

Ecosistema industriale italiano delle tecnologie quantistiche
*Analisi dei risultati della consultazione pubblica condotta dal
Ministero delle imprese e del Made in Italy*



Ministero delle Imprese
e del Made in Italy

POLIMI SCHOOL OF
MANAGEMENT



osservatori.net
digital innovation

Gruppo di lavoro

Il Report è stato realizzato in collaborazione tra il Ministero delle Imprese e del Made in Italy e l'Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano.

Gruppo di lavoro del Ministero delle Imprese e del Made in Italy:

- Valeria Vinci, Divisione Economia digitale e nuove tecnologie abilitanti, Direzione generale per le nuove tecnologie abilitanti (DGTEC)
- Fabrizio Ciarlo, Divisione Economia digitale e nuove tecnologie abilitanti DGTEC
- Nicola Cafaro, Divisione Economia digitale e nuove tecnologie abilitanti DGTEC
- Angelo Leone, Divisione Economia digitale e nuove tecnologie abilitanti DGTEC

Contatti: quantum@mise.gov.it

Gruppo di lavoro dell'Osservatorio:

- Donatella Sciuto, Responsabile Scientifico
- Paolo Cremonesi, Responsabile Scientifico
- Alessandro Perego, Responsabile Scientifico
- Alessandro Piva, Direttore
- Valeria Portale, Direttore
- Marina Natalucci, Direttore
- Beatrice Goretti, Ricercatrice
- Margherita Moroni, Analista
- Giorgia Borsa, Community Coordinator
- Maurizio Ferrari Dacrema, Ricercatore

L'Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano vuole rendersi un punto di riferimento precompetitivo sul tema a livello italiano, coinvolgendo una community di aziende interessate, lato domanda e offerta di tecnologia, istituzioni ed esperti a livello italiano e internazionale. In un contesto caratterizzato da poca chiarezza sullo stato dell'arte delle tecnologie, sui benefici abilitati e sui possibili ambiti applicativi, l'Osservatorio intende creare una base di conoscenza solida e indipendente per preparare le imprese italiane a cogliere le opportunità in gioco, anziché subirle o rincorrerle. Con questo obiettivo, la Ricerca annuale combina la prospettiva manageriale con quella tecnologica grazie all'unione delle esperienze del Dipartimento di Ingegneria Gestionale e del Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria. I risultati ottenuti sono oggetto di discussione e confronto all'interno di un piano di workshop che ogni anno coinvolge oltre 100 referenti aziendali e istituzionali.

Per qualsiasi commento e richiesta di informazioni: marina.natalucci@polimi.it

I dati e le evidenze prodotte dall'Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano inseriti nel presente rapporto sono soggetti a **Copyright © Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Gestionale**. I dati utilizzati per la redazione del presente documento si basano su analisi svolte dall'Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano salvo ove diversamente indicato.

Il rapporto non può essere oggetto di diffusione, riproduzione e pubblicazione né in tutto né in parte e con riferimento a ogni loro contenuto testuale, grafico e di qualunque altra natura, anche per via telematica (per esempio tramite siti web, intranet aziendali, ecc.), e ne viene espressamente riconosciuta la piena proprietà del Ministero delle Imprese e del Made in Italy e del DIG – Dipartimento di Ingegneria Gestionale del Politecnico di Milano. Fermo quanto sopra, le figure contenute nei Rapporti possono essere utilizzate solo eccezionalmente e non massivamente e solo a condizione che venga sempre citato il Rapporto da cui sono tratte.

Sommario

1. TECNOLOGIE QUANTISTICHE	1
1.1 Cosa sono le tecnologie quantistiche	1
A. Le sinergie tra le varie tecnologie quantistiche	3
1.2 La catena del valore delle Tecnologie Quantistiche.....	4
1.3 Stato dell'arte delle tecnologie quantistiche e trend di sviluppo	6
2. Scenario italiano	11
2.1 Stato dell'arte.....	11
A. Un settore industriale emergente	11
B. Le Infrastrutture esistenti.....	15
C. Il PNRR	16
D. Trasferimento tecnologico	18
3. Sintesi dei risultati della consultazione.....	22
3.1 Contesto e anagrafica delle consultazioni.....	22
3.2 Risultati delle consultazioni per tecnologia	24
A. Quantum Computing: mercato, infrastrutture e produzione.....	25
B. Quantum Communication: mercato, infrastrutture e produzione	26
C. Quantum Sensing: mercato, infrastrutture e produzione	27
3.3 Risultati delle consultazioni per area d'intervento.....	28
A. Direzione governativa e coordinamento	29
B. Infrastrutture e produzione	30
C. Risorse umane e formazione	30
D. Finanziamenti.....	31
4. Scenario internazionale	32
4.1 Mercato globale	32
A. Stato dell'arte: gli investimenti pubblici nel mondo.....	32
B. Stato dell'arte: lo sviluppo della filiera dell'offerta globale	33
C. Stato dell'arte: il mercato della domanda globale e le opportunità future	36
4.2 Le strategie nazionali dei singoli Paesi e le politiche pubbliche	39

4.3 Il mercato europeo.....	43
A. Stato dell'arte: gli investimenti pubblici in Europa	43
B. Unione europea – strategie e politiche pubbliche	44
5. Sintesi del posizionamento dell'Italia: punti di forza, debolezza, opportunità e rischi	48
6. Aree di intervento e principali politiche suggerite	50
Appendice.....	54
Scheda 1 – Strategie Nazionali Virtuose	54
Scheda 2 - Dettaglio sullo scenario internazionale.....	63
Stati Uniti.....	65
Cina.....	67
Regno Unito.....	68
Repubblica di Corea.....	73
Giappone	74
Canada.....	75
Unione Europea	77
Germania	80
Francia.....	81
Paesi Bassi	82
Spagna	83
SCHEDA 3 - INIZIATIVE DELL'UNIONE EUROPEA IN AMBITO QT	85

Indice delle figure

Figura 1 – Value chain delle tecnologie Quantistiche, Osservatorio Quantum Computing e Communication, Politecnico di Milano	4
Figura 2 – Scenario infrastrutturale del Quantum Computing ed esempi di architettura	7
Figura 3 – Annunci di progetto pubblici di Quantum Computing e Quantum Communication in Italia per settore. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication	14
Figura 4 – Distribuzione della tipologia di organizzazione partecipante alla consultazione MIMIT sulle QT	23
Figura 5 – Distribuzione territoriale dei partecipanti alla consultazione MIMIT sulle QT	23
Figura 6 – Distribuzione delle tipologie di tecnologia quantistica sviluppata dalle imprese partecipanti alla consultazione MIMIT sulle QT	24
Figura 7 – Distribuzione delle aree di interesse maggiormente segnalate dai rispondenti	29
Figura 8 – Rappresentazione dei finanziamenti pubblici internazionali. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication	33
Figura 9 – <i>Rappresentazione di aziende native del settore quantistico per area geografica. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication</i>	34
Figura 10 – Cronologia dei finanziamenti raccolti dalle aziende native del settore quantistico. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication	34
Figura 11 – Annunci di progetto pubblici sul Quantum Computing nel mondo. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication	37
Figura 12 – Annunci di progetto pubblici sulla Quantum Communication nel mondo. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication	38
Figura 13 – Strategie nazionali sulle Tecnologie Quantistiche e principali pilastri. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication	42
Figura 14 – Mappa dei finanziamenti europei per le tecnologie quantistiche (in milioni di euro). Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication	44

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Brevetti QT concessi, per sede centrale, 2000-2023. Fonte: McKinsey.....	12
Tabella 2 – Numero di aziende native di Quantum Technologies per Paese nel 2024. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication	13
Tabella 3 – Distribuzione delle aziende consultate lungo la catena del valore: Quantum Computing.....	25
Tabella 4 – Distribuzione delle aziende consultate lungo la catena del valore: Quantum Communication.....	26
Tabella 5 – Distribuzione delle aziende consultate lungo la catena del valore: Quantum Sensing	27
Tabella 6 – Descrizione iniziative realizzate dall'Unione Europea sulle QT.	85

Elenco degli Acronimi

AI (Intelligenza artificiale)

HPC (High Performance Computing)

ICT (Information and Communication Technology)

KPI (Key Performance Indicator)

PMI (Piccole e Medie Imprese)

PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza)

PQC (Post-Quantum Cryptography)

QKD (Quantum Key Distribution)

QT (Quantum Technologies)

TRL (Technology Readiness Level)

UE (Unione Europea)

VC (Venture Capital)

Acronimi di enti di ricerca e istituzioni:

CINI (Consorzio Interuniversitario Nazionale per l'Informatica)

CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche)

FBK (Fondazione Bruno Kessler)

ICSC (Centro Nazionale di Ricerca in HPC, Big Data e Quantum Computing)

IIT (Istituto Italiano di Tecnologia)

INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare)

INRIM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica)

MIMIT (Ministero delle Imprese e del Made in Italy)

MISE (Ministero dello Sviluppo Economico)

NQSTI (National Quantum Science and Technology Institute)

Acronimi di progetti:

EuroHPC JU: European High-Performance Computing Joint Undertaking

EuroQCI: European Quantum Communication Infrastructure

EuroQCS: European Quantum Computing & Simulation Infrastructure

IQB: Italian Quantum Backbone

1. TECNOLOGIE QUANTISTICHE

1.1 COSA SONO LE TECNOLOGIE QUANTISTICHE

Le Quantum Technologies (QT) si collocano tra le tecnologie critiche per la competitività dei Paesi, con un potenziale rivoluzionario in numerose applicazioni e significativi impatti sulla sicurezza nazionale. Nonostante siano ancora tecnologie in fase prototipale, destinate a consolidarsi nel prossimo decennio, gli sforzi congiunti della ricerca pubblica e industriale ne stanno accelerando lo sviluppo.

La prima rivoluzione quantistica, agli inizi del Novecento, ha determinato la nascita della meccanica quantistica, portando allo sviluppo di tecnologie rivoluzionarie, come il transistor e il laser, che hanno plasmato il mondo moderno. La seconda rivoluzione quantistica, iniziata negli anni '80, ha spostato l'attenzione sulla capacità di manipolare direttamente le proprietà di singole particelle quantistiche - come atomi, fotoni ed elettroni - attraverso principi quali la *sovrapposizione degli stati*¹ e l'*entanglement*². Questa nuova fase promette di trasformare ulteriormente la tecnologia.

Le QT hanno il potenziale di risolvere problemi complessi che finora sembravano irrisolvibili, aprendo nuove strade per la scoperta di farmaci innovativi o per la risoluzione di problemi di ottimizzazione che coinvolgono milioni di variabili, come nel caso della logistica o della gestione finanziaria. Inoltre, potrebbero abilitare la creazione di reti di comunicazione ultrasicure, resistenti a interferenze esterne, e consentire lo sviluppo di sensori ad altissima precisione, in grado di monitorare, ad esempio, l'attività magnetica cerebrale o cardiaca con una precisione senza precedenti, o di realizzare sistemi di navigazione autonomi in ambienti privi di GPS.

Tuttavia, il rapido progresso delle tecnologie quantistiche solleva anche preoccupazioni circa le potenziali minacce che potrebbero derivarne. In particolare, i computer quantistici potrebbero diventare strumenti potenti per gli attacchi informatici, mettendo a rischio la sicurezza di alcuni sistemi crittografici tradizionali. Questa nuova realtà potrebbe esporre dati sensibili, come in ambito difesa o finanza, a grandi vulnerabilità.

Per questo motivo, è fondamentale orientare lo sviluppo delle tecnologie quantistiche in modo responsabile, bilanciando attentamente i rischi e le opportunità che esse comportano. È necessario adottare politiche che favoriscano l'innovazione, ma al contempo garantiscano la sicurezza e la resilienza delle infrastrutture critiche, proteggendo la privacy e l'integrità dei dati in un mondo sempre più connesso e digitalizzato.

Le tecnologie quantistiche vengono solitamente suddivise in 3 grandi aree d'applicazione: Quantum Computing, Quantum Communication, Quantum Sensing & Metrology.

¹ Principio della meccanica quantistica per il quale una particella quantistica può trovarsi in più stati contemporaneamente.

² Principio della meccanica quantistica che si verifica quando due o più particelle quantistiche formano un sistema unificato per il quale misurare lo stato di una particella fornisce istantaneamente informazioni sullo stato dell'altra, anche se le due particelle non sono vicine tra loro.

SCHEDE DEFINITORIA – QUANTUM TECHNOLOGIES

Quantum Computing

Il Quantum computing è un sistema computazionale basato sulla manipolazione attiva degli stati quantistici della materia per l'elaborazione di informazioni. Il Quantum Computing si fonda sull'utilizzo del bit quantistico, o qubit. A differenza del bit tradizionale che può assumere solo valore 0 e 1 - come una moneta può essere solo testa o croce - il qubit può assumere valore 0, 1 o una combinazione lineare di 0 e 1, passando da una misura deterministica a una probabilistica – come la moneta che, grazie al principio di sovrapposizione degli stati, mentre ruota ha una certa probabilità di assumere testa e una di assumere croce. Grazie a questo principio, il sistema quantistico può elaborare più input nello stesso momento, riducendo il numero di operazioni necessarie per ottenere un certo risultato. Questo produce un'accelerazione: idealmente, se il computer classico può realizzare n operazioni con n bit, un computer quantistico con n qubit può realizzarne 2^n e quindi può essere 2^n volte più veloce. Ciò porta ad un aumento della capacità computazionale che su alcune operazioni complesse può essere esponenziale, aprendo la strada per la risoluzione di problemi complessi finora irrisolvibili. Tuttavia, l'unità di analisi per capire se è opportuno utilizzare l'approccio classico o quello quantistico è lo specifico use case. È essenziale, infatti, valutare la natura del problema da risolvere per capire se esiste un algoritmo quantistico che potrebbe portare dei vantaggi. Alcuni campi di applicazione sono l'ottimizzazione, la simulazione o il machine learning.

Nel campo della computazione, particolare attenzione viene data ai Quantum Simulator, ovvero versioni analogiche dei computer quantistici appositamente dedicati alla riproduzione del comportamento di sistemi complessi a livello molecolare e atomico, dove i fenomeni quantistici si manifestano e danno origine a proprietà straordinarie. Il loro principale vantaggio rispetto ai computer quantistici è che i simulatori quantistici non richiedono il controllo completo di ogni singolo componente e sono quindi più semplici da costruire. Questa capacità può essere cruciale per avanzare in campi come la chimica, la fisica dei materiali e la biologia.

Quantum Communication

La Quantum Communication si riferisce alla realizzazione di reti di comunicazione basate su principi fisici quantistici. Qualsiasi tentativo di intercettare, leggere e inoltrare una comunicazione basata su qubit è rintracciabile confrontando gli stati dei qubit ricevuti con gli stati dei qubit inviati. La comunicazione quantistica è quindi potenzialmente immune da interferenze esterne, a condizione che mittente e ricevente possano identificarsi reciprocamente in modo affidabile. Ciò apre la strada allo scambio e all'elaborazione dei dati in modo fondamentalmente sicuro. Tuttavia, la trasmissione a lunga distanza dei qubit non è semplice. Per affrontare questo problema, si stanno compiendo sforzi per sviluppare speciali ripetitori quantistici.

Quantum Sensing e Metrology

I sensori quantistici sono strumenti in grado di osservare variazioni nell'ambiente, come variazioni di temperatura, radiazione, accelerazione, tempo (orologi) e campi elettrici o magnetici. A differenza dei sensori classici, i sensori quantistici si basano su fenomeni quantistici, come l'entanglement, per rilevare le variazioni. I sensori quantistici sono estremamente sensibili e quindi consentono misurazioni più precise. Sono anche capaci di una risoluzione estremamente elevata, il che significa che possono essere misurate strutture minuscole come il DNA. La Quantum Metrology utilizza sensori quantistici per definire gli standard (es. misurazione del tempo o misure elettriche).

A. Le sinergie tra le varie tecnologie quantistiche

Le sinergie tra quantum computing, quantum communication e quantum sensing sono fondamentali per sfruttare appieno le potenzialità delle tecnologie quantistiche. Da un lato, alcuni dispositivi hardware, come la fibra ottica e le sorgenti a singolo fotone, sono comuni tra le diverse filiere, è quindi fondamentale ottimizzare la loro fabbricazione e favorire lo scambio tra le filiere. Dall'altro, esiste la possibilità di integrare queste tecnologie in un ecosistema interconnesso, dove i benefici di ciascuna area si amplificano a vicenda, aprendo a nuove applicazioni e migliorando l'efficienza complessiva. Di seguito vengono proposti alcuni scenari di integrazione:

- **Quantum Computing e Quantum Communication:** le tecnologie di comunicazione quantistica potrebbero supportare la protezione dei dati elaborati da computer quantistici, garantendo scambi di informazioni sicuri in ambienti vulnerabili. Questo consentirebbe anche di collegare computer quantistici distribuiti in modo efficiente, trasferendo direttamente l'informazione quantistica, senza dover ripassare dall'informazione classica;
- **Quantum Computing e Quantum Sensing:** i progressi nella computazione quantistica potrebbero migliorare le capacità di elaborazione dei dati provenienti dai sensori quantistici, traendo vantaggio dalla natura già quantistica del dato sorgente ad elevata precisione;
- **Quantum Communication e Quantum Sensing:** le reti di comunicazione quantistica potrebbero consentire la trasmissione sicura di dati sensibili derivanti da sensori quantistici, come quelli utilizzati in applicazioni mediche o geofisiche.

In sintesi, la convergenza tra quantum computing, communication e sensing consentirebbe lo sviluppo di sistemi altamente sicuri, precisi e performanti, in cui ciascuna tecnologia potrebbe potenziare le altre, creando nuove opportunità in settori come la sicurezza informatica, l'esplorazione scientifica, e le applicazioni industriali avanzate. Integrando tutti questi scenari, si potrebbe arrivare ad una prospettiva di reti quantistiche che collegano sensori quantistici e computer quantistici, segnando la direzione verso il futuro Quantum Internet.

1.2 LA CATENA DEL VALORE DELLE TECNOLOGIE QUANTISTICHE

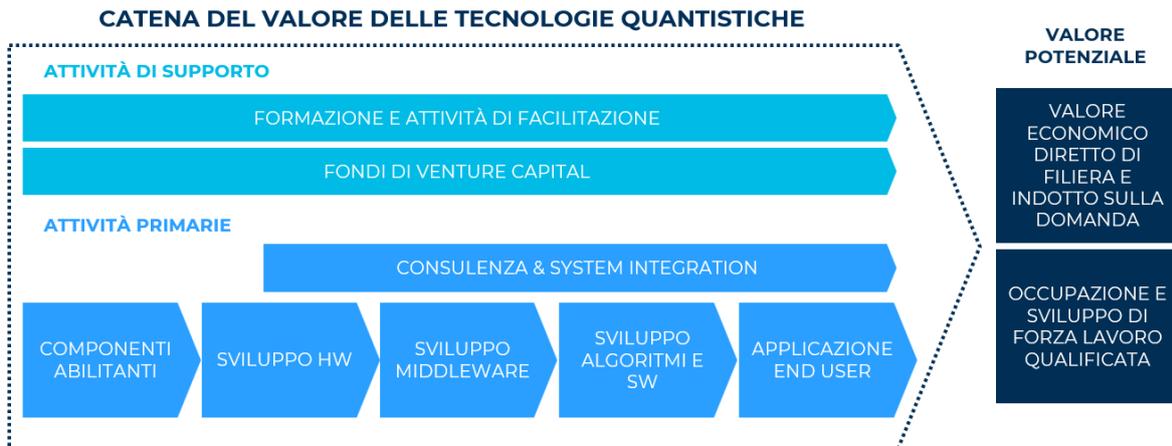


Figura 1 – Value chain delle tecnologie Quantistiche, Osservatorio Quantum Computing e Communication, Politecnico di Milano

La catena del valore delle tecnologie quantistiche segue in parte il modello delle tecnologie classiche, richiedendo un avanzamento sinergico di hardware e software per creare servizi ad alto valore aggiunto. Questa spinta lungo l'intero stack tecnologico, unita all'azione di attori come fondi di investimento, società di consulenza ed enti facilitatori e di formazione, può generare non solo un valore economico diretto, ma anche effetti indotti che stimolano la crescita di nuovi mercati. Inoltre, l'espansione di questo settore favorirà lo sviluppo di un ecosistema occupazionale, creando nuove opportunità di lavoro altamente specializzate e stimolando la formazione di competenze avanzate, contribuendo così alla creazione di un vero e proprio mercato del lavoro nel campo delle tecnologie quantistiche.

La catena del valore è composta anzitutto da una serie di attività primarie che concorrono allo sviluppo dello **stack tecnologico delle tecnologie quantistiche**, dalla creazione dei componenti di base fino alle applicazioni finali, ciascuno dei quali può essere associato a uno o più attori di filiera (Figura 1). Di seguito si riporta una panoramica:

- **Produttori di tecnologie abilitanti:** il primo elemento necessario allo sviluppo delle tecnologie quantistiche è costituito dallo sviluppo di componenti abilitanti, necessarie alla realizzazione di infrastrutture più complesse. Esempi di componenti abilitanti sono un *criostato*, in grado di abbassare la temperatura a qualche mK, ben al di sotto della temperatura dello spazio assoluto, utile per il funzionamento del computer quantistico a superconduttore, oppure *sorgenti e rilevatori di singolo fotone*, utili ad esempio nel campo delle comunicazioni quantistiche e del quantum computing fotonico.
- **Produttori dell'hardware:** la realizzazione dell'infrastruttura quantistica è una delle sfide più complesse. Essa richiede tecnologie avanzate per manipolare l'informazione quantistica a livello di singola particella, come atomi o fotoni. A tale scopo, è necessario sviluppare sistemi di *controllo, manipolazione e lettura dell'informazione quantistica*, insieme a *sistemi di correzione degli errori* per gestire la decoerenza, ovvero la perdita di informazione quantistica, uno dei principali ostacoli alla scalabilità dei computer quantistici. La capacità di mantenere l'integrità dell'informazione quantistica a grandi scale è fondamentale per superare il limite della decoerenza e migliorare le performance dei dispositivi.

