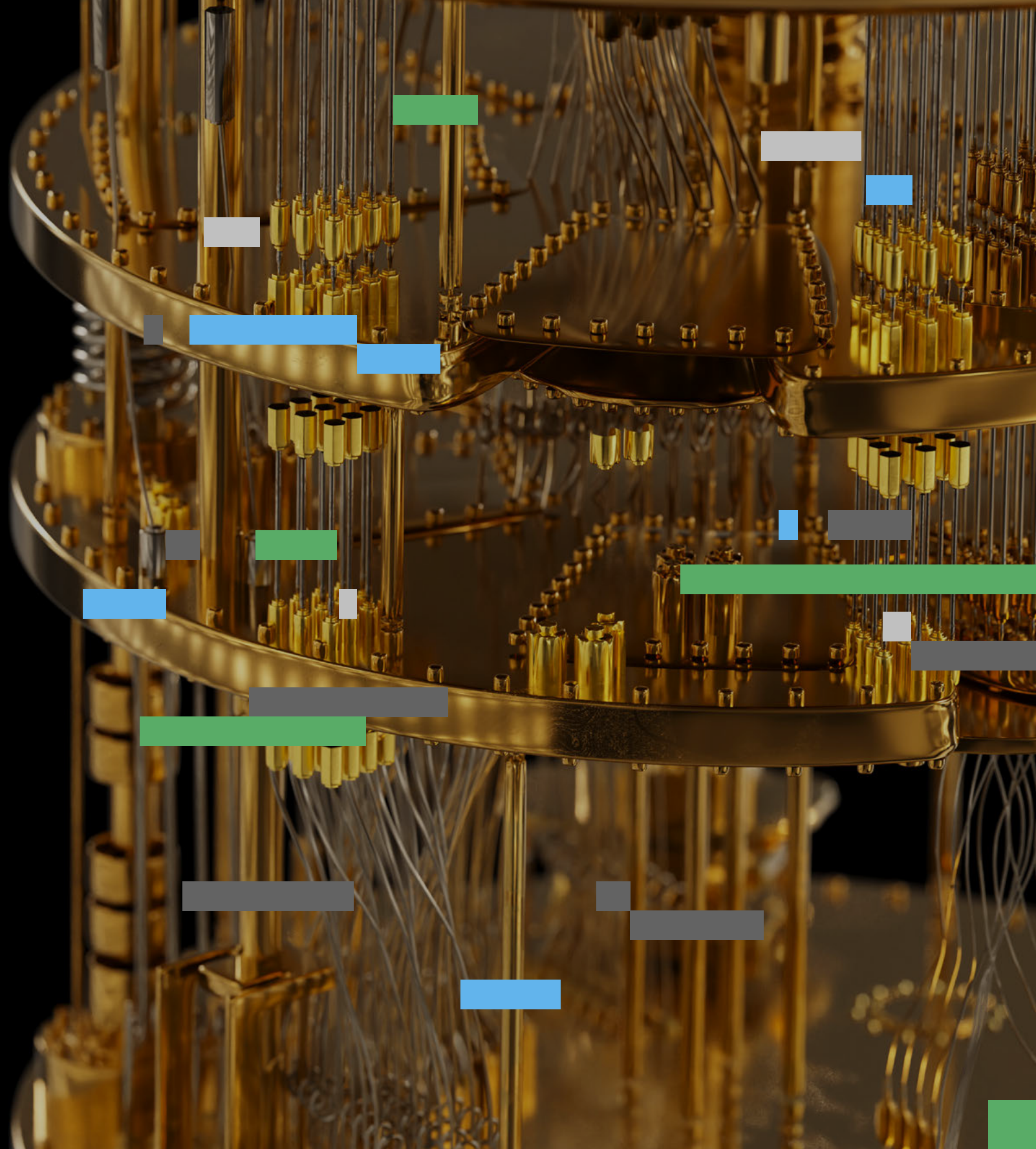
Domande di brevetto in tecnologie quantistiche per Paese e area (2000-2024)