- **Società di sviluppo del middleware:** per poter utilizzare l'infrastruttura, è necessario sviluppare il middleware che faciliti l'interazione tra l'infrastruttura quantistica e le applicazioni pratiche. Questo include la creazione di *piattaforme di sviluppo del codice quantistico (software development kit – SDK)*, che permettano di programmare su dispositivi quantistici, così come *interfacce* per la gestione del dispositivo e *sistemi di integrazione* tra elementi classici e quantistici.
- **Società di sviluppo degli algoritmi e del software:** Per trarre vantaggio dalle tecnologie quantistiche, è essenziale sviluppare algoritmi e software specifici che sfruttino le proprietà uniche della meccanica quantistica, come la sovrapposizione e l'entanglement. In particolare, nel campo della computazione quantistica, la *ristrutturazione di problemi computazionali in chiave quantistica* e la *ristrittura del codice* sono attività necessarie ad abilitare l'utilizzo pratico di questi nuovi computer.
- **Aziende utilizzatrici e applicazione end-user:** l'applicazione end-users costituisce l'elemento finale dello stack tecnologico. Le applicazioni possono essere di tipo *general purpose*, quindi applicabili trasversalmente a qualsiasi settore merceologico, oppure *verticali per settore*, come nel campo chimico-farmaceutico, finanziario o energetico. Nel campo del quantum computing alcune tipologie di problemi applicativi sono l'ottimizzazione, come nel caso della logistica; la simulazione, utile per simulare molecole e materiali; il machine learning, utile per problemi di pattern recognition e l'identificazione di anomalie.

Trasversalmente alle attività primarie, è possibile identificare una serie di attività di supporto associate ad altri attori coinvolti nell'ecosistema, che concorrono indirettamente alla creazione del valore:

- **Venture capital:** i fondi di venture capital giocano un ruolo cruciale nel supportare lo sviluppo di nuove iniziative imprenditoriali in questo settore emergente, finanziando start-up nelle fasi iniziali e accompagnandole fino a stadi più maturi, dove le tecnologie possono essere scalate e in prospettiva commercializzate;
- **Società e/o enti facilitatori:** le aziende facilitatrici o che offrono servizi di formazione sono fondamentali per colmare il gap di competenze in un campo altamente specializzato come quello delle tecnologie quantistiche. Queste società supportano lo sviluppo del know-how necessario, indirizzando il reskill di professionisti in azienda verso figure in grado di gestire e implementare soluzioni quantistiche.
- **Società di consulenza e system integrator:** le società di consulenza e i system integrator sono essenziali nel guidare le organizzazioni nell'adozione delle tecnologie quantistiche, offrendo supporto nella scelta del vendor tecnologico più adatto o nel design degli use-case da esplorare. Questi attori aiutano le aziende a orientarsi tra le diverse soluzioni disponibili, facilitando l'integrazione delle tecnologie quantistiche nei processi aziendali esistenti, quando possibile.

Insieme, questi attori contribuiscono a creare un ecosistema dinamico e interconnesso che stimola l'innovazione e accelera l'adozione delle tecnologie quantistiche. È fondamentale, infatti, un lavoro parallelo e sinergico tra i diversi attori che concorrono alla catena del valore, poiché ciascuna attività gioca un ruolo cruciale nell'industrializzazione delle tecnologie. La crescente complessità delle tecnologie quantistiche richiede una cooperazione tra diverse tipologie di attori, tra cui startup, scale-up e grandi aziende, che lavorano insieme per garantire una soluzione end-to-end.

Seppur il layer infrastrutturale rappresenti la sfida maggiore, secondo le stime dell'Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano³, a livello internazionale, la grossa quota parte di startup e aziende è focalizzata sul software e sulla creazione di ambienti di sviluppo che aggregino più infrastrutture. Infatti, nell'attesa di un hardware quantistico, si inizia a lavorare su ambienti di sviluppo e algoritmi per la creazione di servizi a valore. La maggior parte degli attori della filiera dell'offerta offre servizi in un solo layer, e nonostante alcuni attori siano attivi su più di un layer, sono ancora pochi i casi in cui presiedono l'intero stack applicativo. Nello sforzo di offrire un'offerta di mercato più ampia possibile, spesso si osservano partnership e fusioni tra aziende operanti in layer differenti.

1.3 STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE QUANTISTICHE E TREND DI SVILUPPO

Le tecnologie quantistiche si trovano a livelli di maturità tecnologica (TRL) differenti, riflettendo la diversità degli ambiti di applicazione e delle soluzioni sviluppate. Mentre alcune, come la Quantum Communication, hanno raggiunto un livello di maturità più avanzato e sono già utilizzabili in contesti specifici, altre, come il Quantum Computing, sono ancora in fasi sperimentali o prototipali. Di seguito viene presentata una panoramica dello stato dell'arte delle varie tecnologie e dei trend di sviluppo degli ultimi anni.

Guardando al **Quantum Computing**, negli ultimi anni lo sviluppo dell'hardware quantistico ha subito una forte accelerazione, con aziende che hanno presentato roadmap promettenti, focalizzate sul miglioramento della qualità dei qubit e sull'aumento dell'efficienza, piuttosto che sull'espansione delle dimensioni dell'hardware. Tuttavia, rimangono sfide cruciali, come l'affidabilità delle componenti e la correzione degli errori, per raggiungere una scala industriale. Inoltre, lo scenario infrastrutturale resta complesso: si stanno portando avanti attività di ricerca su almeno 7 diversi tipi di qubit⁴ per la realizzazione dell'hardware quantistico e mancano metriche standardizzate e condivise per misurarne i progressi e confrontarne le prestazioni.

Parallelamente allo sviluppo dell'hardware, ulteriori sforzi si stanno concentrando sugli algoritmi quantistici, ovvero sulla riformulazione di problemi computazionali in chiave quantistica e sulla riscrittura del codice, attività necessarie al funzionamento di questi nuovi computer. Tali algoritmi, infatti, sono profondamente diversi da quelli classici e mirano a migliorare l'efficienza e la qualità delle soluzioni. Sebbene la ricerca sugli algoritmi quantistici sia attiva già dagli anni '90, recentemente ha registrato un notevole sviluppo e si sono moltiplicati i progetti sperimentali che hanno iniziato a mostrarne le potenzialità.

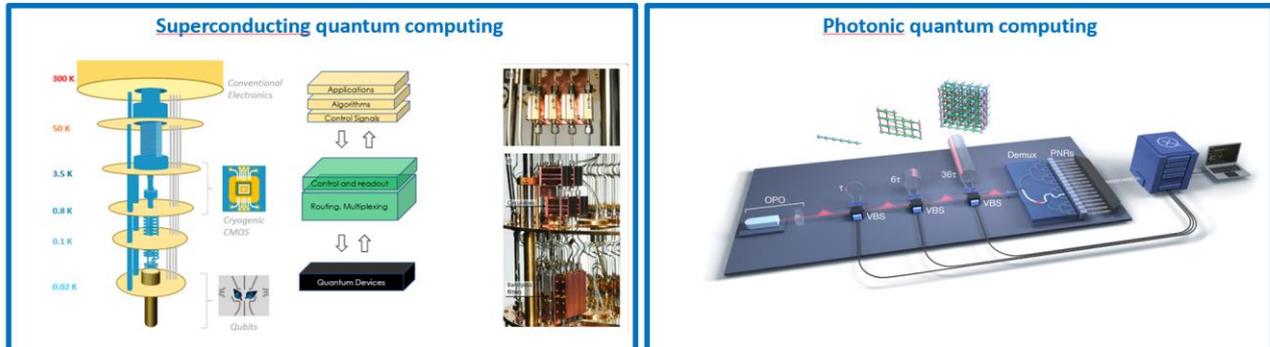
³ Gran parte dei dati utilizzati per la redazione del presente documento è stata fornita dall'Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano. Qualora le analisi svolte non si basino su dati provenienti da quest'ultimo, la fonte è opportunamente specificata.

⁴ Le tipologie di qubit considerate sono: *superconducting, neutral atoms, ion-trap, photonics, spin-based, nitrogen vacancy, topological material*.

Lo **scenario infrastrutturale è complesso** e si stanno portando avanti attività di ricerca su almeno **7 diversi tipi di qubit*** per la realizzazione dell'hardware quantistico. Tuttavia, **mancano metriche standardizzate** per misurarne i progressi.

Alcuni esempi di **componenti chiave** che possiamo ritrovare in diverse di queste tecnologie sono: *sistemi di controllo, manipolazione e lettura dell'informazione quantistica, sistemi di correzione degli errori, sistemi di raffreddamento.*

Di seguito è riportato un esempio del funzionamento di 2 delle 7 tecnologie.



*Le tipologie di qubit considerate sono: superconducting, neutral atoms, ion-trap, photronics, spin-based, nitrogen vacancy, topological material.

Figura 2 – Scenario infrastrutturale del Quantum Computing ed esempi di architettura

Consapevoli che lo sviluppo completo della tecnologia dall'hardware al software sia una sfida di lungo termine, recentemente gli sforzi stanno cambiando direzione: dall'iniziale ricerca della Supremazia Quantistica, ovvero risolvere con un computer quantistico uno use case non traggibile con quello classico, oggi si lavora per la Quantum Utility, con l'obiettivo di individuare casi concreti in cui il Quantum Computing possa offrire un'utilità pratica, competendo con la computazione classica. In questo scenario, la disponibilità di prototipi in Cloud, che permettono di eseguire piccoli test e verificare la correttezza della formulazione dei problemi, sta accelerando la sperimentazione.

Nel percorso verso la Quantum Utility, uno dei primi ambiti di utilizzo potrebbe essere la configurazione ibrida tra calcolo classico e quantistico, grazie all'integrazione con l'HPC (High Performance Computing). L'integrazione tra queste due tecnologie è la strada perseguita dall'Unione Europea, che ha selezionato sei siti di supercalcolo per ospitare altrettanti computer quantistici accessibili a tutta la comunità.⁵ Attualmente, è stato firmato l'acquisto per quattro di questi computer quantistici europei:

- EuroQCS in Polonia (trapped-ions quantum computer, del vendor Alpine Quantum Technologies)⁶
- Lucy in Francia (photonic quantum computer, di una partnership francese-tedesca, tra cui Quandela and Attocube)⁷

⁵ https://eurohpc-ju.europa.eu/one-step-closer-european-quantum-computing-eurohpc-ju-signs-hosting-agreements-six-quantum-computers-2023-06-27_en

⁶ https://eurohpc-ju.europa.eu/advancing-european-quantum-computing-signature-procurement-contract-euroqcs-poland-2024-07-10_en

⁷ https://eurohpc-ju.europa.eu/signature-procurement-contract-lucy-new-eurohpc-quantum-computer-located-france-2024-09-26_en

- Lumi-Q in Repubblica Ceca (superconducting quantum computer, del vendor IQM Quantum Computers)⁸
- Euro-Q-Exa in Germania (superconducting quantum computer, del vendor IQM Quantum Computers)⁹.

Anche l'Italia, presso il Tecnopolo di Bologna, ospiterà un computer o simulatore quantistico basato sulla tecnologia ad atomi neutri¹⁰.

Parlando di integrazione, è importante considerare anche la sinergia tra le tecnologie quantistiche e quelle esistenti, come l'intelligenza artificiale (AI). Da un lato, l'AI potrebbe ottimizzare il quantum computing, migliorando, ad esempio, la gestione dei qubit, la correzione degli errori e l'ottimizzazione degli algoritmi. Dall'altro, l'integrazione dell'AI con il quantum computing apre la strada allo sviluppo di algoritmi di quantum machine learning, che combinano i vantaggi delle tecnologie quantistiche con le capacità predittive e analitiche dell'intelligenza artificiale.

Diverse aziende a livello globale hanno annunciato sperimentazioni per testare su scala ridotta la possibilità di applicare il quantum computing in use-case d'interesse. I principali ambiti applicativi riguardano problemi di ottimizzazione, di simulazione, e di pattern recognition, classification and clustering. L'ottimizzazione si occupa di individuare la soluzione migliore tra diverse alternative possibili, con applicazioni come l'ottimizzazione di un portafoglio di investimento o la pianificazione dei percorsi in ambito logistico. La simulazione si focalizza sulla rappresentazione e l'emulazione di sistemi complessi, come nel caso della simulazione di molecole e composti chimici per la scoperta di nuovi farmaci, il design di nuovi materiali o lo sviluppo di batterie di nuova generazione. I problemi di pattern recognition, classification and clustering, invece, mirano all'identificazione di schemi, alla classificazione di informazioni in grandi dataset e allo sviluppo di modelli predittivi basati sui dati. Tra gli esempi applicativi si possono citare il rilevamento di frodi informatiche attraverso il riconoscimento di attività anomale e l'individuazione di schemi legati a specifiche malattie.

Con il rapido sviluppo del Quantum Computing, sta crescendo la preoccupazione per la potenziale minaccia che esso rappresenta come nuovo strumento di attacco informatico, capace di compromettere alcune forme di crittografia tradizionale: ad esempio la crittografia RSA e le curve ellittiche, utilizzate nei protocolli di comunicazione su internet e nelle firme digitali. Per far fronte a queste minacce è fondamentale che le aziende e le istituzioni si dotino di strumenti per garantire la cosiddetta "Cryptoagility", ovvero la capacità di adattarsi rapidamente a nuovi sistemi crittografici in risposta a minacce emergenti. Iniziare questo percorso è fondamentale non solo per far fronte alla minaccia quantistica ma, in generale, per rispondere alla continua sofisticazione degli attacchi informatici, anche alla luce dello sviluppo dell'intelligenza artificiale. Effettuare una mappatura delle soluzioni crittografiche in uso e garantire la Cryptoagility è il primo passo verso una transizione Quantum-Safe. Diversi settori sensibili, come finanza e difesa, hanno avviato progetti di transizione Quantum-safe.

⁸ https://eurohpc-ju.europa.eu/advancing-european-quantum-computing-signature-procurement-contract-eurohpc-quantum-computer-located-2024-09-26_en

⁹ https://eurohpc-ju.europa.eu/signature-procurement-contract-eurohpc-quantum-computer-located-germany-2024-10-15_en

¹⁰ https://eurohpc-ju.europa.eu/eurohpc-ju-launches-procurement-new-quantum-computer-italy-2024-08-01_en

Per garantire la sicurezza delle comunicazioni nell'era quantistica, la ricerca sta lavorando in due direzioni: lo sviluppo di tecnologie di Quantum Communication e la crittografia post-quantistica.

La **Quantum Communication** sfrutta i principi della fisica quantistica per garantire maggiore sicurezza, come nel caso della Quantum Key Distribution (QKD), un protocollo per distribuire chiavi crittografiche quantistiche in modo sicuro, al fine di evitare meccanismi di scambio di chiavi vulnerabili. La crittografia post-quantistica, invece, si basa su algoritmi progettati per essere utilizzabili su computer classici, ma resistenti agli attacchi di un futuro computer quantistico. Il 2024 ha segnato un momento decisivo con l'approvazione, ad agosto, da parte del National Institute of Standards and Technology (NIST) di tre standard crittografici post-quantistici. Sebbene siano stati definiti degli standard per gli algoritmi post-quantistici, mancano ancora gli standard applicativi e normativi per una loro implementazione su larga scala. Tuttavia, ad ottobre 2024 è stato fatto un importante passo in questa direzione: 18 stati membri dell'EU hanno firmato il position paper "Securing Tomorrow, Today: Transitioning to Post-Quantum Cryptography"¹¹ in cui si sottolinea che la transizione alla crittografia post-quantistica deve diventare una priorità per la pubblica amministrazione, i fornitori di infrastrutture critiche, i fornitori IT e l'intera industria - la transizione Quantum Safe dovrà, infatti, necessariamente riguardare l'intera filiera. Il documento evidenzia la necessità di compiere i seguenti passi: analizzare le minacce quantistiche, sviluppare una roadmap quantum safe, pianificare la migrazione, promuovere la ricerca in ambito crittografia post-quantistica e gli sforzi di standardizzazione.

Le soluzioni di QKD e Post-Quantum Cryptography, rispettivamente attive a livello hardware e software, possono essere tecnologie complementari e integrate in un unico prodotto. È inoltre importante combinare le tecniche di crittografia quantistica con quelle classiche, per garantire una protezione completa e adattabile a diversi scenari di minaccia. La transizione Quantum Safe rappresenta un processo complesso e di lungo termine, che richiede significativi investimenti. È dunque fondamentale accompagnare le aziende lungo questo percorso, fornendo una chiara direzione normativa che possa facilitare l'adozione di soluzioni Quantum Safe.

Il **Quantum sensing** rimane la meno nota tra le tecnologie quantistiche, tuttavia, potrebbe essere applicata in numerosi settori, tra cui la sanità, le telecomunicazioni, la navigazione e il monitoraggio ambientale. Ad esempio, i sensori quantistici potrebbero rivoluzionare la diagnostica medica, consentendo una rilevazione precoce delle malattie attraverso tecniche di imaging ad alta risoluzione. Nel settore della navigazione, offrono soluzioni per ambienti privi di GPS, migliorando la precisione anche in condizioni difficili.

Anche se il mercato del quantum sensing è ancora immaturo, negli ultimi due anni alcune soluzioni stanno uscendo dai laboratori di ricerca. Alcune importanti milestone sono state raggiunte dalla Royal Navy¹² nel 2023 che ha testato un sensore quantistico a bordo della sua nave sperimentale, la *XV Patrick Blackett*, segnando un passo significativo verso la navigazione senza GPS per le applicazioni marittime e dalla NASA a settembre 2024, riuscendo a posizionare con successo di un *ultra-cool quantum sensor* nello spazio. Questo sensore è in grado di

¹¹ <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Crypto/PQC-joint-statement.html>

¹² <https://quantumzeitgeist.com/royal-navy-tests-quantum-sensor-for-gps-free-navigation-with-imperial-college-london/>

rilevare deboli segnali elettromagnetici e dovrebbe migliorare le capacità di ricerca scientifica e di esplorazione¹³. È importante sviluppare consapevolezza sulle opportunità di questa tecnologia e adattare la loro realizzazione in base al contesto reale in cui verranno utilizzate.

¹³ <https://www.electropages.com/blog/2024/09/nasa-demonstrates-ultra-cool-quantum-sensor-in-space>

2. SCENARIO ITALIANO

2.1 STATO DELL'ARTE

In Italia, il settore industriale delle Quantum Technologies è ancora emergente, trainato innanzitutto dagli investimenti pubblici nell'ambito del PNRR. L'investimento di oltre 140 mln di euro, su un orizzonte di tre anni, ha permesso all'Italia di muovere i primi passi verso la creazione di un ecosistema nazionale, seppure in ritardo rispetto ai paesi oltreoceano (2010) e in Europa (2014). L'impulso fornito dai fondi pubblici sta favorendo la nascita di un ecosistema che coinvolge anche il settore privato: da un lato alcune startup e aziende dell'offerta, che hanno iniziato a sviluppare la tecnologia ed offrire servizi in questo ambito, e dall'altro le imprese della domanda, che sperimentano oggi per garantirsi un vantaggio competitivo futuro. In questo scenario la collaborazione tra ricerca e industria si mostra fondamentale per progredire nello sviluppo della tecnologia.

Seppure i fondi stanziati non siano paragonabili per scala e durata a quelli annunciati da altri Paesi europei, che hanno stanziato miliardi di euro su orizzonti decennali, nel corso degli ultimi due anni essi hanno svolto un ruolo fondamentale come primo impulso per la creazione di un ecosistema italiano. Per accrescere questo ecosistema e renderlo competitivo a livello globale, è necessario assicurare continuità alle attività avviate e individuare obiettivi coordinati, in sinergia con quelli Europei. Si tratta di un settore critico per la competitività futura dell'Europa in campo tecnologico. È importante investire oggi creando una rete pubblico-privata coesa che lavori strategicamente verso uno stesso obiettivo, a livello nazionale e internazionale, accompagnando questo settore emergente dalla fase di ricerca e sviluppo di oggi a quella industriale del futuro.

A. Un settore industriale emergente

In Italia, diversi centri di eccellenza stanno emergendo come protagonisti nel campo delle Quantum Technologies. Distribuiti lungo tutto il territorio nazionale, mirano a sviluppare la tecnologia dall'hardware al software, puntando anche all'integrazione con le infrastrutture esistenti. Alcuni esempi di linee di ricerca ed enti attivi sui diversi ambiti delle Quantum Technologies sono: Quantum Computing and Information Technologies (CNR, INFN), Quantum Metrology (INRIM), Quantum Information and Communication (CINI) e più generalmente le tecnologie abilitanti (IIT). Anche le Università partecipano attivamente, come ad esempio l'Università di Padova, il Politecnico di Milano, il Politecnico di Torino, La Sapienza Università di Roma, l'Università di Trieste, l'Università Federico II di Napoli, l'Università di Pisa, l'Università di Firenze ed il Politecnico di Bari.

L'eccellenza italiana nella ricerca accademica è testimoniata dal numero elevato di pubblicazioni scientifiche: l'Italia si colloca al settimo posto mondiale con oltre 4.200 pubblicazioni nel campo del Quantum Computing¹⁴. Inoltre, il Paese vanta più di 10 Master e Lauree Magistrali dedicate alle tecnologie quantistiche - o che le includono in modo significativo nel loro programma, spesso integrandole con altri ambiti emergenti come l'High Performance Computing (HPC) e l'Intelligenza Artificiale (AI). Queste eccellenze rendono l'Italia un punto di riferimento privilegiato per la formazione di capitale umano altamente qualificato. Tuttavia, la mancanza di un mercato del

¹⁴ Fonte Scopus: pubblicazioni sul Quantum Computing dal 1980 ad oggi

lavoro competitivo rappresenta una delle principali sfide per il paese, comportando il rischio di dispersione dei talenti altamente formati.

Questi poli di eccellenza rendono l'Italia all'avanguardia nei prodotti della ricerca, non solo nella pubblicazione di paper ma anche nella registrazione di brevetti. Secondo analisti internazionali, l'Italia risulta tra i 10 Paesi con più brevetti concessi nelle QT dal 2000 al 2023 (Tabella 1). Nonostante questo posizionamento, i dati mostrano una forte arretratezza dell'Italia rispetto ad altri paesi peer come Francia e Germania. Questo è sintomo delle difficoltà di tradurre gli investimenti nella ricerca in prodotti industriali e testimonia le difficoltà del trasferimento tecnologico in Italia.

Paese	QT Totale	QC	QComm	QS
Stati Uniti	15.927	10.716	4.899	312
Giappone	8.601	7.597	906	98
Germania	7.040	6.792	198	50
Cina	6.793	4.948	1.805	40
Francia	6.696	6.379	307	10
Svizzera	1.844	1.691	147	6
Gran Bretagna	1.693	1.208	440	45
Repubblica di Corea	1.635	1.342	272	21
Canada	1.480	866	566	48
Italia	1.293	1.215	64	14

Tabella 1 – Brevetti QT concessi, per sede centrale, 2000-2023. Fonte: McKinsey

L'eccellenza nella ricerca favorisce la nascita di startup e spin-off universitari, seppur con numeri e investimenti ancora molto minori rispetto ad altri Stati europei. I fondi raccolti da startup attive sulle Quantum Technologies in Italia raggiungono i 12,5 milioni di euro nell'orizzonte 2023-2024 rispetto, ad esempio, ai 255 milioni di euro raccolti in Francia nello stesso periodo¹⁵. Inoltre, i numeri di aziende native¹⁶ del mercato delle Quantum Technologies in Italia si mostrano esigue rispetto a quelle presenti in altri Paesi (Tabella 2).

¹⁵ Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano

¹⁶ Con aziende native si intendono nuove iniziative imprenditoriali nate proprio con un focus sulle tecnologie quantistiche, ovvero modelli di business incentrati sull'offerta di servizi e soluzioni relative a questa tecnologia.

Paese	Numero Aziende Native
Stati Uniti	102
Canada	39
Regno Unito	35
Germania	28
Francia	18
India	14
Cina	14
Paesi Bassi	14
Giappone	13
Italia	13
Spagna	10

Tabella 2 – Numero di aziende native di Quantum Technologies per Paese nel 2024. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication

L'Osservatorio Quantum Computing e Communication del Politecnico di Milano ha condotto una mappatura approfondita dell'ecosistema italiano, identificando 13 aziende native attive in Italia sulle tecnologie quantistiche, un numero significativamente maggiore di quello registrato solo pochi anni prima.

Nonostante i numeri esigui, emergono alcune eccellenze, come nel campo della Quantum Communication: alcune startup offrono prodotti di QKD già integrati in reti quantistiche permanenti, come quella inaugurata a Napoli¹⁷ ad inizio anno, e utilizzati in sperimentazioni nel corso della presidenza italiana del G7 nel 2024. Questi risultati sono stati possibili anche grazie alla scuola di fotonica italiana, rinomata a livello internazionale per la sua eccellenza nella ricerca e nello sviluppo di tecnologie fotoniche avanzate, consolidatasi nel tempo presso istituzioni di prestigio come il CNR ed il Politecnico di Milano.

I 12,5 milioni di euro raccolti dalle start-up si concentrano principalmente in poche realtà che li investono nella realizzazione di hardware quantistico. Da segnalare, inoltre, la presenza di startup italiane nel programma di accelerazione della NATO. Nel 2024 è stato anche istituito il primo fondo di investimento italiano totalmente dedicato alle tecnologie quantistiche, segnando un passo significativo verso l'incremento degli investimenti nel Paese. Questi segnali testimoniano la vivacità del settore e un'attrattiva per gli investitori privati che è andata crescendo negli ultimi due anni: prima del 2023 infatti non si registrava nessun investimento da parte di venture capital su start-up dedicate alle tecnologie quantistiche in Italia.

Se guardiamo allo scenario dell'offerta in senso più ampio, considerando gli attori già attivi nel mercato tecnologico tradizionale che hanno deciso di differenziare il loro business entrando nel mercato dell'offerta delle Quantum Technologies, in Italia il panorama è caratterizzato da grandi attori internazionali che operano nel Paese e società di consulenza che hanno iniziato a lavorare con alcuni grandi clienti a progetti di sperimentazione. L'attivazione di

¹⁷ <https://www.unina.it/-/52867403-a-napoli-la-prima-rete-di-comunicazione-quantistica-metropolitana-permanente>

politiche industriali nazionali sulle tecnologie quantistiche potrebbe rappresentare un ulteriore segnale di fiducia per il mercato, favorendo l'attrazione di capitali internazionali.

Riguardo alle aziende utenti, le tecnologie quantistiche sono oggetto dell'attenzione delle grandissime aziende, che hanno risorse e visione necessarie per investire in questo campo. Tra le 297 aziende Forbes Global 2000 attive¹⁸ sulle Quantum Technologies, 10 sono italiane. La situazione italiana si mostra quindi in linea con quella internazionale, caratterizzata da poche grandi aziende pioniere che investono per rendersi precursori della tecnologia. Inoltre, dalla mappatura degli annunci di progetto pubblici su Quantum Computing e Quantum Communication, l'Osservatorio ha identificato 9 aziende italiane che hanno annunciato pubblicamente 17 sperimentazioni di use-case. Il settore *finance* si mostra il più attivo, in linea con quanto si registra nel resto del mondo, seguito da *energy, utility & telco* e *aerospace & defence*. Sebbene la spesa privata delle grandi aziende sia ancora modesta rispetto a quella dedicata ad altre tecnologie più mature, i budget sono rimasti stabili o in crescita nel 2024, grazie al sostegno dato dai fondi pubblici del PNRR destinati a progetti di ricerca congiunti con le imprese. La spesa complessiva, dominata da alcuni big spender del panorama industriale, ammonta a 8 milioni di euro¹⁹ per il 2024, in crescita rispetto al 2023 in cui si riscontravano 6 milioni di euro.

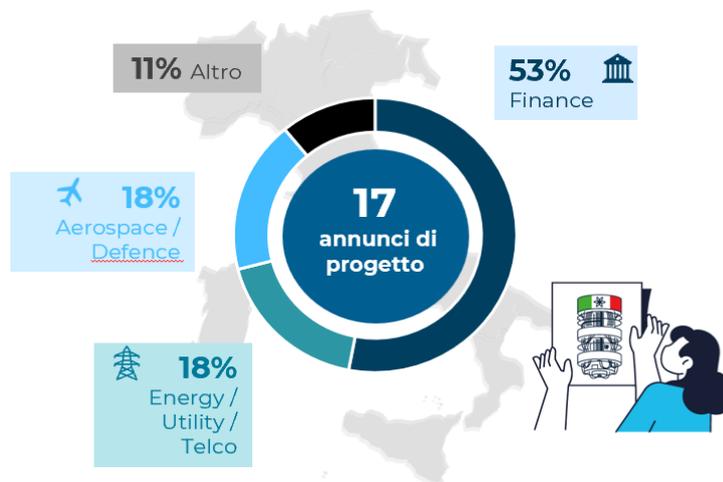


Figura 3 – Annunci di progetto pubblici di Quantum Computing e Quantum Communication in Italia per settore. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication

Tuttavia, al netto di alcune aziende visionarie, si ha ancora poca consapevolezza sulle tecnologie quantistiche. Nel 2024, il 30% delle grandi organizzazioni²⁰ ha avviato i primi passi in iniziative di Quantum Readiness²¹ (in crescita rispetto al 24% registrato nel 2023) e il 12% delle grandi organizzazioni ha avviato iniziative per la transizione

¹⁸ Si considerano attive le aziende attive su almeno una tra le seguenti attività: use case in sperimentazione, filoni di R&D, investimenti strategici o partecipazione a consorzi tematici.

¹⁹ Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano. Si considera la spesa dedicata in risorse interne all'azienda, come il personale dedicato, e all'esterno in consulenza, tempo macchina e formazione

²⁰ Survey condotta dall'Osservatorio Quantum Computing & Communication del Politecnico di Milano nel 2024 su 107 grandi organizzazioni operanti in Italia

²¹ Con avvio di iniziative di Quantum Readiness si considera avviata almeno una delle seguenti attività: avvio di relazioni di ecosistema e disseminazione interna, sviluppo di competenze, costituzione di team interno, avvio di sperimentazioni.

quantum-safe²². È necessario promuovere la diffusione di conoscenza su queste tecnologie ed accompagnare le aziende ad investire con strategia su tecnologie con ritorni economici di lungo termine, bilanciando aspettative di breve e lungo termine.

B. Le Infrastrutture esistenti

La disponibilità di infrastrutture adeguate rappresenta un elemento cruciale per l'implementazione e la diffusione delle tecnologie quantistiche sul territorio nazionale, ma costituisce anche una delle principali barriere in termini di accessibilità e costi. In questa sezione viene presentata una panoramica delle principali infrastrutture attualmente operative in Italia, suddivise nelle due aree principali: Quantum Computing e Quantum Communication.

Il Quantum Computing, pur non essendo ancora maturo dal punto di vista industriale, è attualmente il campo delle tecnologie quantistiche con il maggior numero di iniziative, grazie alle sue promettenti applicazioni e alla corsa verso il raggiungimento del cosiddetto “quantum advantage”. A tal proposito, si segnala l'inaugurazione del primo Quantum Computer in Italia presso l'Università Federico II di Napoli²³, ed il lancio della Quantum Computing Academy nella medesima università. Inoltre, il consorzio EuroQCS-Italy, nell'ambito dell'iniziativa EuroHPC JU, sta realizzando un nuovo computer quantistico da integrare nel sistema Leonardo²⁴. Il consorzio è guidato dal CINECA e comprende la Rete accademica e di ricerca della Slovenia (ARNES) ed il Forschungszentrum Jülich (FZJ) in Germania. Il costo totale del sistema è di 13 milioni di euro. Il contributo dell'Unione nell'ambito del Programma Europa Digitale dovrebbe coprire fino al 50% dei costi di acquisizione, fino al 50% dei costi per l'integrazione del computer quantistico con il supercomputer co-locato esistente dell'ente ospitante e fino al 50% dei costi operativi di questo computer quantistico. Infine, si segnala la recente presentazione di un nuovo sistema quantistico a 5 qubit con sede nel data center del Politecnico di Torino²⁵.

L'Italia vanta tuttavia anche una certa vivacità nel settore delle infrastrutture per le comunicazioni quantistiche. In proposito, è importante segnalare l'Italian Quantum Backbone (IQB), una rete per le comunicazioni quantistiche lunga 1800km e sviluppata dall'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) tramite finanziamenti del Ministero delle Imprese e del Made in Italy e di Meditech. Inoltre, il progetto Quantum Italy Deployment (QUID)²⁶ nell'ambito dell'Infrastruttura EuroQCI mira a realizzare 13 Quantum Communication Networks in Italia collegati all'IQB, promuovendo l'integrazione delle infrastrutture di comunicazione esistenti (in fibra ottica e wireless) con sistemi di QKD che copriranno buona parte del territorio nazionale. Infine, di forte rilevanza è anche il progetto QUANCOM, mirato allo sviluppo e alla sperimentazione di protezione incondizionata della rete IP che ha al suo nucleo la crittografia quantistica.

Le tecnologie quantistiche necessitano di importanti investimenti infrastrutturali. Da questo punto di vista, si segnalano alcune iniziative finanziate dal settore pubblico, tra cui:

²² Con avvio di iniziative Quantum-safe si considera avviata almeno una delle seguenti attività: mappatura delle tecniche di crittografia esistenti per comprendere vulnerabilità, definizione di una roadmap di transizione Quantum Safe, sperimentazioni di Quantum Communication.

²³ <https://seeqc.com/press/seeqc-unveils-italys-first-quantum-computing-system>

²⁴ https://eurohpc-ju.europa.eu/eurohpc-ju-launches-procurement-new-quantum-computer-italy-2024-08-01_en

²⁵ <https://www.inrim.it/it/news/links-politecnico-di-torino-e-inrim-partner-accendere-torino-uno-dei-primi-computer>

²⁶ <https://quid-euroqci-italy.eu/it/il-progetto/>

- le Clean Room di FBK²⁷ (che potrà presto espandersi fino a 2000 mq), dell'INRIM²⁸, di PiQuET a Torino²⁹ (400 mq) e di varie università e laboratori del CNR con sede a Roma, Milano (PoliFAB), Catania, e presto a Napoli (tra le altre);
- il laboratorio LENS a Firenze;
- l'IQB³⁰ per la Quantum Communication;
- il computer quantistico di Napoli³¹ (che dovrebbe andare in cloud nel 2025), ed in futuro quelli di Torino³² (primo trimestre 2025) e Bologna³³.

Tuttavia, le infrastrutture menzionate sono solo parzialmente disponibili per le imprese in quanto hanno una genesi improntata alla ricerca e spesso sono inadatte alle necessità imprenditoriali che richiedono maggiore affidabilità e velocità delle procedure di accesso, oltre che tempi di attività molto più lunghi. L'IQB inoltre sembra non essere ancora in funzione, necessitando di ulteriori interventi per rendere la trasmissione di QKD disponibile alle imprese. Infine, nessuno dei computer quantistici sul territorio italiano ad oggi è accessibile alle imprese.

È tuttavia fondamentale contestualizzare il ruolo dell'Italia all'interno del panorama europeo, dove la collaborazione e le strategie condivise giocano un ruolo determinante. Questo aspetto verrà approfondito nel capitolo 4, in particolare nella sezione **“D. Unione Europea – strategie e politiche pubbliche”**, che esamina nel dettaglio le iniziative e le politiche comunitarie in ambito quantistico.

C. II PNRR

I dati mostrati sono il risultato di politiche pubbliche adottate negli ultimi anni per supportare lo sviluppo delle tecnologie quantistiche in Italia, con misure di sostegno economico e finanziamento che si sono concentrate soprattutto sulla ricerca. Come anticipato, il PNRR ha rappresentato una fonte importante di finanziamento pubblico alle tecnologie quantistiche. Il settore industriale necessita tuttavia di una chiara visione più di lungo termine per attrarre investimenti anche privati. La natura “temporale” e le particolari caratteristiche dei fondi PNRR, se non inseriti in un chiaro disegno strategico e in politiche pubbliche a orizzonte temporale medio-lungo rischiano di inquinare il settore senza costituire un reale innesco in grado di tenere nel lungo termine.

Come anticipato, gli investimenti PNRR hanno riguardato principalmente la ricerca e la sua interconnessione con i domini industriali, anche attraverso la realizzazione di progetti in co-finanziamento pubblico-privato. Nel 2022 sono stati stanziati 30 mln € per lo Spoke 10 sul Quantum Computing, ospitato dal Centro Nazionale di Ricerca in HPC, Big Data e Quantum Computing (ICSC)³⁴. Lo spoke è coordinato dal Politecnico di Milano insieme all'Università di Padova ed è mirato a sviluppare la capacità di ricerca applicata italiana su hardware, software e

²⁷ <https://www.fbk.eu/en/initiative/new-frontier-technologies-in-the-clean-room/>

²⁸ Consultare le seguenti pagine per maggiori informazioni: [INRIM](#), [PiQuET](#).

²⁹ <https://piquetlab.it/>

³⁰ <https://www.inrim.it/it/ricerca/settori-scientifici/tempo-e-frequenza/laboratori-e-attivita/italian-quantum-backbone>

³¹ <https://www.supercomputing-icsc.it/2024/05/29/inaugurato-alluniversita-federico-ii-di-napoli-il-prim-computer-quantistico-superconduttivo-italiano/>

³² <https://www.inrim.it/it/news/links-politecnico-di-torino-e-inrim-partner-accendere-torino-uno-dei-primi-computer>

³³ https://eurohpc-ju.europa.eu/eurohpc-ju-launches-procurement-new-quantum-computer-italy-2024-08-01_en

³⁴ <https://www.quantumcomputinglab.cineca.it/wp-content/uploads/2023/02/Cremonesi.pdf>

applicazioni del calcolo quantistico. Inoltre, lo Spoke dovrebbe realizzare diversi obiettivi: la realizzazione di hardware e software per facilitare la progettazione di quantum computer e la loro interoperabilità con computer tradizionali; lo sviluppo di processori quantistici scalabili; lo sviluppo di applicazioni basate su quantum computer. Più in generale, l'ICSC mette insieme 52 partecipanti, di cui 15 tra imprese ed istituti privati e 37 tra università e centri di ricerca.

Un altro importante investimento da 50 mln € finanziato dal PNRR ma non esplicitamente dedicato alle QT, I-PHOQS (*Integrated Infrastructure Initiative in Photonic and Quantum Sciences*), riguarda la realizzazione di un'infrastruttura integrata a livello nazionale per l'utilizzo da parte di attori nazionali ed internazionali. Il progetto è implementato dal CNR e dal Politecnico di Milano.

FOCUS SU SPOKE 10 – Centro Nazionale HPC, Big Data e Quantum Computing

Il Centro Nazionale HPC, Big Data e Quantum Computing, con un budget totale di 320 Milioni di euro, è uno dei cinque Centri Nazionali istituiti dal PNRR con l'obiettivo di promuovere la creazione di una rete di collaborazione tra centri di ricerca, università e aziende sul tema del Supercalcolo in un modello Hub & Spoke.

Lo Spoke 10, con un budget di 30 Milioni, è dedicato alla computazione quantistica e coinvolge 15 enti di ricerca e 15 aziende fondatrici. Lo Spoke presenta tre linee di lavoro che corrono lungo tutto lo stack tecnologico:

- lo sviluppo dell'hardware, con focus su tre diverse tipologie di qubit e piattaforme low-level per il funzionamento fisico di computer quantistici;
- lo sviluppo di software per compilazione, benchmarking ed emulazione di computer quantistici;
- lo sviluppo di software quantistico per algoritmi e applicazioni scientifiche e industriali.

Per accelerare lo sviluppo di applicazioni industriali è cruciale la stretta collaborazione tra enti di ricerca e imprese. La collaborazione si manifesta in due diversi tipi di finanziamento da parte del Centro: gli Innovation Projects e le Open Calls. I primi favoriscono la sinergia tra attori che fanno parte del Centro Nazionale; i secondi invece sono bandi aperti a enti esterni al Centro e mirano a complementare le competenze lungo tutte e tre le aree di attività. Complessivamente Innovation Projects e Open Calls stanzeranno 5 milioni di euro in tre anni per progetti congiunti tra aziende ed enti di ricerca.

Inoltre, con circa 116 milioni di euro è stato realizzato nel 2023 il National Quantum Science and Technology Institute (NQSTI)³⁵, che si occupa di supportare e finanziare lo sviluppo di tutte le tecnologie quantistiche a livello di ricerca di base e agevolare la loro integrazione nelle tecnologie industriali. Nella mission del NQSTI rientrano anche attività di trasferimento tecnologico, in collaborazione con grandi player industriali, PMI e startup per accelerare la ricerca, la penetrazione delle QT nel tessuto produttivo e creare nuove aziende quantum. In tale

³⁵ <https://nqsti.it/>

ambito, a luglio 2024 è stato pubblicato un bando a tema trasferimento tecnologico con un budget di 3.8 mln €, finalizzato a finanziare startup e spin-off, creare laboratori congiunti tra pubblico e privato, e far nascere progetti di ricerca collaborativi tra imprese e accademia³⁶.

FOCUS SU NQSTI

Il partenariato esteso National Quantum Science and Technology Institute (NQSTI) con un budget totale di 116 Milioni in tre anni, è uno dei 14 partenariati istituiti dal PNRR e interessa 20 istituzioni, tra università, centri di ricerca e aziende.

Il Partenariato si occupa di ricerca fondamentale, ovvero caratterizzata da un Technology Readiness Level (TRL) basso (da 1 a 4) sulle Quantum Science, anche in questo caso con un modello Hub and Spoke. Le attività di ricerca più teoriche riguardano l'Information Processing and Communication - circa 8 Milioni dedicati - Simulation, Sensing and Metrology - circa 10 milioni. Altre linee di lavoro riguardano lo sviluppo di diverse piattaforme - basate su atomi, elettroni e fotoni - e la loro integrazione. Importante spazio viene dato al trasferimento tecnologico e alle attività di formazione, training e disseminazione, con un budget complessivo di circa 20 milioni di euro.

In generale, le iniziative pubbliche dimostrano un significativo slancio, anche se necessiterebbero di maggior coordinamento a livello nazionale. Si registrano infatti anche diverse iniziative locali che si muovono quasi parallelamente a quelle sviluppate a livello nazionale.

Per esempio, la Quantum Valley Campania, che rappresenta un investimento significativo di 100 milioni di euro, previsto nel PR Campania FESR 21-27 della Regione Campania³⁷. Parallelamente, nel 2024 è stata lanciata la Bologna Quantum Alliance, che unisce i principali attori dell'ecosistema locale per promuovere lo sviluppo del settore e favorire il trasferimento tecnologico attraverso collaborazioni mirate con le aziende³⁸. In Veneto, nel 2023 è stato dato vita al progetto pilota Ven-QCI, in linea con l'iniziativa europea EuroQCI, che mira a sviluppare una rete quantistica basata su QKD, e dal costo totale di circa 472,000 €³⁹.

D. Trasferimento tecnologico

L'attuale rete di centri di trasferimento tecnologico si concentra principalmente sulle PMI e su tecnologie relativamente mature, con un supporto limitato per le deep tech come le QT, che invece richiedono infrastrutture avanzate e investimenti consistenti in ricerca e sviluppo. È inoltre interessante notare l'attività svolta dai

³⁶ <https://nqsti.it/calls/bando-cascata-spoke-8-bando-1>

³⁷ <https://europa.regione.campania.it/presentato-il-pr-campania-fesr-2021-2027-programmati-interventi-per-oltre-due-miliardi-di-euro/>

³⁸ <https://www.cmcc.it/it/articolo/nasce-la-bologna-quantum-alliance-un-nuovo-punto-di-riferimento-europeo-per-le-scienze-e-le-tecnologie-quantistiche>

³⁹

https://bur.regione.veneto.it/BurVServices/pubblica/Download.aspx?name=Dgr_1448_23_AllegatoA1_519311.pdf&type=9

Competence Center come Meditech⁴⁰, con l'obiettivo di connettere la ricerca e le imprese e favorire l'industrializzazione delle QT.

FOCUS SU MEDITECH

MedITech 4.0 - Mediterranean Competence Centre 4 Innovation è il Centro di Competenza poliregionale, attivo in Puglia e Campania, nato come un facilitatore dell'adozione delle tecnologie abilitanti di Industria 4.0 da parte delle PMI e della Pubblica Amministrazione ed è uno strumento di diffusione della cultura e delle pratiche di innovazione nella produzione di beni e servizi sul territorio nazionale, in particolare sul bacino del Mediterraneo.

Il Centro di Competenza, selezionato nel 2018 dal MISE tra gli otto centri di rilevanza nazionale, è un partenariato pubblico-privato, che svolge attività di orientamento e formazione alle imprese su tematiche Industria 4.0 nonché di supporto nell'attuazione di progetti di innovazione, ricerca industriale e sviluppo sperimentale finalizzati alla realizzazione, da parte delle imprese fruitrici, in particolare delle PMI, di nuovi prodotti, processi o servizi (o al loro miglioramento) tramite tecnologie avanzate in ambito Industria 4.0. I servizi offerti si rivolgono anche alla Pubblica Amministrazione, grande protagonista della transizione digitale.