Fonte: elaborazione Fondazione LINKS su dati McKinsey



03/

Technologies

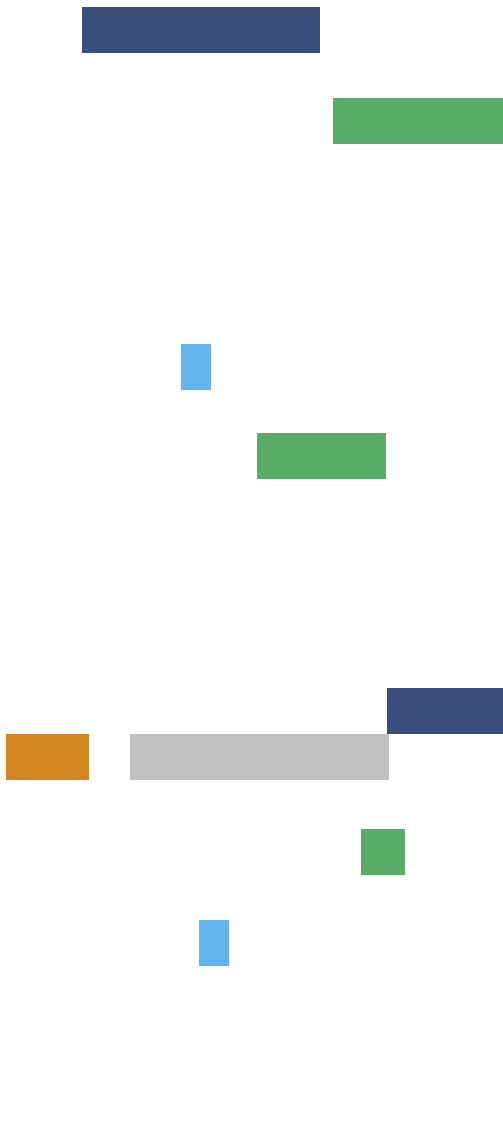


Nei settori della sensoristica, delle comunicazioni e del computing, come è stato presentato nel Capitolo 2, il mercato può essere considerato interessante per fatturato, distribuzione geografica e numero dei player coinvolti.

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.

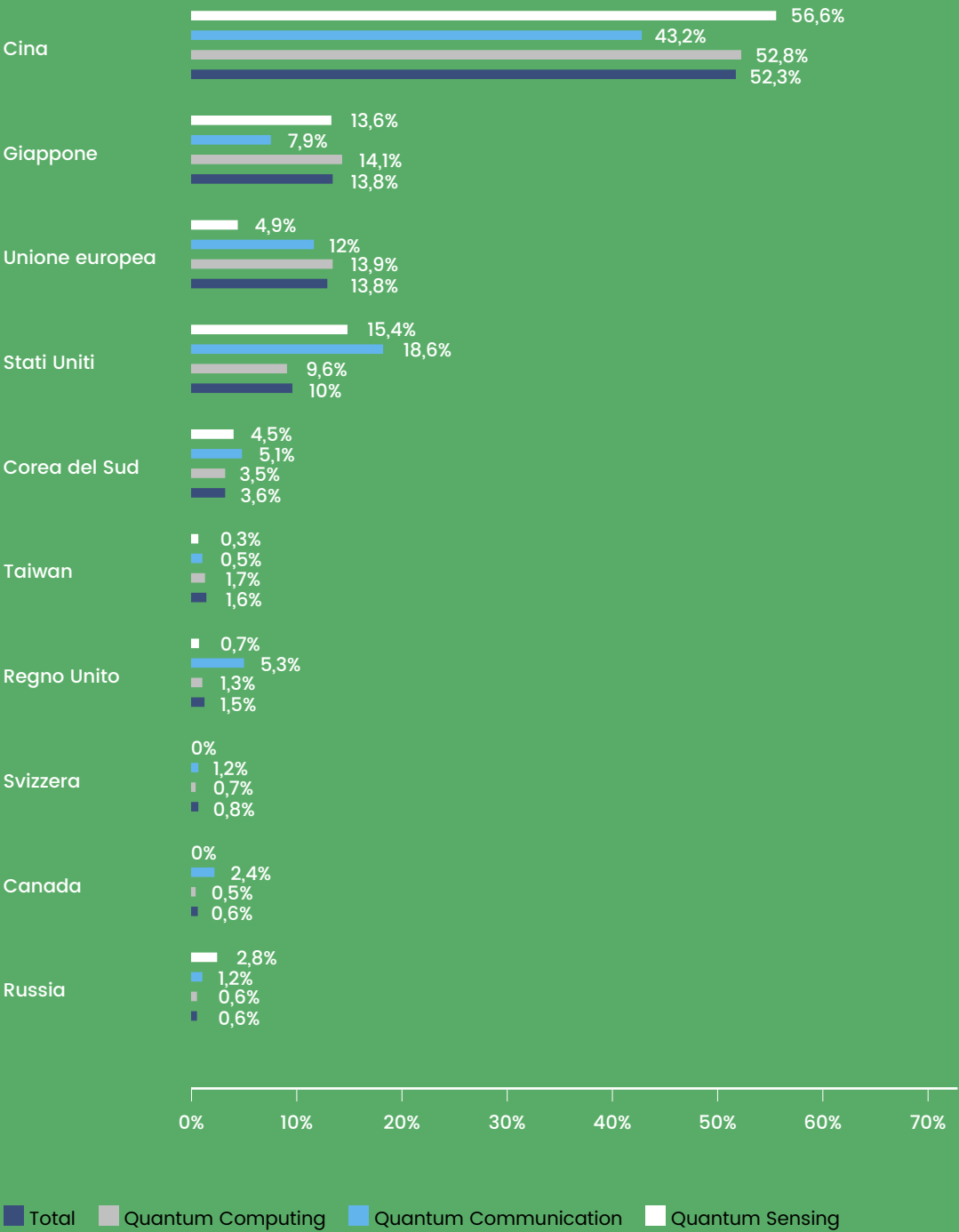
Da molti punti di vista le tre macrocategorie quantum rappresentano altrettante *killer application* che consentono al settore di espandersi e di raggiungere quella massa critica che alimenta l'innovazione.