Inoltre, è fondamentale incentivare collaborazioni pubblico-private che offrano laboratori avanzati, mentorship ed opportunità di ecosistema, come avviene presso il Tecnopolo Tiburtino con Quantum Italia e il polo MILE in Puglia. Rafforzare tali iniziative, oltre a promuovere un coordinamento nazionale, potrebbe ridurre la frammentazione e aumentare l'attrattiva del settore per gli investitori internazionali, generando una filiera delle QT integrata e innovativa.

FOCUS SU TECNOPOLO TIBURTINO E QUANTUMITALIA

Un esempio interessante di hub per il trasferimento tecnologico è rappresentato dal nuovo centro specialistico per le tecnologie quantistiche, recentemente istituito presso il Tecnopolo Tiburtino di Roma⁴¹. Questo centro, nato dalla collaborazione tra Lazio Innova e Scientifica Venture Capital, servirà come sede principale di Quantum Italia, un veicolo d'investimento dedicato a finanziare e supportare startup italiane nel settore quantistico. Oltre ai finanziamenti, il centro mette a disposizione laboratori

⁴⁰ I centri di competenza sono partenariati pubblico-privati il cui compito è quello di svolgere attività di orientamento e formazione alle imprese su tematiche Industria 4.0 nonché di supporto nell'attuazione di progetti di innovazione, ricerca industriale e sviluppo sperimentale finalizzati alla realizzazione, da parte delle imprese fruitrici, in particolare delle Pmi, di nuovi prodotti, processi o servizi (o al loro miglioramento) tramite tecnologie avanzate in ambito Industria 4.0. Per maggiori informazioni, consultare la [pagina dedicata](#).

⁴¹ <https://www.lazioinnova.it/news/regione-lazio-nasce-un-ecosistema-davanguardia-per-le-tecnologie-quantistiche/>



avanzati, una rete di esperti e opportunità di networking, con l'obiettivo di creare un ecosistema d'avanguardia che favorisca la crescita dell'industria quantistica in Italia.

FOCUS SU MILE (PUGLIA)

Un ulteriore esempio di collaborazione pubblico-privato è rappresentato dall'investimento di 10 mln € da parte di Lutech, azienda attiva nei servizi ICT per la trasformazione digitale, per lo sviluppo di MILE, un polo tecnologico in Puglia⁴². Questo progetto, realizzato in partnership con università pugliesi, PMI, startup locali e altri enti, è dedicato all'avanzamento delle tecnologie quantistiche e dell'intelligenza artificiale.

Nel 2023, il MIMIT ha stanziato 350 mln € per la realizzazione, promozione e coordinamento di centri di trasferimento tecnologico presenti sul territorio nazionale per accelerare la penetrazione delle nuove tecnologie nel tessuto produttivo locale. In questo contesto, il governo finanzia l'agevolazione di servizi di innovazione, tra cui: la valutazione del livello di maturità digitale, il test prima dell'investimento, la formazione professionale sull'utilizzo di tecnologie e soluzioni innovative, l'accesso ai finanziamenti, il sostegno finanziario e operativo allo sviluppo di progetti d'innovazione (TRL superiore a 5), l'intermediazione tecnologica e la sensibilizzazione a livello locale. Tra i centri in oggetto, troviamo anche i centri di competenza ad alta specializzazione⁴³ (ad esempio Meditech), i quali rappresentano un'opportunità per l'industria quantistica. In Italia ci sono 8 centri di questo tipo, ossia: CIM 4.0 - Competence Industry Manufacturing 4.0; Made - Competence Center Industria 4.0; BI-REX - Big data Innovation-Research Excellence; ARTES 4.0 – Industry 4.0 Competence Center on Advanced Robotics and enabling digital TEchnologies & Systems 4.0; SMACT Competence Center; MediTech Competence Center I 4.0; START 4.0– Sicurezza e ottimizzazione delle Infrastrutture Strategiche Industria 4.0; CYBER 4.0 – Cybersecurity Competence Center. Di questi, solamente MediTech sembra focalizzarsi sulle QT.

Un'altra iniziativa, promossa sempre dal MIMIT, riguarda l'istituzione delle Case delle Tecnologie Emergenti (CTE), soluzioni che coniugano il ruolo degli enti locali con l'innovazione tecnologica e il suo sviluppo sul territorio, rappresentano un interessante esempio di come l'innovazione ed il trasferimento tecnologico possano sposare gli obiettivi di crescita di un Comune. Presenti in tredici città italiane, scelte su base competitiva attraverso tre Call del MIMIT, ognuna è caratterizzata da un progetto di sviluppo di tecnologie emergenti scelte tra blockchain, IoT, quantum technologies, robotica.

Tuttavia, come anticipato, l'attuale focus dei centri di trasferimento tecnologico in Italia riserva meno attenzione alle *deep tech* ed alla capacità di investimento in R&S delle grandi aziende. Queste ultime potrebbero, infatti, rappresentare una risorsa significativa di finanziamento e collaborazione per startup e spin-off in fase di crescita.

⁴² <https://www.economyup.it/innovazione/nasce-mile-polo-di-innovazione-tecnologica-di-lutech-al-sud-focus-su-ai-e-quantum-computing/>

⁴³ <https://www.mimit.gov.it/it/incentivi/centri-di-competenza-ad-alta-specializzazione>

In tale ottica, potrebbe essere valorizzato il ruolo di tali strutture come centri volti a favorire il matchmaking tra competenze accademiche e grandi imprese, e tra startup e aziende più mature. Inoltre, manca un'infrastruttura tecnologica dedicata (in particolare per le tecnologie quantistiche) che permetta alle imprese di testare le proprie innovazioni. Questi elementi sono essenziali per sviluppare una filiera italiana delle QT, in linea con gli approcci già adottati in Paesi come Regno Unito, Germania e Paesi Bassi.

Tra le altre iniziative più rilevanti per il trasferimento tecnologico si distinguono EuroCC Italy e il laboratorio congiunto CeSMA-SeeQC. EuroCC Italy, centro di competenza nazionale parte del network europeo EuroHPC, si focalizza sulla formazione e sul trasferimento tecnologico, traducendo le conoscenze accademiche in soluzioni pratiche per il settore produttivo⁴⁴. Il laboratorio CeSMA-SeeQC, invece, è all'avanguardia nel testing di architetture di Quantum Computing basate su qubit superconduttivi, ed è frutto di una collaborazione tra l'Università Federico II di Napoli un'azienda leader nel Quantum Computing⁴⁵. Inoltre, all'interno del Centro di Servizi Metrologici Avanzati (CeSMA) dell'Università di Napoli, è stato istituito il Quantum Technologies Innovation Hub (QTIH), un'infrastruttura orientata ai servizi per le imprese del settore quantistico.

Un altro esempio di collaborazione tra ricerca e industria è rappresentato dalla prima edizione del Master in Quantum Science & Technology presso l'Università di Bari: si tratta di un unicum in Italia in quanto il Master include 4 mesi di internship aziendale, ed è pensato come un ponte tra Accademia e Industria che promette elevate possibilità di impiego.

⁴⁴ <https://www.ifabfoundation.org/it/eurocc-italy/>

⁴⁵ <https://www.ricerca.unina.it/news/nasce-il-qtih-quantum-technologies-innovation-hub/>

3. SINTESI DEI RISULTATI DELLA CONSULTAZIONE

3.1 CONTESTO E ANAGRAFICA DELLE CONSULTAZIONI

Al fine di mappare l'ecosistema produttivo italiano delle QT, il MIMIT ha avviato una consultazione pubblica che ha destato l'interesse di diversi stakeholder, raggiungendo il numero di 52 rispondenti, che rappresentano almeno 180 FTE⁴⁶. Di questi, 46 sono aziende dell'offerta e della domanda, 3 fondi di venture capital e 3 facilitatori / associazioni di categoria / fondazioni come illustrato in Figura 4.

La consultazione si è svolta in due fasi: una prima fase svolta mediante richiesta di invio di contributi scritti, attraverso apposita notizia pubblicata sul sito del Ministero (<https://www.mimit.gov.it/it/normativa/notifiche-e-avvisi/onsultazione-pubblica-in-materia-di-tecnologie-quantistiche>); una seconda fase in cui gli stakeholder sono stati auditi mediante interviste individuali.

Analizzando le 46 aziende consultate (escludendo quindi VC e associazioni di categoria), l'ecosistema si compone come segue:

- grandi attori italiani del settore ICT e della componentistica (17 intervistati nell'ambito della consultazione del MIMIT), come system integrator, società di consulenza e telco provider, che stanno differenziando la propria *value proposition* nel campo delle tecnologie quantistiche: ad esempio, lo sviluppo di algoritmi quantistici, la creazione di librerie e la commercializzazione di prodotti di comunicazione quantum-safe;
- grandi attori internazionali del settore dell'informatica (9 intervistati nell'ambito della consultazione del MIMIT), posizionati prevalentemente sullo sviluppo di hardware e middleware per il Quantum Computing, che hanno interessi commerciali sul mercato italiano;
- 20 tra aziende e startup native del settore delle tecnologie quantistiche, nate oltreoceano o in altri Paesi europei, che stanno guardando con interesse al mercato italiano come potenzialità industriali, aziende e startup italiane native del settore, nonché grandi aziende italiane potenziali utilizzatrici della tecnologia. Le società italiane native sono interessate a sviluppare tecnologie, a posizionarsi sul mercato con vantaggio competitivo, mentre le grandi aziende italiane intendono ottenere vantaggi specifici in determinati settori dell'economia, quali il fin e insur-tech, l'energetico e il chimico farmaceutico

⁴⁶ Equivalente a tempo pieno. Si segnala che solamente il 60% dei rispondenti ha fornito il numero di FTE.

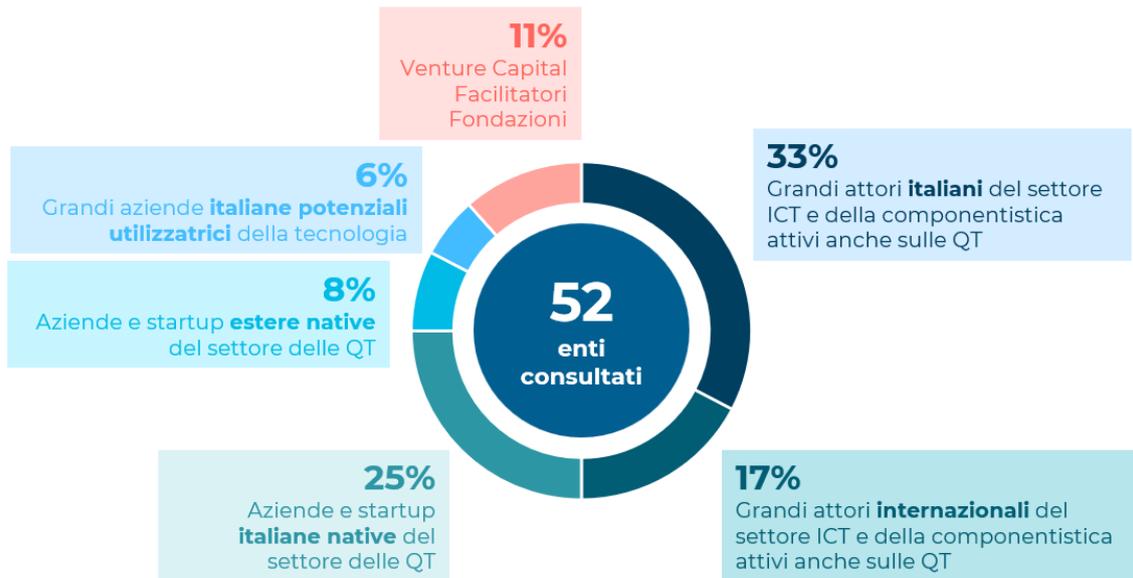


Figura 4 – Distribuzione della tipologia di organizzazione partecipante alla consultazione MIMIT sulle QT

Focalizzandosi sulla provincia di provenienza delle aziende con sede in Italia, emerge un pattern che riflette la concentrazione dei centri di ricerca legati alle tecnologie quantistiche (QT) nelle diverse aree del paese (Figura 5). Questo è dovuto allo stato non ancora maturo della tecnologia, che richiede un significativo avanzamento scientifico per raggiungere la piena applicabilità industriale. Pertanto, le politiche pubbliche dovrebbero favorire investimenti che incentivino la collaborazione tra imprese, università e centri di ricerca, rafforzando un ecosistema di innovazione che supporti lo sviluppo scientifico delle QT.



Figura 5 – Distribuzione territoriale dei partecipanti alla consultazione MIMIT sulle QT

Tra i principali ambiti delle QT, il Quantum Computing suscita il maggiore interesse, sia per le promesse rivoluzionarie che per i potenziali rischi connessi in fatto di cybersicurezza, sebbene il suo livello di maturità

tecnologica (TRL) resti relativamente basso (Figura 6). Anche la Quantum Communication sta registrando un significativo sviluppo, mentre molte imprese si occupano di più pilastri contemporaneamente.

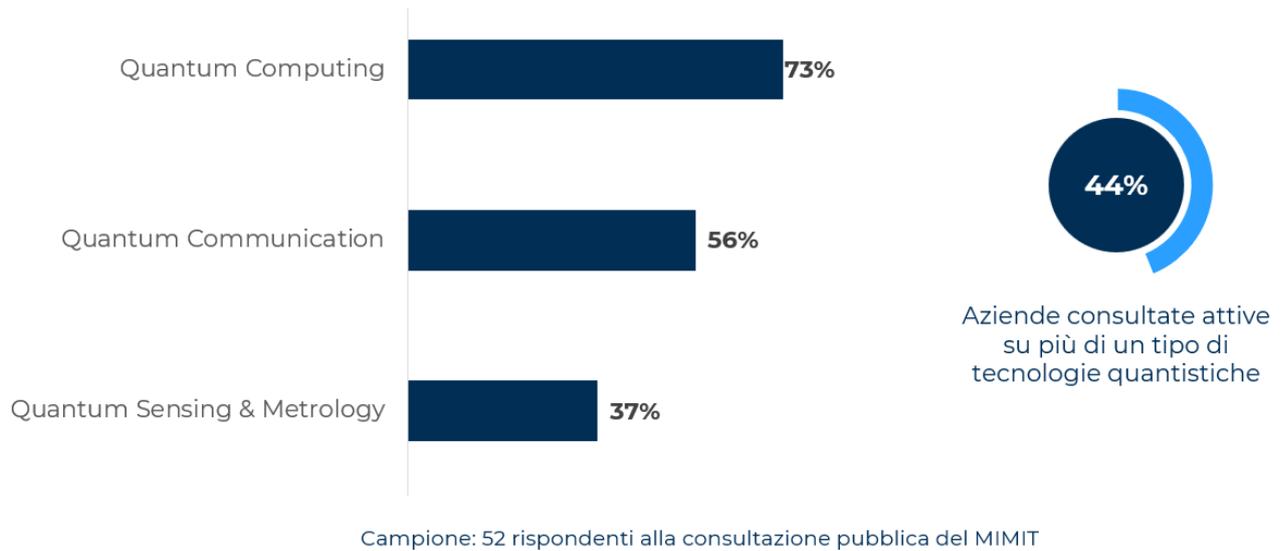


Figura 6 – Distribuzione delle tipologie di tecnologia quantistica sviluppata dalle imprese partecipanti alla consultazione MIMIT sulle QT

3.2 RISULTATI DELLE CONSULTAZIONI PER TECNOLOGIA

La catena del valore delle QT è per lo più globalizzata: nessun attore nella filiera ha una capacità di produzione completamente integrata, in un contesto di mercato che crea quindi molte possibilità di collaborazione. Questo genera opportunità interessanti per gli attori italiani, che già operano in segmenti specifici della filiera.

I dati emersi confermano quindi che il mercato italiano delle tecnologie quantistiche si trova in una **fase di consolidamento, con diverse aree di sviluppo e opportunità.**

I clienti del mercato delle tecnologie quantistiche in Italia si suddividono in due principali categorie:

- **Aziende della filiera delle QT:** queste realtà si occupano di acquistare e assemblare componenti per la realizzazione di prodotti finiti, contribuendo così allo sviluppo dell'ecosistema tecnologico nazionale.
- **Aziende utilizzatrici finali:** si tratta di imprese che investono nelle QT per acquisire competenze strategiche in vista di una loro futura diffusione su larga scala o che iniziano a dotarsi di soluzioni e strumenti Quantum Safe (ad esempio, la tecnologia QKD - Quantum Key Distribution) per migliorare la sicurezza delle loro comunicazioni.

A. Quantum Computing: mercato, infrastrutture e produzione

Le consultazioni evidenziano come il mercato del Quantum Computing sia ancora in una fase embrionale, richiedendo uno sforzo significativo su tutto lo stack tecnologico, dall'hardware al middleware, fino al software e alle applicazioni finali. L'Italia si distingue per l'eccellenza nella componentistica, ma registra l'assenza di start-up di rilievo internazionale nello sviluppo tecnologico. Sebbene alcune start-up stiano orientando gli sforzi verso una futura creazione di hardware, attualmente non esistono aziende che offrono un hardware quantistico interamente italiano. La maggior parte delle imprese e delle start-up si concentra principalmente su software e applicazioni.

	Componenti abilitanti	Sviluppo HW	Sviluppo MW	Sviluppo SW	Applicazione end user	System Integration	Consulenza	Fondi di venture capital	Facilitatore	Totale Attori
HQ Italiano	2	5	2	8	6	1	4	3	2	12
HQ Estero	1	7	5	5	0	5	4	0	0	26
Totale complessivo	3	12	7	13	6	6	8	3	2	38

Tabella 3 – Distribuzione delle aziende consultate lungo la catena del valore: Quantum Computing

In **Tabella 3** è illustrata la distribuzione delle aziende consultate lungo la catena del valore per il **Quantum Computing**, presentata estensivamente nel capitolo 1.2. Ogni attore è stato censito nelle diverse tecnologie di appartenenza e in ogni categoria di attività. Pertanto, la somma del totale attori di Quantum Computing, Communication e Sensing sarà maggiore del totale delle aziende consultate, così come la somma di aziende attive lungo lo stack tecnologico sarà maggiore del numero delle aziende all'interno di ciascuna tecnologia.

Dal punto di vista della **componentistica**, l'ecosistema italiano della fotonica appare relativamente strutturato e offre opportunità concrete di sviluppo, con varie aziende del tessuto italiano che si occupano di componenti abilitanti. Tuttavia, al momento non emergono aziende italiane produttrici di hardware quantistico proprietario con caratteristiche promettenti in termini di scalabilità e capacità di integrazione con soluzioni software. Questa assenza potrebbe rappresentare un limite per la realizzazione di prodotti finali interamente nazionali nel lungo termine, rendendo necessario nel breve termine l'adozione di politiche di approvvigionamento che stimolino l'innovazione senza imporre restrizioni. Un passo importante in questa direzione potrebbe essere rappresentato dall'intenzione di alcune startup italiane di sviluppare un computer quantistico proprietario, segnando una possibile transizione dall'eccellenza nella componentistica verso la realizzazione di hardware quantistico italiano.

Per quanto riguarda il software, il mercato italiano appare più maturo, favorito dall'interesse crescente di grandi aziende "early adopters" – particolarmente nei settori bancario ed energetico – e dalla presenza di alcune startup che contribuiscono ad arricchire l'ecosistema e a promuovere lo sviluppo di soluzioni.

In generale, emerge un settore che necessita di investimenti cospicui pubblici e privati. Lo sviluppo dell'hardware per il Quantum Computing, in particolare, richiede ingenti capitali di rischio, nell'ordine di centinaia di milioni di euro. Questa necessità deriva dall'ampio e ancora in evoluzione spettro delle tecnologie di implementazione dei qubit, che rende il settore altamente incerto. Negli Stati Uniti, l'elevata disponibilità di capitali dedicati ad iniziative ad alto rischio ha contribuito significativamente alla nascita di aziende oggi considerate promettenti nel panorama del Quantum Computing. Tuttavia, secondo gli intervistati, mentre gli investimenti nel Quantum Computing si

caratterizzano per un rischio elevato, con ritorni attesi nel medio-lungo termine, la Quantum Simulation offre possibilità di crescita a breve termine con minori investimenti.

Al contrario dell'hardware, gli investimenti nel software risultano meno rischiosi, grazie anche ad approcci di breve termine come il quantum-inspired, che consente di avvicinare i ritorni sull'investimento, rendendo il settore più attrattivo per i capitali privati. In questo contesto, nelle consultazioni è emersa la proposta di lanciare "challenge" applicative a livello nazionale, coinvolgendo aziende e università, con l'obiettivo di stimolare lo sviluppo di soluzioni innovative e scalabili, similmente alle Challenge prizes organizzate nel Regno Unito - per maggiori dettagli si faccia riferimento alla sezione "4.2 Le strategie nazionali dei singoli Paesi e le politiche pubbliche".

dove si prevede lo stanziamento di fondi volti a incentivare lo sviluppo di soluzioni tecnologiche avanzate a supporto di specifici problemi).

Tra gli ostacoli oggi segnalati in questo campo, le consultazioni hanno evidenziato i tempi di attesa prolungati per l'accesso alle infrastrutture, i tempi di inattività molto lunghi dei laboratori. Inoltre, il tema della proprietà intellettuale è critico: l'assenza di fonderie specializzate in Italia porta molte aziende a collaborare con strutture estere, creando preoccupazioni riguardo alla tutela dei loro brevetti e alla sicurezza dei processi.

Sebbene le infrastrutture italiane nel settore possano essere rafforzate, il Paese è ricco di eccellenze che potrebbero essere valorizzate per evitare un'eccessiva dipendenza dalle tecnologie internazionali.

B. Quantum Communication: mercato, infrastrutture e produzione

Secondo quanto emerge dalle consultazioni, la **Quantum Communication** è un settore in cui l'Italia eccelle per presenza di startup e sperimentazioni riconosciute a livello internazionale. Si tratta di tecnologie caratterizzate da una maturità più elevata rispetto a quelle di Computing. Le principali applicazioni sono nell'ambito della cybersicurezza e riguardano la progettazione di comunicazioni Quantum Safe, ovvero ritenute sicure contro potenziali attacchi di un computer quantistico rispetto alle conoscenze attuali, e Quantum Secure, cioè nativamente sicure in quanto basate sui principi della meccanica quantistica.

	Componenti abilitanti	Sviluppo HW	Sviluppo MW	Sviluppo SW	Applicazione end user	System Integration	Consulenza	Fondi di venture capital	Facilitatore	Totale Attori
HQ Italiano	3	3	3	6	1	5	1	3	2	7
HQ Estero	1	1	1	3	0	3	2	0	0	22
Totale complessivo	4	4	4	9	1	8	3	3	2	29

Tabella 4 – Distribuzione delle aziende consultate lungo la catena del valore: Quantum Communication

In **Tabella 4** è illustrata la distribuzione delle aziende consultate lungo la catena del valore per la **Quantum Communication**.

Dal punto di vista della catena del valore, la produzione delle tecnologie di Quantum Communication in Italia fa leva su componenti elettroniche assemblate all'estero poiché non esiste una filiera nazionale. In particolare:

- le schede elettroniche, pur essendo spesso progettate localmente, vengono assemblate fuori dal Paese;
- le componenti ottiche, che possono essere prodotte internamente.

A livello di dispositivi hardware quantistici per la Communication, l'Italia assume una posizione competitiva, potendo vantare società in grado di commerciare e integrare taluni prodotti per la QC. Tuttavia, queste tecnologie presentano ancora profili di migliorabilità in quanto risultano costose rispetto agli output attesi.

A livello software, sono già disponibili degli algoritmi testati per essere resistenti all'attacco di un potenziale computer quantistico e anche in Italia esistono attori che si stanno attivando per offrire servizi di Post-Quantum Cryptography. In questo caso, la complessità maggiore risiede nell'aggiornamento degli attuali sistemi di crittografia: è necessario mappare il portafoglio applicativo in essere e identificare eventuali vulnerabilità. Le soluzioni di QKD e Post-Quantum Cryptography possono essere tecnologie complementari e integrate in un unico prodotto.

Dal punto di vista delle aziende della domanda, si registrano alcuni casi d'uso, per i quali l'interesse riguarda principalmente i settori assicurativo e finanziario, le telecomunicazioni, il settore spaziale e la difesa.

L'ostacolo principale allo sviluppo del settore è oggi rappresentato dalla mancanza di standardizzazione e certificazione delle tecnologie, che rallenta la loro diffusione capillare. Il 40% delle aziende attive nel campo della Quantum Communication riporta problemi legati alla mancanza di consapevolezza rispetto al rischio e alla presenza di dubbi legati alla dimostrabilità dei protocolli. È necessario incentivare la domanda per accrescere la diffusione di queste tecnologie.

C. Quantum Sensing: mercato, infrastrutture e produzione

Per quanto riguarda il quantum sensing e la metrologia, l'Italia vanta una significativa filiera di sensoristica tradizionale che potrebbe essere valorizzata in ottica quantistica e agevolare la futura industrializzazione del settore. La componentistica, in particolare in aree come laser e controllo automatico (tra le altre), rappresenta un'opportunità significativa per il mercato italiano. Una nuova startup italiana è recentemente nata nel campo del quantum sensing e alcune aziende già attive nel settore stanno sviluppando la tecnologia.

	Componenti abilitanti	Sviluppo HW	Sviluppo MW	Sviluppo SW	Applicazione end user	System Integration	Consulenza	Fondi di venture capital	Facilitatore	Totale Attori
HQ Italiano	3	2	3	5	1	1	0	3	2	3
HQ Estero	1	1	0	0	0	1	0	0	0	16
Totale complessivo	4	3	3	5	1	2	0	3	2	19

Tabella 5 – Distribuzione delle aziende consultate lungo la catena del valore: Quantum Sensing

In **Tabella 5** è illustrata la distribuzione delle aziende consultate lungo la catena del valore per il **Quantum Sensing**.

Per quanto riguarda l'approvvigionamento di materiali, le aziende non si limitano al panorama italiano, ma spesso cercano risorse anche all'estero. È possibile trovare in Italia la componentistica in vetro, mentre la componentistica elettronica si ricerca all'estero.

Dal punto di vista delle facility per la nanofabbricazione, sono spesso necessarie la lavorazione del silicio e dell'Arseniuro di Indio e Gallio (InGaAs). In Italia e in Europa, esistono facility per la lavorazione del silicio – ad esempio le fonderie di STMicroelectronics ad Agrate e a Catania - mentre la lavorazione dell'InGaAs si svolge

principalmente in Nord America. Per quanto riguarda quest'ultimo materiale (InGaAs), le aziende necessitano di partner in grado di gestire l'intero processo, tuttavia, in Europa le fonderie esistenti tendono a lavorare solo per uso interno e non per conto terzi: l'assenza di fonderie che operino per conto terzi rappresenta quindi un limite. Lavorare con fonderie che non accettano commesse esterne può creare rischi di violazione della proprietà intellettuale (il cosiddetto *IP infringement*).

Dal punto di vista hardware, stanno nascendo adesso startup in Italia che si occupano di Quantum Sensing. In tale ambito, è presente una start-up in sud Italia che si occupa di chips atomico-fotonici e sensori atomici quantistici integrati, con l'obiettivo di chiudere il gap tra fotonica integrata e sensoristica. Tuttavia, è ancora in fase early stage e ha appena concluso la prototipazione. Inoltre, anche aziende del mercato del sensing tradizionale si stanno attivando per produrre sensori quantistici.

A livello software, sono presenti 5 aziende specializzate in system engineering e software nel mondo tradizionale attive anche nel settore del Quantum Sensing & Imaging, due aziende in particolare con l'obiettivo di portare queste tecnologie nello spazio. Parallelamente allo sviluppo della tecnologia, infatti, gli sforzi si concentrano sull'integrazione dei sensori quantistici in contesti reali: su questo sta lavorando una startup innovativa. Infatti, questi strumenti sono estremamente sensibili alle condizioni ambientali, ed è spesso necessaria una progettazione specifica per garantirne l'efficacia, ad esempio, in applicazioni in aria o in acqua.

Dal punto di vista delle aziende della domanda, il mercato italiano si mostra interessato, poiché gran parte della sensoristica è arrivata ai limiti di quel che si può ottenere con tecnologie classiche. Secondo quanto emerso nel corso delle consultazioni, nel settore della Difesa registra un forte interesse verso queste tecnologie e sta esplorando diversi scenari applicativi. Le applicazioni in questo settore, sebbene inizialmente orientate alla Difesa, hanno il potenziale di generare ricadute positive anche nel mercato commerciale, portando innovazioni in vari ambiti tecnologici.

Alcune sfide tecniche alla realizzazione dei sensori quantistici riguardano:

- la capacità di discriminare il segnale dal rumore;
- la capacità di miniaturizzare i sensori quantistici;
- la capacità di progettare i sensori in base alle caratteristiche dell'ambiente reale in cui operano.

Le applicazioni del quantum sensing sono molto ampie e spaziano su diversi settori, tuttavia, la tecnologia rimane ancora poco conosciuta e al momento molte innovazioni sono ancora a livello di esperimenti di laboratorio. Molto del potenziale della sensoristica quantistica dipenderà dalla capacità di creare infrastrutture sopra queste tecnologie. Opportunità future riguardano anche la prospettiva di reti di sensori collegati a computer quantistici.

3.3 RISULTATI DELLE CONSULTAZIONI PER AREA D'INTERVENTO

Nel corso delle consultazioni sono state segnalate alcune principali aree di miglioramento (Figura 7):

- la necessità di potenziare l'infrastruttura tecnologica, sia per la produzione di componenti hardware avanzati sia per il supporto alle comunicazioni quantistiche;

- la creazione e il coordinamento di un ecosistema industriale;
- lo sviluppo di competenze e di talenti;
- la promozione di finanziamenti pubblici e privati;
- la consapevolezza circa le applicazioni e domanda per le QT;
- la necessità di standardizzazione dei protocolli di comunicazione quantistica (ad esempio la QKD).



Figura 7 – Distribuzione delle aree di interesse maggiormente segnalate dai rispondenti

Nel corso delle consultazioni, sono emersi punti di attenzione anche rispetto ad aree di intervento trasversali alle diverse QT, come nella produzione o nella formazione. Ad esempio, un punto sollevato dai partecipanti alle consultazioni indica che le aziende collaborino attivamente con il mondo accademico, investendo in partnership per esternalizzare e ricevere supporto nelle attività di R&S. Allo stesso tempo, emerge la necessità di intensificare la competizione accademica e di istituire una regia nazionale che possa armonizzare le priorità della ricerca e dell'industria, facilitando così il trasferimento tecnologico e creando un ecosistema più coeso e competitivo.

Di seguito si descrivono le principali aree di miglioramento e i più significativi messaggi emersi dalle consultazioni.

A. Direzione governativa e coordinamento

I fondi stanziati dal PNRR hanno permesso la creazione di un ecosistema nazionale sulle Quantum Technologies che, nelle consultazioni, si è rivelato ricco e dinamico, evidenziando un forte interesse da parte degli attori nel creare una rete collaborativa. Tuttavia, la mancanza di un piano nazionale dedicato viene percepito come un ostacolo allo sviluppo ulteriore del settore in Italia. Per garantire continuità agli sforzi già intrapresi, è indispensabile adottare un approccio strategico di lungo termine, flessibile e capace di adattarsi all'evoluzione delle tecnologie. Secondo quanto emerso nel corso delle consultazioni, tale piano dovrebbe considerare sia le opportunità sia le minacce legate al settore, includendo KPI per monitorare i progressi. Lo sviluppo di un piano sul lungo termine

potrebbe garantire non solo una maggiore fiducia degli investitori per attrarre capitali privati, ma anche aumentare l'interesse di aziende straniere a investire o stabilirsi in Italia. Inoltre, permetterebbe un coordinamento più efficace delle iniziative locali su scala nazionale e una cooperazione internazionale più stretta, favorendo uno sviluppo sinergico del settore, contribuendo alla creazione di normative e alla standardizzazione tecnologica.

La mancanza di una strategia unificata rischia di portare a sforzi frammentati e potenzialmente inefficaci. Viene quindi segnalata la necessità di maggiore coordinamento e rafforzamento delle capacità produttive nazionali in questo settore strategico. Il 20% dei rispondenti crede che sia necessaria un maggiore coordinamento tra gli attori della filiera, necessità ancora più sentita dalle grandi aziende (29%).

Sul fronte del trasferimento tecnologico, il settore quantistico e quello deep tech richiedono un approccio dedicato, che vada oltre il focus su tecnologie mature. Sarebbe quindi utile promuovere la presenza di centri specializzati, dove le competenze avanzate in ambito quantistico presenti in Italia possano essere messe a disposizione delle grandi aziende. Questi centri favorirebbero la risoluzione di sfide industriali complesse, stimolerebbero la nascita di nuove applicazioni e faciliterebbero la crescita di startup e di una filiera nazionale innovativa nel settore quantistico.

B. Infrastrutture e produzione

Le imprese del settore quantistico in Italia incontrano sfide importanti legate alla disponibilità di infrastrutture adatte alle QT, che spesso le porta a cercare soluzioni al di fuori dei confini nazionali. I risultati della consultazione indicano che il 36% delle aziende di Quantum Computing, il 40% di quelle di Quantum Communication e circa un terzo delle imprese di Sensing & Metrology manifestano la necessità di miglioramenti in questo ambito.

Vi è quindi un problema di dipendenza tecnologica da fornitori esteri, che crea difficoltà nell'approvvigionamento e nei tempi di consegna. È però improbabile che un singolo Paese europeo possa sostenere investimenti significativi per integrare tutta la filiera in questo ambito; una strategia comune europea potrebbe essere più efficace. Investire in queste facility implicherebbe, anche se a costi più elevati, tempi di approvvigionamento ridotti, un miglioramento di know-how locale e un rafforzamento della sovranità europea nel settore.

Un'opportunità rilevante è rappresentata dal progetto europeo QU-PILOT, pensato per integrare e connettere impianti pilota quantistici in tutta Europa. Molti stakeholder vedono positivamente la possibilità di fornire alle aziende italiane accesso a infrastrutture europee nel breve periodo, pur mantenendo una visione a lungo termine che preveda il potenziamento di impianti d'eccellenza in Italia.

Un'altra area di interesse riguarda la diffusione della Quantum Key Distribution (QKD), per la quale sarebbe auspicabile una rete di comunicazione integrata e retrocompatibile con le tecnologie classiche. La costruzione di un'infrastruttura per la QKD è un processo in evoluzione che potrebbe giovare di un ritmo di sviluppo più rapido.

C. Risorse umane e formazione

Le competenze scientifiche nel settore delle tecnologie quantistiche sono considerate soddisfacenti grazie alla solida preparazione accademica. Tuttavia, molte startup faticano ad attrarre talenti, poiché questi spesso preferiscono

opportunità di carriera all'estero. Si rileva inoltre una carenza di formazione di competenze imprenditoriali specifiche per l'industria delle QT.

Risultano promettenti le collaborazioni tra università e aziende, che possono supportare gli sforzi di R&S attraverso l'accesso ai laboratori e la formazione di personale altamente qualificato, finanziando dottorati e master specializzati.

D. Finanziamenti

➤ **Finanziamenti privati**

L'ecosistema italiano dei finanziamenti privati, in particolare il Venture Capital, non appare ancora completamente pronto a sostenere il settore delle QT. Gli investimenti disponibili sono spesso limitati in termini di importo e caratterizzati da un orizzonte temporale breve, condizioni che ostacolano il potenziale di crescita delle startup del settore. Tuttavia, iniziative come Quantum Italia rappresentano una valida opportunità di supporto, mentre programmi come il Quantum Launchpad in Francia e lo Spoke 10 in Italia potrebbero fungere da modelli di ispirazione per potenziare gli investimenti.

➤ **Finanziamenti pubblici**

I finanziamenti pubblici, sebbene presenti, sono percepiti dai rispondenti come insufficienti e vincolati da complessità burocratiche che ostacolano in particolare le PMI. Inoltre, si segnala la necessità di rivedere alcuni strumenti di incentivazione, come ad es. "Smart & Start". Spesso, infatti, le modalità di incentivazione sono percepite come inadeguate per le startup del settore quantistico, poiché i tempi di erogazione non coincidono con le necessità operative delle imprese e con le tempistiche che caratterizzano queste tecnologie.

Il 20% delle organizzazioni segnala l'insufficienza complessiva dei finanziamenti, sia privati sia pubblici, con un impatto significativo sulle startup, il 54% delle quali percepisce questo limite come un ostacolo alla crescita. Tale difficoltà emerge anche nel 43% delle organizzazioni attive nel Quantum Computing e nel 10% di quelle nel Quantum Communication.

4. SCENARIO INTERNAZIONALE

4.1 MERCATO GLOBALE

A. Stato dell'arte: gli investimenti pubblici nel mondo

L'industria delle tecnologie quantistiche si trova oggi in una fase di ricerca e sviluppo, prevalentemente guidata dai governi che stanno investendo miliardi di dollari in ricerca pubblica con orizzonti di lungo termine, consapevoli dell'enorme impatto sulla competitività economica e sulla sicurezza nazionale.

Esaminando i fondi stanziati a livello globale sulle tecnologie quantistiche, si evidenziano investimenti pari a 23,8 miliardi di dollari tra il 2012 e il 2024, con ulteriori 17,7 miliardi annunciati tra il 2025 e il 2035. La fiducia verso gli impatti potenziali di queste tecnologie è a oggi elevata, con fondi crescenti anno su anno: in particolare, sono stati stimati 5,9 miliardi di dollari nel 2024 a livello globale (+37% rispetto alla stima sul 2023).

Nella maggior parte dei Paesi, queste risorse sono allocate nel lungo periodo (5-10 anni) con un approccio che tiene conto dello stato prototipale in cui si trovano queste tecnologie e dello sforzo continuativo che richiederanno per poter esprimere il proprio potenziale nel corso del prossimo decennio. L'investimento pubblico è ancora il principale impulso per il settore nel mondo e promuove la creazione di un ecosistema privato, oggi ancora embrionale ma ad alto potenziale.

A livello globale, la leadership di alcuni Paesi pionieri nelle tecnologie quantistiche è messa alla prova dalla competizione e dall'incremento degli investimenti pubblici in diversi Stati (Figura 8). Geograficamente, l'Asia guida gli investimenti governativi, con il 53% dei 41,5 miliardi di dollari complessivamente stanziati, trainata dagli ingenti fondi della Cina, stimati intorno ai 15 miliardi di dollari, ma su cui si hanno meno informazioni rispetto agli altri Paesi. La Cina è leader nelle comunicazioni quantistiche, supportata da significativi fondi pubblici che compensano i limitati investimenti privati; tuttavia, il suo approccio isolato potrebbe ostacolare la crescita futura. Seguono l'Europa con il 31% e l'America con il 14%. Nonostante l'America appaia più indietro nei numeri, in realtà applica un approccio di investimento anno su anno – al contrario della logica pluriennale applicata dagli altri paesi – coadiuvato da un vivace ecosistema di startup e una maggiore capienza degli investimenti in venture capital. Gli Stati Uniti mantengono una posizione dominante soprattutto nel settore del Quantum Computing, il segmento economicamente più rilevante, pur affrontando una carenza di talenti e la crescente concorrenza di Cina ed Europa. Tra gli altri Paesi leader a livello globale troviamo: il Canada, uno dei pionieri del settore, che investe in maniera consistente per ampliare le proprie capacità scientifiche e favorire lo sviluppo industriale; la Repubblica di Corea, che mira ad avanzare nel campo delle tecnologie quantistiche attraverso un ambizioso piano per il 2035 e collaborazioni con grandi aziende; ed il Giappone, che punta a rafforzare le proprie capacità industriali grazie a partnership internazionali, con l'obiettivo di consolidare la propria posizione entro il 2030.

In tale scenario, l'Unione Europea può contare su ingenti investimenti pubblici, un'importante presenza di talenti e una leadership nella ricerca, ma sconta ancora un ritardo negli investimenti privati e nel trasferimento tecnologico oltre che una maggiore frammentazione degli sforzi: l'11% del totale rilevato nell'area UE è investito dalla

Commissione Europea e non esiste una strategia che coordini le iniziative dei singoli Paesi. I principali investitori del continente europeo sono il Regno Unito, la Germania e la Francia, con l'Olanda poco distante. Il Regno Unito, in particolare, si distingue per una strategia decennale e per il National Quantum Computing Centre⁴⁷, il quale si posiziona come hub globale, attirando significativi investimenti privati. Questi Paesi sono determinati a non perdere l'occasione di assumere una leadership tecnologica nel settore quantistico, evitando di ripetere gli errori del passato in altre arene tecnologiche, come accaduto con il Cloud Computing e l'Intelligenza Artificiale, oggi dominati dalle grandi aziende statunitensi. Per fare un esempio, secondo l'Osservatorio Cloud Transformation del Politecnico di Milano oltre il 65% del mercato europeo del Cloud Computing (94 miliardi di dollari nel 2023) è oggi in mano alle tre big tech statunitensi (Amazon, Google e Microsoft). La tecnologia è il comparto dove si giocherà la competitività economica futura delle grandi potenze, che vogliono garantirsi accesso diretto a queste infrastrutture e non perdere proattività nella risposta ai rischi legati alla sicurezza nazionale, ad esempio alla sofisticazione degli attacchi hacker.

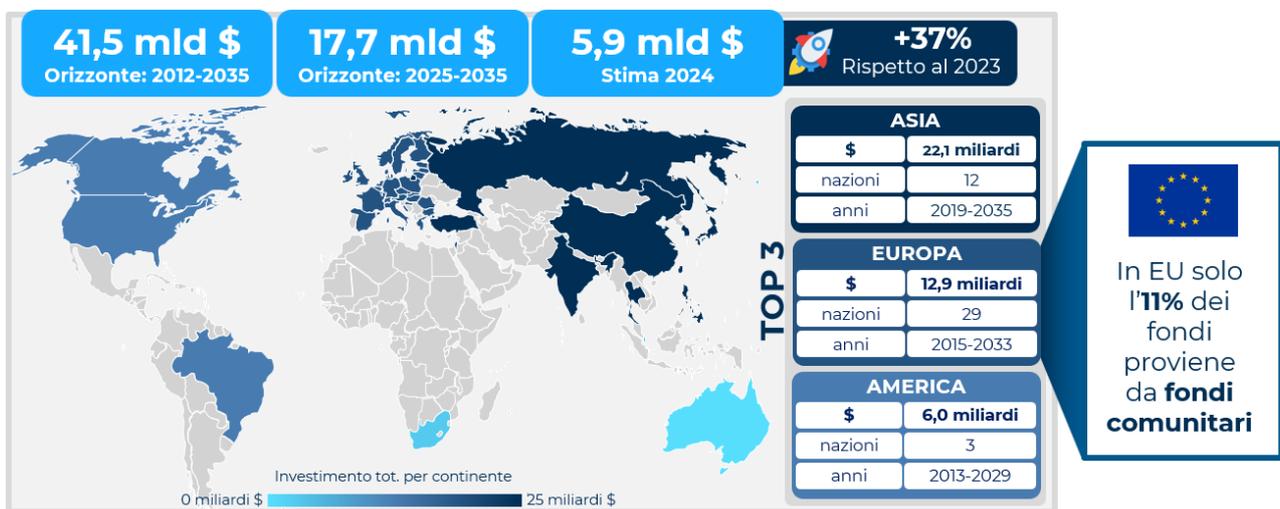


Figura 8 – Rappresentazione dei finanziamenti pubblici internazionali. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication

B. Stato dell'arte: lo sviluppo della filiera dell'offerta globale

L'impulso fornito dai fondi pubblici sta favorendo la nascita di un ecosistema che coinvolge anche il settore privato: da un lato startup e aziende dell'offerta, che stanno nascendo dai laboratori universitari e sviluppando la tecnologia, e dall'altro le imprese della domanda, che sperimentano oggi per garantirsi un vantaggio competitivo futuro.

La filiera tecnologica delle tecnologie quantistiche nel mondo è emergente ma in crescita: sono stati identificati⁴⁸ attori attivi lungo l'intero strato tecnologico, che va dall'hardware e dalle sue componenti abilitanti, agli ambienti middleware, fino al software. Di questi attori, il 78% rappresenta imprese "quantum-native", ovvero nate con un modello di business incentrato su questo ambito.