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



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

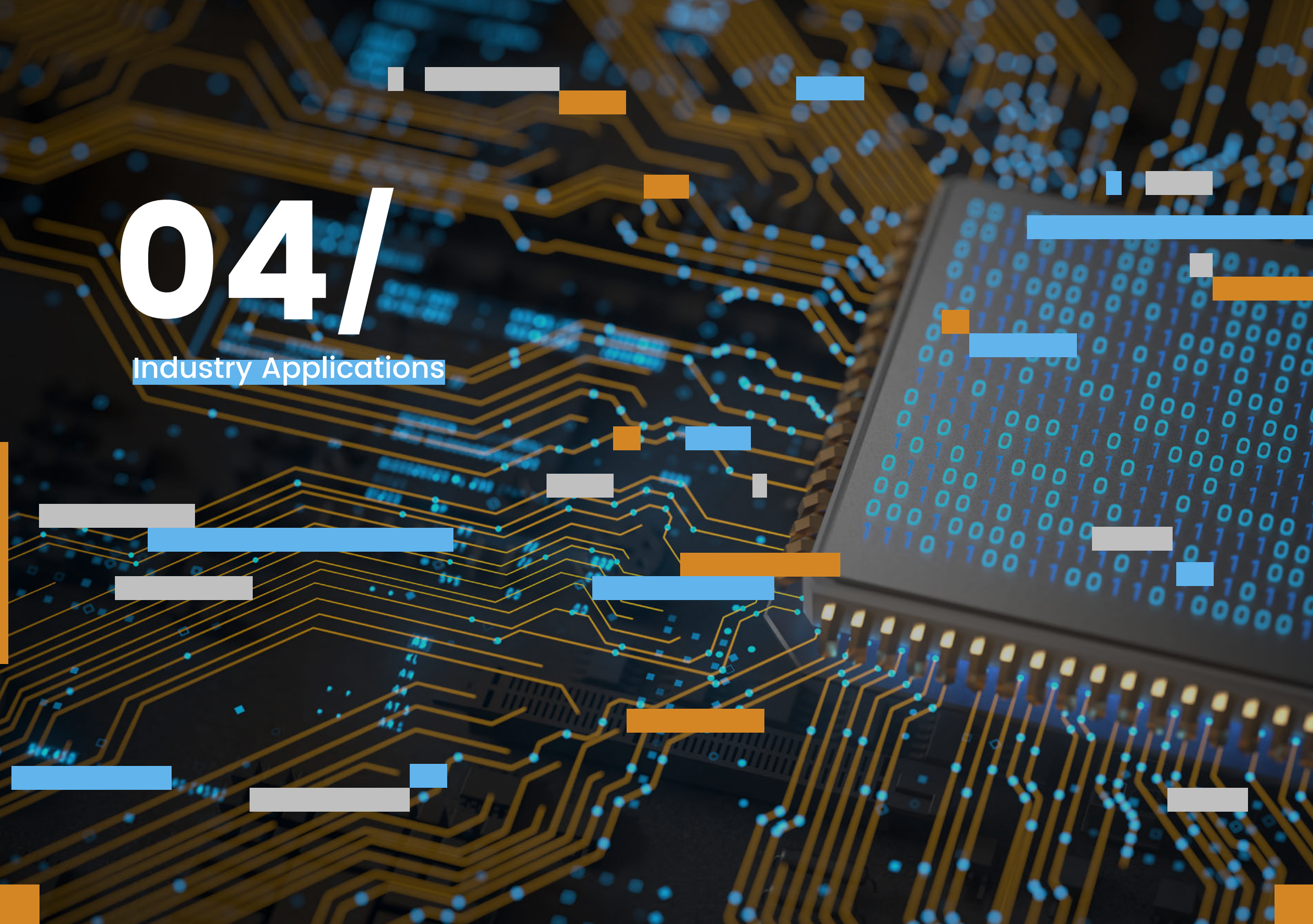


Economicità operativa

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



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.

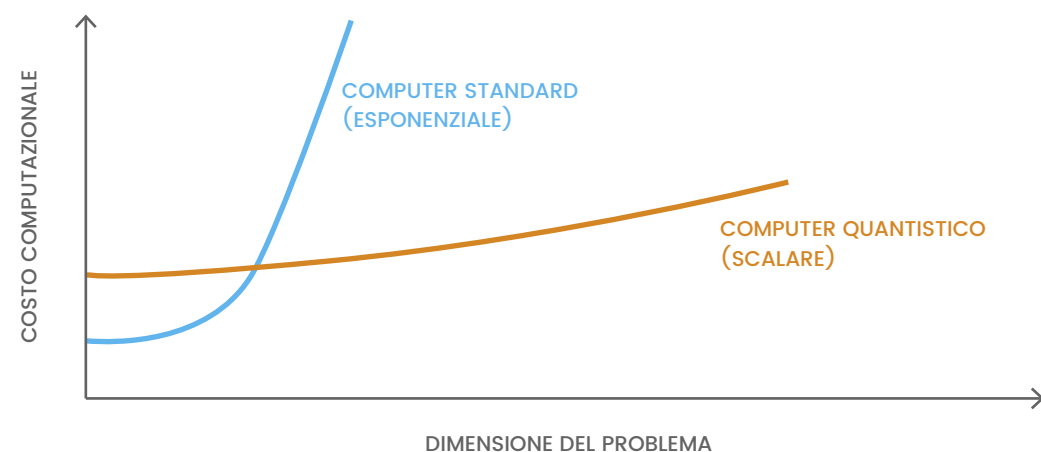
Il perimetro di utilizzo di queste tecnologie si sta progressivamente allargando anche a comparti industriali diversi da quelli per cui le stesse erano state originariamente