Un'analisi dettagliata della distribuzione geografica delle aziende native rilevate rivela che il 41% ha sede in Europa, il 39% nelle Americhe, il 18% in Asia e solo il 2% in Oceania e Africa (Figura 9). Questa distribuzione è influenzata anche dal numero di Paesi impegnati nel settore quantistico. In Europa, ad esempio, ci sono 19 Paesi con aziende

⁴⁷ <https://www.nqcc.ac.uk/>

native del settore quantistico, rispetto ai soli cinque delle Americhe. Guardando alla top 3 dei Paesi per numero di aziende, guidano gli Stati Uniti con 102 aziende, seguiti dal Canada con 39 e dal Regno Unito con 35. Questa concentrazione evidenzia il dominio di alcune nazioni chiave nel guidare i progressi della tecnologia quantistica su scala globale.

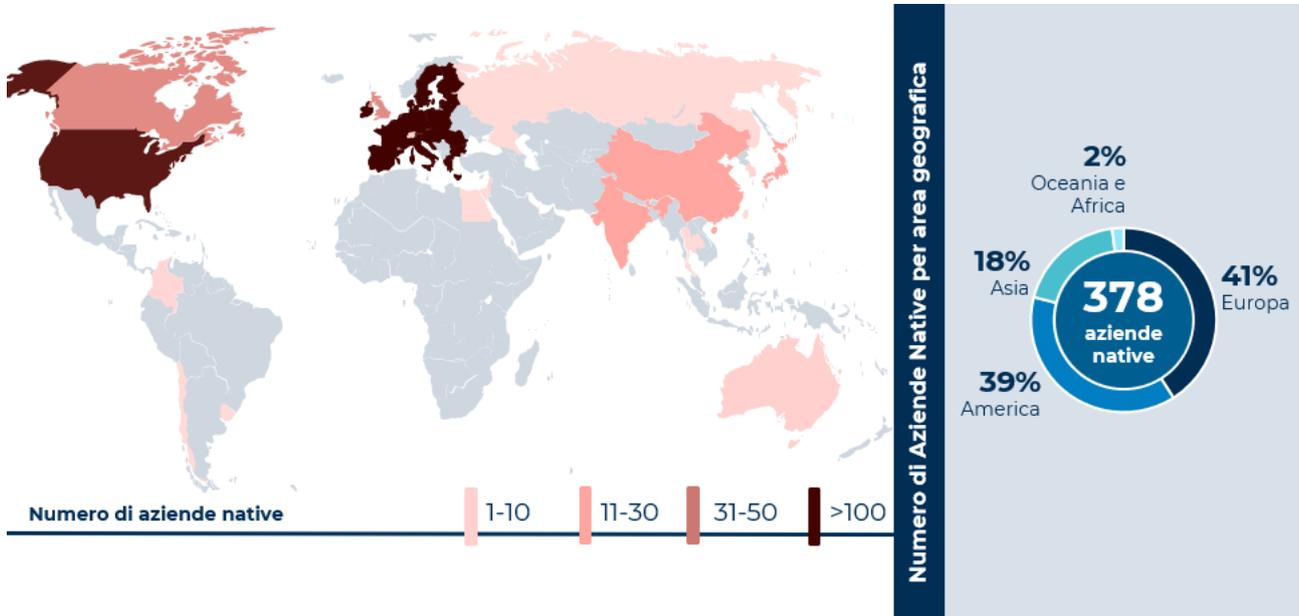


Figura 9 – Rappresentazione di aziende native del settore quantistico per area geografica. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication

Per il 46% di queste aziende quantum-native sono disponibili i dati sui finanziamenti: dal 2019 ad oggi, hanno raccolto complessivamente 6,1 miliardi di dollari, di cui ben il 56% concentrato in America contro il 29% europeo e il 10% asiatico. Ben 2,5 miliardi dei finanziamenti totali sono stati raccolti solo tra il 2023 e ottobre 2024: un segnale positivo di interesse dopo un calo degli investimenti nel 2023, dovuto anche a una flessione generale del Venture Capital nel settore delle deep tech (Figura 10). Un esempio emblematico è l'investimento di oltre 600 milioni di dollari da parte del governo australiano in PsiQuantum, una startup della Silicon Valley con radici australiane che sta lavorando allo sviluppo di un computer quantistico fotonico.

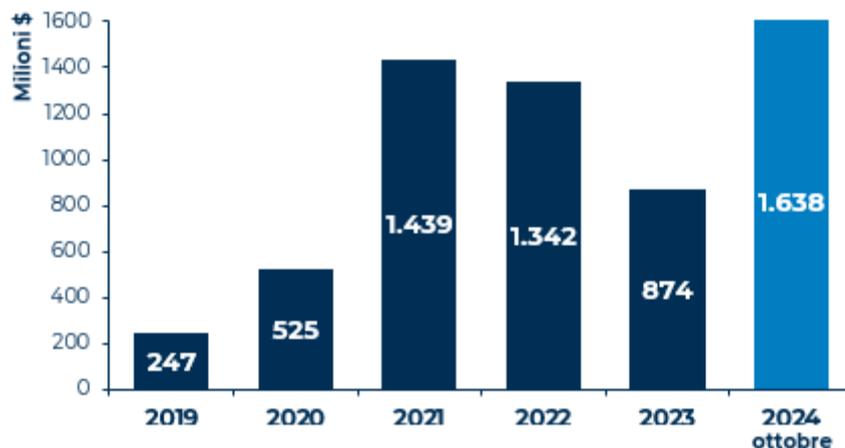


Figura 10 – Cronologia dei finanziamenti raccolti dalle aziende native del settore quantistico. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication

La vista per tecnologia è la seguente:

- Il panorama del **Quantum Computing** è eterogeneo e in via di sviluppo. Dal 2019 a oggi, sono stati stanziati 5,7 miliardi di dollari di finanziamenti in startup e aziende native in questo campo, il 54% dei quali in realtà che sviluppano componentistica e hardware quantistico, il 18% su attori che stanno sviluppando piattaforme middleware e software, mentre un ulteriore 28% su offerte full-stack (dall'hardware al software). Complessivamente, 69 aziende stanno sviluppando hardware per computer quantistici: si tratta sia di startup native del settore sia di grandi aziende del settore dell'informatica che stanno differenziando il proprio business anche in questo campo (es. IBM, Google, Amazon). Sul totale delle 69 aziende, 27 sono americane, 26 sono europee, 12 asiatiche e 4 australiane. Questi attori stanno lavorando con approcci diversi per un totale di 7 tipologie di qubit (quantum bit) attualmente mappate sul mercato: superconducting, neutral atoms, ion-trap, photonics, spin-based, nitrogen vacancy, topological material. Sul totale degli approcci tecnologici, oggi solo 4 su 7 sono accessibili e utilizzabili in modalità self-service dagli utilizzatori (ricercatori e aziende della domanda), in particolare: 13 aziende su 69 offrono un accesso Cloud all'infrastruttura, abilitando la sperimentazione e quindi potenzialmente accelerando la catena di sviluppo del computer dall'hardware al software. Questo connota un mercato ancora fortemente eterogeneo e caratterizzato dall'assenza di metriche standard con cui confrontare tecnologie differenti: la mancanza di standardizzazione genera una difficoltà per chi utilizza la tecnologia a definire delle strategie focalizzate di adozione e fa prevalere un approccio di differenziazione, che spesso fa leva su tecnologie di diversi Paesi. Nonostante ciò, si stanno delineando alcune tecnologie più promettenti di altre:
 - La tecnologia superconduttiva è stata scelta da alcune big tech statunitensi (AWS, IBM e Google), che hanno capacità di investimento elevata per far progredire lo sviluppo rapidamente;
 - La tecnologia fotonica da sola detiene il 39% dei fondi in equity complessivamente stanziati su aziende native del settore;
 - La tecnologia a ioni intrappolati ha un'elevata affidabilità dimostrata per singola operazione (2-qubit gate fidelity superiore al 99.9%);
 - La tecnologia ad atomi neutri ha un maggior numero di qubit logici raggiunti (48) e una buona accessibilità dei prodotti che dimostra una certa maturità dell'offerta (2 aziende su 5 offrono accesso Cloud).
- Il mercato dell'offerta della **Quantum Communication** è caratterizzato da una maggiore maturità tecnologica con prodotti già prossimi alla commercializzazione ma ancora poco standardizzati e certificati. Dal censimento condotto dall'Osservatorio, sono state identificate 98 aziende native nel campo delle comunicazioni quantistiche, ognuna con aree di interesse distinte e multiple: 37 sono americane, 41 europee, 19 asiatiche e 1 australiana. La quota maggiore (43%) si concentra sulla crittografia post-quantistica, offrendo servizi di consulenza, implementando algoritmi o sviluppando prodotti software progettati per resistere agli attacchi quantistici. La seconda area di interesse più comune, rappresentata dal 22% delle aziende, è la generazione di numeri casuali quantistici (Quantum Random Number Generation – QRNG), in cui le aziende sviluppano sistemi per produrre numeri intrinsecamente casuali basati sui principi della meccanica quantistica. Agli ultimi posti ci sono le soluzioni per reti quantistiche e Internet



quantistico (21%) e le soluzioni per la distribuzione di chiavi quantistiche (18%). Queste soluzioni sono spesso combinate in vari modi e molte aziende implementano più tecnologie. Ad esempio, i sistemi di crittografia ibrida progettati per reti altamente sensibili possono combinare la Quantum Key Distribution (QKD) con la Post-Quantum Cryptography (PQC) per creare un quadro di sicurezza a più livelli che sfrutta sia gli algoritmi resistenti ai quanti che lo scambio sicuro di chiavi quantistiche. Gli investimenti privati in aziende di questo tipo sono inferiori rispetto a quelli stanziati nella computazione e ammontano a 157 milioni di dollari dal 2019: si tratta di una tecnologia a TRL più alto e di un mercato più perimetrato rispetto a quello della computazione in quanto fortemente intermediato dagli attori del mondo Telco. È tuttavia un ambito fortemente interconnesso con lo sviluppo a lungo termine del settore della computazione quantistica: infatti, per garantire un'interconnessione tra nodi computazionali quantistici che non faccia perdere il vantaggio ottenuto dal calcolatore, sarà necessario utilizzare delle reti quantistiche (quantum internet). Lo sviluppo di entrambe le filiere è dunque rilevante per cogliere le opportunità economiche derivanti e per proteggere le comunicazioni attuali dai rischi emergenti.

- Infine, nella filiera dell'offerta del **Quantum Sensing** sono state identificate 28 aziende native. Per il 44% di queste aziende sono disponibili finanziamenti, per un totale di 170 milioni di \$. Queste aziende sono distribuite geograficamente in modo uniforme tra gli Stati Uniti (39%) e l'Europa (39%), con una presenza minore in Asia (22%). Analogamente al Quantum Computing, anche nel Quantum Sensing si possono utilizzare diverse tecnologie per la creazione di sensori avanzati. Un esempio significativo è rappresentato dai diamanti nitrogen-vacancy (NV), in cui un difetto nella struttura cristallina del diamante consente di misurare piccolissime variazioni nei campi magnetici. Questa tecnologia trova applicazione, ad esempio, in ambito biomedico, permettendo la rilevazione dei campi magnetici a livello cellulare. Altre tecnologie utilizzate includono sensori atom-based, superconduttivi e basati su ion-trap, con la scelta che varia in base al caso d'uso specifico. In termini di applicazioni, l'analisi delle aziende internazionali rivela i seguenti ambiti principali: Position & Navigation (dichiarato come focus da 6 aziende); Timing Capabilities (indicato da 4 aziende); Materials e Semiconductor Manufacturing (4 aziende); Biotecnologie e Life Sciences (4 aziende). Va sottolineato, tuttavia, che molte applicazioni del Quantum Sensing potrebbero essere ancora inesplorate. L'obiettivo non è solo migliorare le tecnologie esistenti, ma anche scoprire nuove applicazioni che possano rivoluzionare i settori in cui queste tecnologie vengono impiegate.

C. Stato dell'arte: il mercato della domanda globale e le opportunità future

Dal punto di vista del mercato della domanda, sono state approfondite le iniziative delle aziende leader a livello globale, partendo dalla classifica delle Forbes Global 2000 pubblicata nel 2024. Tra queste, 1.818 sono potenziali aziende utilizzatrici delle tecnologie quantistiche, di cui solo il 13% è realmente attivo con use case in sperimentazione, filoni di R&D, investimenti strategici o anche solo partecipazione a consorzi tematici. La percentuale sale al 44% se si guarda alle prime 200 aziende potenziali utilizzatrici, ovvero le più grandi e performanti. Le tecnologie quantistiche si confermano quindi oggetto dell'attenzione delle grandissime aziende che intendono investire ora per garantirsi un vantaggio competitivo futuro, avendo risorse economiche e visione necessarie per investire in questo campo. Guardando al totale delle aziende attive, il 51% delle aziende attive ha

annunciato progetti di sperimentazione del Quantum Computing, il 13% della Quantum Communication, il 4% di entrambe le tecnologie, mentre un ulteriore 32% ha avviato iniziative strategiche e culturali.

La computazione quantistica si conferma quindi il campo di maggior interesse per le aziende utilizzatrici, con impatti potenziali dirompenti in diversi casi d'uso. In particolare, l'utilizzo della computazione quantistica risulta di interesse per tutti quei problemi su cui le macchine e gli algoritmi classici non permettono di raggiungere una soluzione in un tempo utile oppure, per poterlo fare, arrivano a un risultato approssimato.

Per capire le potenzialità future, sono stati analizzati gli annunci di sperimentazione realizzati dalle aziende nel mondo. In particolare, sono stati identificati 303 annunci pubblici, di cui 256 sul Quantum Computing e 47 sulla Communication, sviluppati da un totale di 203 aziende.

Nell'ambito del **Computing**, la scomposizione dei progetti per settore è la seguente: settore finanziario (27% degli annunci), chimico farmaceutico e sanitario (21%), automobilistico (12%), energia, utility e telco (12%), aerospazio e difesa (9%), manifatturiero, logistica e retail (8%), IT (6%) e altro (5%) (Figura 11). Il settore finance guida il panorama del Quantum Computing grazie alla presenza di casi d'uso trasversali in vari ambiti in cui il quantum potrebbe portare vantaggi. Segue il mondo sanitario e chimico, considerato particolarmente promettente poiché molti problemi, come la simulazione molecolare, sono intrinsecamente quantistici. In questo campo i progetti sono delle sperimentazioni, che producono PoC (Proof of concept) ancora lontane dalla produzione ma volti a verificare in quali casi d'uso la computazione quantistica potrebbe portare vantaggio, a sviluppare algoritmi quantistici pronti per la produzione non appena le macchine saranno disponibili e ad acquisire know how nell'utilizzo di questo nuovo approccio alla computazione.



Figura 11 – Annunci di progetto pubblici sul Quantum Computing nel mondo. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication

Nell'ambito delle **comunicazioni quantistiche** invece, il panorama settoriale cambia (Figura 12): Telco e comunicazione detengono il 32% dei progetti annunciati, seguiti da IT con il 32%, finanza con il 26% e infine un 10% di altro. Dunque, guidano i settori telco e IT, spinti dall'obiettivo di rendere quantum safe i propri prodotti e

servizi, fungendo così da precursori nell'adozione di queste tecnologie per i clienti finali. La tecnologia è più matura quindi nel 43% dei casi i progetti sfociano nella commercializzazione di un prodotto Quantum safe.



Figura 12 – Annunci di progetto pubblici sulla Quantum Communication nel mondo. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication

Secondo gli analisti internazionali, l'industria delle tecnologie quantistiche è destinata a crescere significativamente nel breve e medio termine, nonostante si trovi in una fase di maturazione. Il settore è trainato principalmente dal Quantum Computing, che costituisce il segmento più rilevante (valutato 885 mln \$ nel 2023⁴⁸), ma è sostenuto anche dal rapido sviluppo della Quantum Communication (775 mln \$ nel 2023⁴⁹) e dal Quantum Sensing & Metrology (327,7 mln \$ nel 2023⁵⁰), con quest'ultimo ancora molto basato prevalentemente sulla ricerca. I settori che subiranno il maggiore impatto economico del Quantum Computing tra il 2025 e il 2030 includono principalmente i servizi finanziari, la chimica e la farmaceutica. Tuttavia, tra il 2030 e il 2035, le applicazioni del Quantum Computing potranno estendersi ulteriormente, apportando i maggiori benefici a nuovi ambiti, come l'energia sostenibile, i viaggi, i trasporti e la logistica, oltre a continuare a trasformare i settori già menzionati⁵¹. Per quanto riguarda la Quantum Communication, le tecnologie più mature ad oggi sono la Quantum Key Distribution (QKD) ed i Quantum Random Number Generators (QRNG)⁵². Dall'altro lato, il Quantum Sensing trova maggiore applicazione commerciale nelle scienze della vita (imaging e diagnostica), comunicazioni e trasporti (navigazione), microelettronica (rilevamento dei difetti e progettazione dei circuiti), ed energia e materiali (analisi sotterranea o in ambienti estremi)⁵³. Nel futuro, è stimato che i settori che vedranno maggiore crescita sembrano essere quelli del Quantum Computing e del Quantum Communication.

⁴⁸ <https://www.fortunebusinessinsights.com/quantum-computing-market-104855>

⁴⁹ <https://www.globenewswire.com/news-release/2024/06/06/2894898/0/en/Quantum-Communication-market-is-projected-to-grow-at-a-CAGR-of-25-7-by-2034-Visiongain.html>

⁵⁰ <https://www.fortunebusinessinsights.com/quantum-sensors-market-110331>

⁵¹

<https://www.mckinsey.com/~ /media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/steady%20p rogress%20in%20approaching%20the%20quantum%20advantage/quantum-technology-monitor-april-2024.pdf>

⁵² <https://qt.eu/applications/quantum-communication>

⁵³ <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/tech-forward/quantum-sensing-poised-to-realize-immense-potential-in-many-sectors>

Il mercato globale delle tecnologie quantistiche potrebbe crescere da un fatturato di 2,7 miliardi di dollari nel 2024 a 9,4 miliardi di dollari entro il 2030⁵⁴.

Inoltre, altre proiezioni a lungo termine indicano che il settore del Quantum Computing potrebbe raggiungere un fatturato compreso tra i 45 e i 131 miliardi di dollari entro il 2040⁵⁵. Parallelamente, il mercato del Quantum Sensing potrebbe aumentare da 1 miliardo di dollari a 6 miliardi, mentre il settore delle Quantum Communication potrebbe espandersi da 24 a 36 miliardi di dollari nello stesso periodo.

4.2 LE STRATEGIE NAZIONALI DEI SINGOLI PAESI E LE POLITICHE PUBBLICHE

Nel mondo, sono state individuate 14 strategie nazionali sulle Quantum Technologies. Di queste 14, per ragioni di reperibilità e comprensibilità, 9 sono state analizzate con l'obiettivo di comprendere le linee d'azione identificate, le loro misure più interessanti e i KPI individuati per monitorarne l'avanzamento generale. Gli Stati presi in considerazione sono: Australia, Canada, Danimarca, Francia, Germania, Irlanda, Olanda, Regno Unito, Stati Uniti.

Tutte le strategie analizzate sono focalizzate sulle tecnologie quantistiche in generale e non solo su una branca specifica, come Quantum Computing o Quantum Communication. Se da una parte le prime strategie sono già state pubblicate nel 2018 (come quella statunitense e olandese), negli anni si stanno attivando sempre più nazioni, con un totale di 5 nuove strategie negli ultimi due anni.

Per la maggior parte nascono dall'iniziativa di un ministero specifico, spesso Ministeri di Università e Ricerca o Ministeri dell'Economia e Industria. Interessanti sono due casi in particolare:

- il caso danese, in cui la strategia deriva dalla collaborazione di 2 ministeri distinti (Ministry of Higher Education and Science e Ministry of Industry, Business and Financial Affairs);
- il caso olandese, in cui la strategia è nata da un'iniziativa privata da parte della National Quantum Foundation Quantum Delta NL (QDNL), che è stata poi passata e ratificata dal governo olandese in un secondo momento.