pensate e progettate. Tale tendenza è peraltro comune a molte tecnologie emergenti in grado di risolvere problemi complessi: ad 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

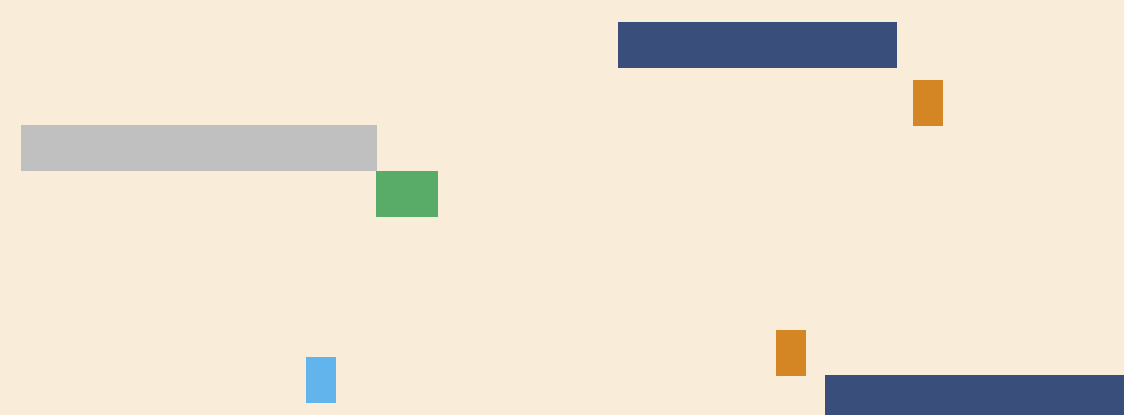
Quantum Computing as a Service

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*

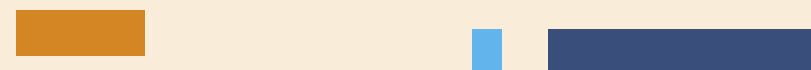


Microsoft Azure Quantum



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.



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.