Partendo dalle 9 strategie nazionali analizzate, si è costruito un framework di sintesi dei pilastri su cui più frequentemente si fondano questi documenti programmatici con i relativi KPI di monitoraggio. Di seguito se ne riporta l'elenco con obiettivo principale associato:

1. **Ricerca:** mirare ad avanzamenti significativi delle tecnologie quantistiche e delle loro applicazioni tramite il finanziamento di un sistema di centri di ricerca e università competitivo e attrattivo:
 - a. **Alcuni obiettivi e KPI di monitoraggio:**
 - i. Posizione internazionale per numero e qualità delle pubblicazioni scientifiche: la Germania punta a essere nella top 3 internazionale entro il 2026;

⁵⁴ <https://www.juniperresearch.com/research/iot-emerging-technology/iot-security/quantum-technology-market-report/>

⁵⁵

<https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/steady%20progress%20in%20approaching%20the%20quantum%20advantage/quantum-technology-monitor-april-2024.pdf>

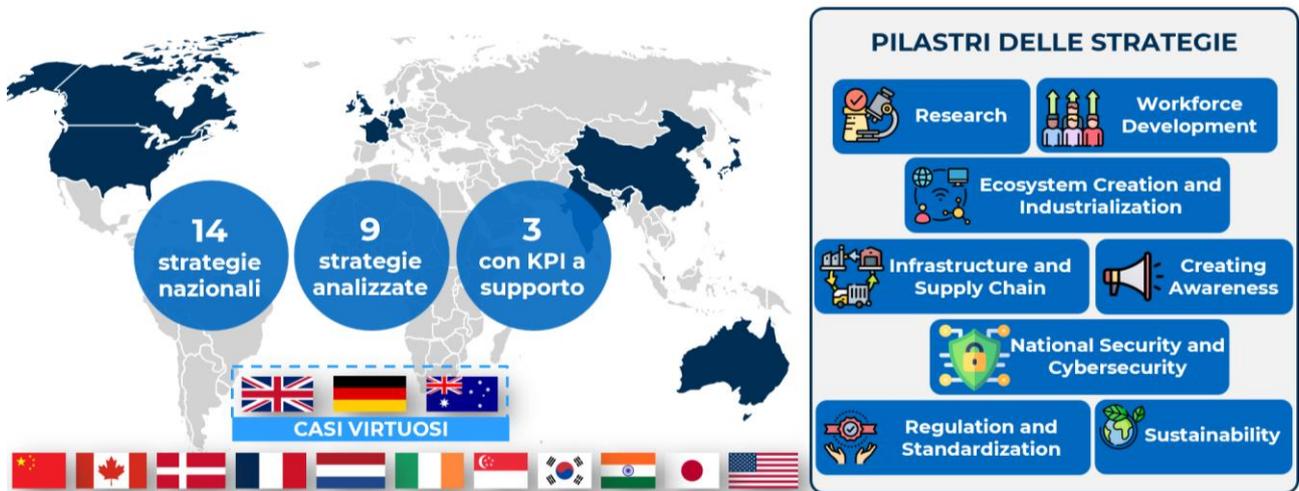


- ii. Numero di studenti di ricerca post-laurea in discipline quantistiche finanziati con fondi pubblici: il Regno Unito punta a +1000 in 10 anni;
 - iii. Sviluppo di un computer quantistico nazionale: la Germania intende ottenere almeno 100 qubit controllabili individualmente scalabili fino a 500 qubit entro il 2026;
 - iv. Dimostrazione del vantaggio quantistico: la Germania punta a dimostrarlo in almeno due applicazioni rilevanti per la pratica in 10 anni;
 - b. **Altri indicati senza target specifici:** aumentare la spesa complessiva in ricerca per lo sviluppo quantistico e il numero di progetti internazionali di ricerca.
2. **Creazione dell'ecosistema e industrializzazione:** garantire la collaborazione tra attori pubblici e privati per consentire lo sviluppo e la commercializzazione locale delle tecnologie quantistiche e delle loro applicazioni:
 - a. **Alcuni obiettivi e KPI di monitoraggio:**
 - i. Incrementare la quota di investimenti di private equity in società nazionali della filiera delle tecnologie quantistiche: il Regno Unito punta ad avere una quota del 15% degli investimenti globali entro 10 anni (+3pp);
 - ii. Detenere una posizione competitiva nel mercato globale delle tecnologie quantistiche: il Regno Unito punta ad accrescere la quota di mercato detenuta da aziende nazionali arrivando al 15% in 10 anni (+6pp);
 - iii. Detenere accordi bilaterali con le principali nazioni attive nell'ambito delle tecnologie quantistiche: il Regno Unito punta a passare da un accordo con gli Stati Uniti a stabilire accordi bilaterali con 5 nazioni entro 10 anni;
 - iv. Numero di start-up attive nell'ambito delle tecnologie quantistiche e del calcolo quantistico a livello locale: la Germania punta a quadruplicarle in 5 anni;
 - v. Numero di prodotti di Quantum Sensing nazionali immessi sul mercato: la Germania punta ad averne 5 in 5 anni;
 - b. **Altri indicati senza target specifici:** numero di nuove soluzioni applicative e vantaggi economici derivanti dall'applicazione delle tecnologie quantistiche, volume della produzione e quota di esportazione nel mercato mondiale, collaborazione stabile tra imprese e ricerca.
3. **Sviluppo di una forza lavoro qualificata:** sviluppare un bacino di talenti competente in tecnologie quantistiche con un riguardo alla presenza di competenze cross-settoriali e all'attrattività di talenti esteri:
 - a. **Alcuni obiettivi e KPI di monitoraggio:**
 - i. Creazione di posti di lavoro nelle tecnologie quantistiche: l'Australia punta a +19.400 posti sulle tecnologie quantistiche in 22 anni;
 - b. **Altri indicati senza target specifici:** aumentare il numero di dipendenti assunti in imprese operanti nella filiera delle tecnologie quantistiche a livello locale e ridurre il tasso di posti di lavoro vacanti, attrarre talenti dall'estero e aumentare il numero di domande e visti concessi ai candidati qualificati ammissibili per la migrazione, monitorare metriche relative all'iscrizione all'istruzione STEM.



4. **Infrastruttura e value chain:** garantire un ampio accesso all'hardware e alla componentistica delle tecnologie quantistica con riguardo all'importanza geopolitica di alcuni di essi:
 - a. **Alcuni obiettivi indicati con KPI senza target specifici:** grado di copertura della catena del valore delle tecnologie quantistiche, percezione di ostacoli alla crescita da ricerche di mercato, valore del contributo nazionale alle catene globali;
5. **Creazione di consapevolezza:** garantire una conoscenza diffusa delle tecnologie quantistiche nel tessuto imprenditoriale e del loro impatto nella società:
 - a. **Alcuni obiettivi e KPI di monitoraggio:**
 - i. Accrescere il numero di aziende rilevanti per l'economia nazionale che sono consapevoli del potenziale delle tecnologie quantistiche in quanto utilizzatrici: il Regno Unito vuole raggiungere il 100% in 10 anni;
 - ii. Incrementare il numero di aziende rilevanti per l'economia nazionale che hanno adottato misure per prepararsi all'arrivo del quantum computing e rispondere alle minacce: il Regno Unito vuole raddoppiare la percentuale di aziende che hanno adottato misure di Quantum Readiness in 10 anni (fino al 75%);
 - b. **Altri indicati senza target specifici:** sensibilizzazione dell'opinione pubblica sulle tecnologie quantistiche, grado di utilizzo economico/sociale e partecipazione dei cittadini, diffusione delle tecnologie nelle imprese.
6. **Sicurezza nazionale and Cybersecurity:** sfruttare le tecnologie quantistiche nel perseguimento della sicurezza nazionale ed economica e affrontare le eventuali minacce alla sicurezza informatica. In questo caso, non sono presenti KPI specifici se non quelli relativi alla preparazione alla minaccia da parte delle imprese utenti. È probabile che siano KPI e target presidiati esclusivamente dai Ministeri e gli enti preposti alla difesa e alla sicurezza informatica.
7. **Regolamentazione e standardizzazione:** creare un'innovazione responsabile e un ecosistema basato sulla fiducia attraverso standard tecnologici e normative specifiche:
 - a. **Alcuni obiettivi e KPI di monitoraggio:**
 - i. Avere una posizione di leadership nella classifica internazionale per numero di brevetti sulle tecnologie quantistiche: la Germania punta a essere tra i primi 5 Paesi entro 10 anni;
 - b. **Altri indicati senza target specifici:** diventare un leader globale nella definizione di standard per le tecnologie quantistiche, tasso di concessione di licenze e vendita proprietà intellettuale da parte delle società operanti nel campo delle tecnologie quantistiche.
8. **Sostenibilità:** sviluppare le tecnologie quantistiche in modo sostenibile attraverso tutta la filiera, mantenendo come focus vari indicatori ESG:
 - a. **Alcuni obiettivi indicati con KPI senza target specifici:** numero di soluzioni collegate agli obiettivi ESG, livello di riduzione delle emissioni dannose per il clima e di risparmio di risorse, effetti benefici sulla società dati da avanzamenti in settori chiave per il benessere umano (come sanità).

I casi virtuosi per completezza delle strategie rispetto ai pilastri identificati e per presenza di KPI quantitativi di monitoraggio con target specifici sono: Regno Unito, Germania e Australia.



I casi virtuosi sono indicati per completezza della strategia rispetto ai pilastri individuati e presenza di KPI di monitoraggio

Figura 13 – Strategie nazionali sulle Tecnologie Quantistiche e principali pilastri. Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication

Per maggiori dettagli sulle strategie virtuose, si può consultare la scheda dedicata in appendice [SCHEDA 1].

Diverse iniziative sono state realizzate dai Paesi analizzati per supportare la crescita della filiera nazionale e raggiungere la sovranità tecnologica nell’ambito del quantum.

Analizzando i diversi strumenti di policy adottati dai diversi stati analizzati, alcuni risultano particolarmente interessanti per il contesto italiano:

- **Forme di partenariato pubblico-privato:** questo strumento incentiva la collaborazione tra ricerca scientifica e produzione industriale, favorendo gli investimenti privati e l’identificazione di potenziali use cases (Stati Uniti, Regno Unito, Canada).
- **Challenge prizes:** stanziamenti di fondi volti a finanziare programmi di “premi a sfida” volti a incentivare lo sviluppo di soluzioni tecnologiche avanzate a supporto di specifici problemi. Questo strumento favorisce la collaborazione tra ricerca, le startup e le grandi imprese in ambito QT (Stati Uniti, Regno Unito, Canada).
- **Investimenti a supporto dell’infrastruttura:** supporto alla costruzione dell’infrastruttura attraverso investimenti in aziende quantistiche con piano industriale definito oppure attraverso finanziamenti a progetti pubblici (Stati Uniti, Unione Europea).
- **Acquisto delle soluzioni tecnologiche (es. quantum computer) da Paesi terzi:** Collaborazione internazionale e con aziende leader come IBM per supportare l’industrializzazione (Stati Uniti, Francia, Paesi Bassi, Germania, Repubblica di Corea, Giappone, Australia).

- Finanziamento pubblico ad aziende o consorzi per la costruzione di un prototipo di quantum computer con tecnologia propria per incentivare la creazione di una filiera nazionale (Francia, Corea, Germania).
- **Hub per favorire networking e ecosistema:** creazione di “hub”, centrati su istituti di ricerca dotati di infrastruttura adeguata, per connettere le grandi imprese con la ricerca e startup/spin-off e favorire la nascita di un ecosistema (Regno Unito, Germania, Giappone, Canada, Paesi Bassi).
- **Fondo di investimento sulle startup Quantum:** creazione di un fondo di investimento per supportare la crescita di spin-off e startup quantistiche nell’industrializzazione e nell’attrazione di ulteriori investimenti privati (Regno Unito, Canada, Paesi Bassi).
- **Creazione di programmi di incubazione:** realizzazione di programmi di formazione imprenditoriale mirati alla nascita di spin-off supportate da un ecosistema di partner che ne facilitano la crescita (Canada).

Per maggiori dettagli sulle economie e gli ecosistemi menzionati, si può consultare la scheda dedicata in appendice [SCHEDA 2].

4.3 IL MERCATO EUROPEO

A. Stato dell’arte: gli investimenti pubblici in Europa

In Europa si registra lo sviluppo di un ecosistema competitivo a livello globale nelle tecnologie quantistiche, anche se il livello di collaborazione tra i singoli Paesi potrebbe essere incrementato, soprattutto a livello di Unione Europea.

Il Regno Unito mira a una leadership globale attraverso una strategia decennale che si focalizza su applicazioni per energia, sanità e intelligenza artificiale (tra le altre). Allo stesso tempo, il governo britannico ha commissionato una revisione dettagliata dell’infrastruttura tecnologica sulle QT a disposizione⁵⁶.

L’UE ha investito più di 7 miliardi di euro, puntando a creare una “Quantum Valley” e rafforzando la sovranità digitale con la Quantum Flagship⁵⁷, un programma decennale da 1,1 mld € di finanziamenti pubblici con lo scopo di promuovere la ricerca e lo sviluppo industriale nel settore quantistico, e il Chips Act, che promuove la collaborazione a livello europeo per la produzione di chip quantistici. Inoltre, l’UE ha il numero assoluto più alto (oltre 100.000) e la più grande concentrazione di esperti pronti per le QT (231 esperti per milione di abitanti) a livello mondiale, un eccellente posizionamento nelle pubblicazioni scientifiche quantistiche, con molteplici premi Nobel, nonché una solida infrastruttura accademica e di ricerca focalizzata sulle QT⁵⁸.

⁵⁶ <https://raeng.org.uk/quantum-infrastructure-review>

⁵⁷ <https://qt.eu/about-quantum-flagship/>

⁵⁸ https://commission.europa.eu/topics/strengthening-european-competitiveness/eu-competitiveness-looking-ahead_en

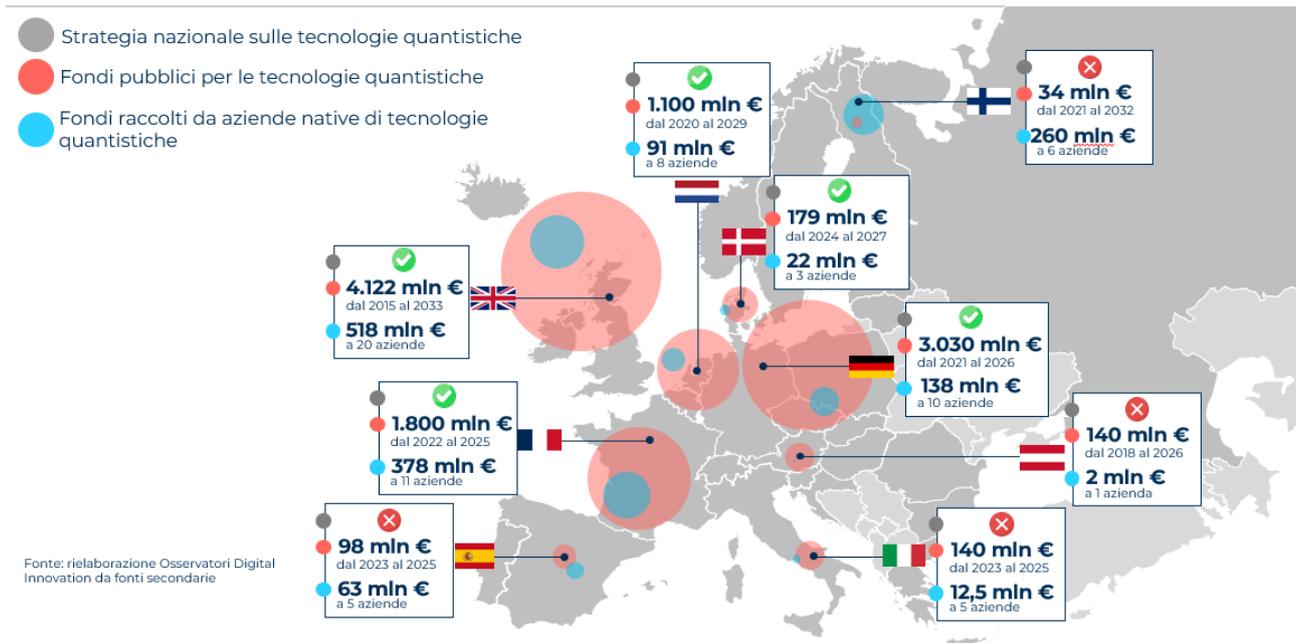


Figura 14 – Mappa dei finanziamenti europei per le tecnologie quantistiche (in milioni di euro). Fonte: Osservatorio Quantum Computing & Communication

B. Unione europea – strategie e politiche pubbliche

➤ Direzione strategica

L'Unione Europea ha identificato le tecnologie quantistiche come una delle aree chiave per il futuro, sia in termini di innovazione tecnologica che di autonomia strategica. Il programma strategico per il decennio digitale dell'UE⁵⁹, lanciato per guidare la trasformazione digitale dell'Europa, prevede che entro il 2025 l'Europa disponga del suo primo supercomputer con accelerazione quantistica. Questo obiettivo rappresenta un punto di partenza per proiettare l'UE all'avanguardia nelle tecnologie quantistiche globali entro il 2030. Tuttavia, come anche evidenzia il rapporto Draghi, sembra al momento complesso raggiungere gli obiettivi prefissati.

In particolare, il rapporto Draghi sulla competitività europea⁶⁰ cita il Quantum Computing come un'opportunità unica per accelerare la produttività in Europa. Secondo il documento, l'Europa avrebbe come maggiori punti di forza le competenze specifiche e la ricerca accademica, oltre che gli importanti finanziamenti pubblici. Tuttavia, gli investimenti privati rimangono nettamente inferiori rispetto ad altre aree come gli Stati Uniti. In generale, anche se il Chips Act risulta essere un'iniziativa importante, sembra che l'UE sia lontana dal raggiungere il traguardo di ottenere il primo computer ad accelerazione quantistica entro il 2025 e tre supercomputer quantistici entro il 2030. Sulla base di ciò, il report invita l'UE a stabilire un piano di lungo termine per le tecnologie quantistiche che possa coordinare gli sforzi dei vari attori a livello europeo ed efficientare gli investimenti.

⁵⁹ https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/europes-digital-decade-digital-targets-2030_it

⁶⁰ https://commission.europa.eu/topics/strengthening-european-competitiveness/eu-competitiveness-looking-ahead_en

Un passaggio significativo in questa direzione è avvenuto nel 2024, quando 21 Stati membri hanno firmato la Dichiarazione Europea sulle Tecnologie Quantistiche⁶¹, impegnandosi a fare dell'Europa la "Quantum Valley" mondiale.

Nello stesso anno, il Quantum Flagship ha presentato la Strategic Research and Industry Agenda 2030⁶², delineando una roadmap per rafforzare la sovranità economica e tecnologica europea. Questa strategia mira a creare un ecosistema quantistico autonomo, con l'obiettivo di consolidare e ampliare la leadership scientifica europea e di promuovere lo sviluppo di un'industria quantistica competitiva.

I cinque pilastri della strategia sono:

1. incentivi per startup e PMI nel settore quantistico;
2. promozione di progetti di ricerca innovativi per mantenere l'Europa all'avanguardia;
3. aumento delle risorse finanziarie disponibili per supportare la crescita delle tecnologie quantistiche;
4. collaborazioni con attori globali per accelerare il progresso tecnologico;
5. assicurare una stretta collaborazione tra le istituzioni europee e nazionali per evitare duplicazioni e massimizzare l'efficienza.

In definitiva, la strategia punta a costruire il "Quantum Web", un sistema in cui computer, simulatori e sensori quantistici siano interconnessi tramite reti quantistiche, consentendo lo scambio di informazioni e risorse quantistiche come la coerenza e l'entanglement. Questo ecosistema quantistico rappresenterà una rivoluzione tecnologica, con impatti in settori che vanno dalla sicurezza informatica alla scienza dei materiali.

➤ **Normativa e politiche pubbliche**

A supporto degli obiettivi strategici sopra delineati, l'UE ha introdotto un insieme di politiche e normative per supportare la diffusione delle tecnologie quantistiche in modo sicuro ed efficiente.

La Commissione Europea ha recentemente incluso le tecnologie quantistiche tra le tecnologie critiche per la sicurezza europea⁶³, insieme a semiconduttori avanzati, intelligenza artificiale, e biotecnologie, invitando gli stati membri a svolgere attività di valutazione del rischio in queste aree.

Tra i più importanti interventi normativi vi è il Chips Act⁶⁴, un regolamento che mira a potenziare la capacità produttiva europea nel settore dei chip, compresi quelli quantistici. Questa normativa promuove la collaborazione tra gli Stati membri per favorire la produzione a basso costo e su larga scala di chip quantistici in Europa, essenziali per alimentare i futuri dispositivi innovativi basati su queste tecnologie.

⁶¹ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/it/library/european-declaration-quantum-technologies>

⁶² https://qt.eu/news/2024/2024-02-14_new-roadmap-to-position-europe-as-the-quantum-valley-of-the-world

⁶³ https://defence-industry-space.ec.europa.eu/document/download/31c246f2-f0ab-4cdf-a338-b00dc16abd36_en?filename=C_2023_6689_1_EN_ACT_part1_v8.pdf

⁶⁴ Regolamento (UE) 2023/1781 del Parlamento europeo e del Consiglio del 13 settembre 2023 che istituisce un quadro di misure per rafforzare l'ecosistema europeo dei semiconduttori e che modifica il regolamento (UE) 2021/694, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-chips-act_en

Sempre in tema di chips quantistici, l'UE ha recentemente stanziato 200 mln € per il periodo 2023-2027 per accelerare la costruzione di chip quantistici in Europa. Il primo round del programma Chips-JU⁶⁵, da 65 mln €, ha lo scopo di realizzare linee pilota di chip quantistici, incentrate sulla stabilità e sugli ioni intrappolati.

Focus Chips Act – Quantum Chips Pilot Lines

Il programma Chips JU finanzia linee pilota per chip quantistici, due incentrate sulla stabilità (da 20-25 milioni di euro) e una sugli ioni intrappolati (10 milioni di euro). Chips JU mira a garantire il futuro approvvigionamento europeo di chip nanoelettronici, catalizzando le capacità di ricerca, sviluppo e produzione. Sebbene l'obiettivo principale sia quello di rilanciare l'industria dei semiconduttori dell'UE, anche altri tipi di chip svolgono un ruolo fondamentale, come i circuiti integrati fotonici e i chip quantistici. Nel frattempo, un bando da 116 milioni di euro per istituire centri di competenza sui chip nell'UE, chiuso a ottobre 2024, specificava i chip quantistici come possibile area di competenza per tale centro.

Un altro pilastro delle politiche europee riguarda il European High Performance Computing Joint Undertaking⁶⁶, che guida lo sviluppo di computer quantistici pilota di ultima generazione. Questi dispositivi, integrati con i supercomputer tradizionali, formeranno macchine ibride che sfrutteranno le migliori tecnologie di calcolo quantistico e classico. Nel 2022, l'EuroHPC ha selezionato sei siti in Europa per ospitare i primi computer quantistici europei, con un investimento di 100 mln €, sostenuto per il 50% dall'UE e per il restante 50% da 17 Paesi membri⁶⁷.

Focus EuroHPC

L'impresa comune EuroHPC consente all'Unione europea, ai suoi paesi partecipanti e ai partner privati di coordinare i loro sforzi e mettere in comune le loro risorse per fare dell'Europa un leader mondiale nel supercalcolo. Ciò rafforzerà l'eccellenza scientifica e la forza industriale dell'Europa, sosterrà la trasformazione digitale della sua economia e garantirà la sovranità tecnologica per il continente.

Più precisamente, l'impresa comune EuroHPC mira a:

- sviluppare, diffondere, ampliare e mantenere nell'UE un ecosistema di infrastrutture di dati, di supercalcolo, di calcolo quantistico, di servizi e di dati federato, sicuro e iperconnesso leader a livello mondiale
- sostenere lo sviluppo di un sistema di supercalcolo orientato alla domanda e agli utenti, basato su una catena di approvvigionamento che garantisca la fornitura dei relativi componenti, tecnologie e conoscenze, limitando in tal modo il rischio di perturbazione

⁶⁵ https://qt.eu/news/2024/2024-09-11_chips-ju-first-calls-for-quantum-chip-pilot-lines-announced

⁶⁶ https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/search-all-eu-institutions-and-bodies/european-high-performance-computing-joint-undertaking-eurohpc-ju_en

⁶⁷ https://eurohpc-ju.europa.eu/one-step-closer-european-quantum-computing-eurohpc-ju-signs-hosting-agreements-six-quantum-computers-2023-06-27_en

- sviluppare un'ampia gamma di applicazioni ottimizzate per questi sistemi
- estendere l'uso di questa infrastruttura di supercalcolo a un gran numero di utenti pubblici e privati
- sostenere lo sviluppo di competenze chiave nel calcolo ad alte prestazioni nella scienza e nell'industria europee.

Sono stati selezionati 6 siti che ospiteranno la rete di supercalcolo europea, tra cui il Cineca a Bologna in cui è stato installato il Supercomputer Leonardo. Questi centri ospiteranno anche computer quantistici, sviluppati con diverse tecnologie e approcci, per sperimentare l'integrazione tra Quantum Computing e HPC.

Un importante progetto per permettere l'accesso ad impianti di produzione pilota in tutta Europa è QU-PILOT⁶⁸ (2023 a 2026), finanziato con 19 mln € da fondi Horizon e composto da 21 partner da 9 Paesi diversi, guidati da VTT (Finlandia). L'iniziativa permetterà sia lo sviluppo di nuova infrastruttura, ma anche la mappatura ed il migliore accesso da parte degli utilizzatori all'infrastruttura già esistente sul territorio UE. Inoltre, il progetto mira a realizzare una piattaforma o ecosistema digitale in cui gli enti possono promuovere i propri prodotti e servizi in ambito quantum.

Un'iniziativa centrale è anche la European Quantum Communication Infrastructure Initiative (EuroQCI)⁶⁹, lanciata nel 2019, che punta a sviluppare una rete di comunicazione quantistica sicura in tutto il continente.

Infine, attraverso il programma Horizon Europe⁷⁰, l'UE ha stanziato 40 mln € per promuovere lo sviluppo di tecnologie quantistiche di prossima generazione. Di questi fondi, 25 milioni di euro sono destinati alla creazione di una rete di gravimetri quantistici, mentre 15 mln € sono dedicati a stimolare la ricerca transnazionale e creare sinergie tra gli attori europei.

Per maggiori dettagli sulle principali iniziative dell'UE, si può consultare la scheda dedicata in appendice [SCHEDA 3].

⁶⁸ <https://qu-pilot.eu/>

⁶⁹ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>

⁷⁰ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/it/news/new-horizon-europe-funding-boosts-european-research-ai-and-quantum-technologies>

5. SINTESI DEL POSIZIONAMENTO DELL'ITALIA: PUNTI DI FORZA, DEBOLEZZA, OPPORTUNITÀ E RISCHI

Sulla base di quanto emerso dalle consultazioni realizzate dal MIMIT e dall'analisi del contesto internazionale, si propone di seguito una sintesi dei punti di forza, debolezza, opportunità e rischi per l'Italia nel campo delle tecnologie quantistiche.

Punti di forza

- Presenza di istituti e centri di ricerca che trattano le QT e ne favoriscono l'industrializzazione;
- Presenza di università e formazione di alto livello distribuita sul territorio nazionale;
- Ecosistema della fotonica ben strutturato;
- Ottime capacità di ricerca e potenzialmente produttive nel Quantum Sensing & Metrology;
- Eccellenza a livello internazionale riconosciuta nelle Quantum Communication;
- Presenza di capacità di ricerca e startup di Quantum Computing a livello software;
- Presenza di alcune grandi aziende della domanda che stanno già investendo sulle tecnologie quantistiche;
- Presenza di grandi aziende all'avanguardia che possono stimolare la crescita della filiera;
- Presenza di laboratori che potrebbero essere accresciuti per assecondare le necessità delle aziende.

Punti di debolezza

- Mancanza, ad oggi, di un hardware quantistico italiano competitivo per il quantum computing;
- Necessità ingente di capitali per lo sviluppo di hardware quantistico;
- Necessità di finanziamenti pubblici più adeguati alle caratteristiche del settore;
- Mancanza di un piano nazionale che funga da fattore abilitante per lo sviluppo nazionale ed estero;
- Mancanza di un ecosistema strutturato e di un tavolo di coordinamento tra filiera, ricerca e istituzioni;
- Filiera dell'offerta ancora embrionale rispetto ad altri Paesi europei;
- Scarsa competitività del mercato del lavoro in ambito deep tech;
- VC italiani non ancora allineati con le reali necessità delle imprese che operano nelle QT;
- Mancanza di infrastrutture: assenza di fonderie italiane e necessaria espansione della fibra per QKD;
- Consapevolezza non diffusa in merito alle potenzialità delle QT e alle minacce sul fronte cybersecurity;
- Mancanza di standardizzazione e linee guida governative su quantum e post-quantum security;
- Sistema di procurement governativo che non permette stimolo della domanda nella sperimentazione;
- Difficoltà di trattenere o attrarre talenti.

Opportunità

- Attenzione europea alle tecnologie quantistiche come arena tecnologica in cui instaurare una leadership;

- Progetti europei permettono di realizzare investimenti e dare accesso all'infrastruttura;
- Fase di mercato precompetitiva che richiede collaborazione tra settore privato pubblico;
- Potenziale valore economico derivante dall'utilizzo delle QT in diversi settori.

Rischi

- Investimenti ingenti in altri Paesi che rendono l'Italia attualmente poco competitiva, rischiando di creare una situazione di dipendenza da altri Stati, di generare una fuga di talenti e di perdere opportunità di sviluppo economico;
- Attuale assenza di una strategia industriale europea che sta generando sforzi nazionali poco coordinati;
- Rischio di limitare la filiera del software per via del limitato sviluppo e accesso all'hardware;
- Dati a rischio a causa dei futuri attacchi di cybersicurezza mediante le QT: "harvest now, decrypt later".

6. AREE DI INTERVENTO E PRINCIPALI POLITICHE SUGGERITE

Sulla base di quanto complessivamente emerso dall'analisi del settore, di seguito si riportano le 7 aree di intervento e le 18 possibili politiche suggerite per rispondere alle necessità identificate.

1. Favorire la creazione di un tavolo di confronto permanente dell'ecosistema pubblico-privato italiano sulle tecnologie quantistiche

Obiettivo

Stimolare il confronto continuo tra istituzioni, decisori politici, esperti, referenti dell'accademia e dell'industria per definire le priorità d'investimento e coordinare i lavori nonché potenziare le complementarità tra iniziative a livello locale e nazionale.

Possibili politiche

- a) Istituire un tavolo di confronto permanente che coinvolga istituzioni, decisori politici, esperti, fondi di venture capital, referenti dell'accademia e dell'industria. Questo tavolo, attraverso incontri periodici ha l'obiettivo di garantire una continuità strategica nel monitoraggio dell'ecosistema, nell'attuazione dei relativi piani d'azione e nella raccolta delle esigenze da parte dell'industria.

2. Finanziare la creazione di un ecosistema pubblico-privato attraverso la realizzazione di progetti di ricerca applicata e sviluppo sulle tecnologie quantistiche

Obiettivo

Stimolare la collaborazione tra gli attori pubblici e privati presenti sul territorio (centri di ricerca, università e imprese) e creare una rete di lavoro basata su obiettivi di ricerca e sviluppo coordinati con lo scopo di coinvolgere sia le eccellenze nazionali sia le aziende internazionali presenti sul territorio.

Possibili politiche

- a) Garantire continuità alle iniziative esistenti adottando una prospettiva strategica di medio-lungo termine (5-7 anni), favorendo logiche di collaborazione pubblico-privata e promuovendo azioni che incentivino l'investimento privato.

3. Promuovere l'industrializzazione e l'imprenditorialità sulle tecnologie quantistiche a livello nazionale

Obiettivo

Favorire la creazione di una filiera nazionale delle tecnologie quantistiche in grado di (i) promuovere la nascita di startup italiane competitive, anche in seno alla ricerca accademica, (ii) valorizzare competenze e tecnologie già presenti sul territorio e (iii) far leva su fornitori internazionali laddove necessario.

Possibili politiche

- a) Sviluppare, in collaborazione con l'industria, programmi specifici di accelerazione che permettano di portare le tecnologie sul mercato, prendendo spunto anche da prassi sviluppate a livello internazionale (e.g. *challenge prizes* nel Regno Unito, dove si prevede lo stanziamento di fondi volti a incentivare lo sviluppo di soluzioni tecnologiche avanzate a supporto di specifici problemi). Questi programmi dovrebbero essere rivolti all'intera value chain e avere una specifica interconnessione con i domini industriali:
- lo sviluppo delle componenti fondamentali per le tecnologie quantistiche;
 - lo sviluppo dell'hardware e del middleware quantistico;
 - lo sviluppo di algoritmi quantistici;
 - lo sviluppo di protocolli di comunicazione sicura;
 - la ricerca di applicazioni rilevanti delle tecnologie quantistiche in settori critici come medicina, energia, sostenibilità, finanza e difesa.
- b) Creare occasioni di *match making* tra fondi di venture capital o di corporate venture capital con il tessuto di startup nazionali per differenziare le fonti di finanziamento, favorendo anche la collaborazione tra iniziative istituzionali e *venture capital* privati.
- c) Relazionare la strategia industriale per le tecnologie quantistiche con quella relativa ad altre filiere critiche a cui quest'ultima è fortemente correlata, come quella dell'Intelligenza Artificiale, per sfruttare sinergie in entrambe le direzioni, accelerare l'ottenimento di un impatto economico e sociale e differenziare le fonti di finanziamento.

4. Garantire l'accesso a tecnologie e infrastrutture quantistiche critiche al sistema paese

Obiettivo

Garantire l'accesso diretto a infrastrutture critiche per la competitività e la sicurezza nazionale, in particolare prodotti finiti, come risorse di calcolo quantistico e reti di comunicazione quantistiche, e infrastrutture di produzione, ovvero laboratori specializzati di ricerca, impianti industriali e fonderie per lo sviluppo delle componenti abilitanti.

Possibili politiche

- a) Nel breve termine:
- garantire l'accesso alle migliori infrastrutture tecnologiche quantistiche a livello globale, facendo leva anche sull'utilizzo di servizi Cloud, per accelerare la sperimentazione e promuovere lo sviluppo di soluzioni software innovative;
 - realizzare una mappatura delle infrastrutture industriali e dei laboratori specializzati presenti sul territorio con l'obiettivo di definire piani di finanziamento volti all'ampliamento e alla

valorizzazione delle infrastrutture esistenti - ad oggi ancora molto focalizzate sulla ricerca e poco vicine ai bisogni industriali - con l'obiettivo di mettere le infrastrutture a fattor comune di startup, imprese e centri di ricerca anche per progetti di pubblica utilità;

- o coordinare gli investimenti italiani in infrastrutture con quelli realizzati dalle istituzioni europee (es. programma EuroHPC).
- b) Nel medio termine, analizzare le esigenze degli stakeholder industriali per identificare necessità industriali specifiche e aggiornare le strutture esistenti per colmare eventuali lacune;
- c) Nel lungo termine, investire nello sviluppo di infrastrutture quantistiche a livello nazionale, riducendo la dipendenza da infrastrutture critiche estere e garantendo autonomia tecnologica strategica.

5. Sviluppare una forza lavoro qualificata e creare un mercato attrattivo per talenti nazionali ed esteri

Obiettivo

Sviluppare talenti sulle tecnologie quantistiche a livello nazionale, rafforzando la filiera industriale del settore e creando un mercato del lavoro attrattivo, in modo da trattenere professionisti qualificati sul territorio ed attrarne ulteriori dall'estero.

Possibili politiche

- a) In coordinamento tra MIMIT e Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR), finanziare dottorati e post-doc in collaborazione pubblico-privato lavorando con i domini industriali più rilevanti nel campo delle tecnologie quantistiche.
- b) In coordinamento con il MUR, favorire l'avvicinamento tra mondo imprenditoriale e accademico, anche con l'inserimento di corsi e programmi relativi all'imprenditorialità e al trasferimento tecnologico nei percorsi di formazione sulle tecnologie quantistiche. Favorire la valorizzazione delle esperienze di successo attraverso testimonianze e incontri tra imprenditori e accademia.
- c) Definire incentivi per le imprese per attrarre e trattenere talenti in ambito deep tech.

6. Definire dei programmi di disseminazione di conoscenza e aumento della consapevolezza su opportunità e rischi nelle imprese utilizzatrici

Obiettivo

Garantire che le imprese italiane potenziali utilizzatrici delle tecnologie quantistiche ne conoscano opportunità e rischi per mantenere il tessuto economico competitivo.

Possibili politiche

- a) Creare dei programmi di disseminazione ed eventi che aumentino la consapevolezza delle opportunità e dei rischi legati alle tecnologie quantistiche, in particolare in merito alle possibili risposte legate alla cybersicurezza.
- b) Monitorare la Quantum Readiness delle imprese italiane attraverso specifiche ricerche di mercato e definire dei piani di azione di lungo termine per garantire uno sviluppo sostenibile del settore.
- c) Lavorare in coordinamento con le istituzioni europee per definire standard tecnologici e certificazioni delle tecnologie quantistiche, in modo da favorirne l'adozione nelle aziende utilizzatrici.

7. Promuovere la cooperazione internazionale nell'ambito delle politiche industriali e di ricerca applicata sulle tecnologie quantistiche

Obiettivo

Garantire la competitività europea nell'ecosistema internazionale delle tecnologie quantistiche e valorizzare gli sforzi nazionali all'interno di una politica sovranazionale.

Possibili politiche

- a) Il tavolo di confronto definito nell'area di intervento 1) politica a) potrebbe avere il compito di monitorare la situazione attuale e gestire l'aggiornamento della strategia nazionale, con l'obiettivo di garantire un ruolo di leadership all'Italia in ambito europeo.
- b) Realizzare accordi bilaterali con altre nazioni per uno sviluppo sinergico del settore, per la normativa e per la standardizzazione tecnologica.
- c) Garantire una rappresentanza italiana nei tavoli decisionali sovranazionali.

APPENDICE

SCHEDA 1 – STRATEGIE NAZIONALI VIRTUOSE

1. REGNO UNITO:

Pilastri	KPI con Target	Misure
Ricerca	<ul style="list-style-type: none"> Mantenere la posizione tra le prime 3 nazioni per qualità delle pubblicazioni scientifiche nel campo delle tecnologie quantistiche e aumentare il volume delle pubblicazioni di ricerca Entro il 2033, avere accordi bilaterali con altre 5 nazioni leader nel campo della quantistica (oltre gli Stati Uniti), basati su programmi di lavoro collaborativi sostanziali. 	<ul style="list-style-type: none"> Creare centri di ricerca sulla tecnologia quantistica focalizzati sulle applicazioni pratiche, programmi di innovazione guidati dall'industria, programmi di accelerazione, programmi di collaborazione internazionale, investimenti in infrastrutture, ricerca fondamentale di supporto.
Sviluppo di una forza lavoro qualificata	<ul style="list-style-type: none"> Entro il 2033, finanziare ulteriori 1000 studenti di ricerca post-laurea in discipline rilevanti per la quantistica; 	<ul style="list-style-type: none"> Programmi di formazione
Creazione dell'ecosistema e industrializzazione	<ul style="list-style-type: none"> Il Regno Unito ha attratto circa il 12% degli investimenti globali di private equity nelle aziende di tecnologia quantistica (2012-2022). Entro il 2033, il Regno Unito avrà una quota del 15% degli investimenti globali di private equity nelle aziende di tecnologia quantistica; Attualmente, il Regno Unito detiene una quota di mercato 	<ul style="list-style-type: none"> Sviluppare nuovi programmi di accelerazione per le tecnologie quantistiche che supporteranno il settore nel capitalizzare le opportunità di mercato; Lanciare un nuovo ciclo di opportunità di finanziamento per l'innovazione guidata dall'industria; Lavorare con l'industria per realizzare studi di fattibilità sui principali requisiti infrastrutturali e dei programmi Accelerare il programma recentemente lanciato NQCC SparQ Applications

	<p>globale stimata intorno al 9% nelle tecnologie quantistiche (2021/22). Entro il 2033, il Regno Unito avrà una quota del 15% del mercato globale delle tecnologie quantistiche.</p>	<p>Discovery, con specifiche linee di lavoro dedicate all'esplorazione di casi d'uso, al collaudo e al potenziamento delle competenze nei settori pubblico, della difesa, aerospaziale e sanitario.</p>
<p>Infrastruttura e value chain</p>	<p>.</p>	<p>Commissionare alla Royal Academy of Engineering una revisione indipendente delle infrastrutture entro la fine del 2023; Aprire l'accesso alle strutture dei partner partecipanti tra industria, organizzazioni di ricerca, università e strutture di proprietà governativa; Creare un catalogo delle infrastrutture esistenti accessibili all'industria in tutto il Regno Unito ed esplorare i requisiti dell'industria quantistica per infrastrutture aggiuntive nel prossimo decennio; Lavorare attraverso il NQCC per negoziare l'accesso alle risorse di calcolo quantistico su una varietà di piattaforme per la ricerca più ampia e per l'industria quantistica, fornendo un punto di accesso per le aziende che desiderano interagire con la comunità quantistica ed esplorare casi d'uso.</p>
<p>Sicurezza nazionale e cybersecurity</p>	<p>.</p>	<p>Ampliare la capacità del NQCC di agire come primo cliente per conto del Governo, acquisendo piattaforme prototipo e accesso al calcolo per accelerare la crescita del settore e consentire agli utenti governativi e ai settori di esplorare casi d'uso.</p> <p>Dedicare almeno un quarto dell'accesso del NQCC alle piattaforme di calcolo e ai relativi programmi di ricerca all'esplorazione di applicazioni critiche di beneficio sociale, come la realizzazione dei vantaggi della medicina personalizzata, la comprensione delle cause della demenza o il miglioramento dell'efficienza delle batterie.</p>



		<ul style="list-style-type: none"> · Portare avanti missioni focalizzate sul conseguimento di benefici sociali e valore commerciale, partendo da due missioni iniziali. · Collaborare con i referenti pertinenti all'interno del governo per concordare piani d'azione specifici per settore o tecnologia, al fine di articolare meglio il valore aggiunto e le azioni risultanti per favorire la convergenza tecnologica. Le priorità iniziali saranno telecomunicazioni, difesa, spazio, intelligenza artificiale, calcolo ad alte prestazioni e industria dei semiconduttori. · Espandere l'utilizzo degli appalti governativi, inclusi finanziamenti per studi di fattibilità per le aziende, al fine di esplorare applicazioni utili per le sfide del settore pubblico. Forniranno finanziamenti catalizzatori per consentire ciò, nell'ambito della prossima fase del programma nazionale, e avvieremo questo processo con ulteriori 15 milioni di sterline nei prossimi due anni. · Istituire un Gruppo Utenti Governativo per identificare dove le tecnologie quantistiche potrebbero offrire un vantaggio nella fornitura di servizi pubblici e altre applicazioni di utilità sociale, modi per favorire lo sviluppo tecnologico per l'erogazione di servizi pubblici e modalità per rafforzare le competenze del governo al fine di consentire l'esplorazione efficace dei potenziali casi d'uso.
<p>Creazione di consapevolezza</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Il 25%-33% delle aziende ha compiuto passi concreti per prepararsi all'arrivo del calcolo quantistico. Entro il 2033, tutte le aziende nei settori chiave rilevanti 	<ul style="list-style-type: none"> · Sensibilizzare sulle opportunità associate al loro utilizzo attraverso il coinvolgimento specifico per settore e la presentazione di esempi pratici, nonché attività dimostrative



	<p>del Regno Unito saranno consapevoli del potenziale delle tecnologie quantistiche e il 75% delle aziende rilevanti avrà compiuto passi per prepararsi all'arrivo del quantum computing</p>	<p>attraverso il programma di Ricerca e Sviluppo (R&D).</p>
<p>Regolamentazione e standardizzazione</p>	<p>Il quadro normativo e degli standard per la quantistica deve ancora essere definito. Il Regno Unito sarà un leader globale nell'istituzione degli standard globali per la quantistica."</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Collaborare con gli alleati di fiducia per continuare a monitorare e rivedere gli impatti dei controlli attuali sul settore e di eventuali futuri cambiamenti normativi, inclusi il NSI Act e i regimi di controllo delle esportazioni, lavorando in ambito multilaterale per anticipare gli impatti futuri e garantire che le normative siano in linea con gli obiettivi di prosperità e sicurezza. · Fornire linee guida alle imprese e ai ricercatori nel campo delle tecnologie quantistiche su come collaborare in sicurezza con altri e proteggere il loro lavoro e la loro proprietà intellettuale, incluse le minacce informatiche. · Operare attraverso organismi globali pertinenti per garantire che gli standard tecnici globali per le tecnologie quantistiche promuovano i nostri interessi di prosperità e sicurezza, incluso l'acceleramento della commercializzazione delle tecnologie quantistiche e il supporto al settore nel Regno Unito. · Collaborare con partner chiave (ad esempio il British Standards Institute, il National Physical Laboratory e il Ministero della Difesa - MOD) per definire e identificare il miglior approccio per coordinare l'impegno nazionale nelle aree prioritarie dello sviluppo degli standard tecnici quantistici. L'industria e il mondo accademico pertinenti saranno coinvolti in questi sforzi per monitorare le attività sugli standard prioritari, aumentare la

		consapevolezza tra gli stakeholder e sviluppare road map per supportare l'impegno del Regno Unito nello sviluppo degli standard quantistici.
--	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2. GERMANIA:

Pilastri	KPI con Target	KPI senza Target	Misure
Ricerca	<ul style="list-style-type: none"> · Entro il 2026: Computer quantistico competitivo a livello internazionale con almeno 100 qubit controllabili individualmente, scalabile fino a 500 qubit. · Entro il 2032: Dimostrare quantum advantage in almeno due applicazioni pratiche rilevanti in Germania. · Entro il 2032: Mantenere la leadership mondiale nelle pubblicazioni su quantum computing (top 3). · Entro il 2032: espandersi nei brevetti su quantum computing (top 5). · Entro il 2032: Mantenere la leadership mondiale nelle pubblicazioni di 		<ul style="list-style-type: none"> · Applicare i risultati della ricerca nella pratica; · Intercettare nuove scoperte e sviluppi in una fase iniziale.

	<ul style="list-style-type: none"> quantum sensing (top 2) Entro il 2032: espandersi nei brevetti su quantum sensing (top 5). 		
Creazione dell'ecosistema e industrializzazione	<ul style="list-style-type: none"> Entro il 2026: Il numero di start-up in Germania su quantum computing quadruplica a ≥ 20 Entro il 2026: 5 nuovi prodotti sul mercato di quantum sensing. Entro il 2032: ≥ 60 aziende coinvolte nel quantum sensing, comprese 10 start-up. Entro il 2026: ≥ 30 aziende fotoniche coinvolte nelle tecnologie quantistiche. 	<ul style="list-style-type: none"> Numero di aziende attive nell'area di interesse grado di copertura delle catene del valore volume di produzione e quota di esportazione sul mercato mondiale Ampiezza della gamma di nuove soluzioni Ampiezza dello spettro di applicazioni per le quali i sistemi quantistici offrono soluzioni Livello di partecipazione dei cittadini 	<ul style="list-style-type: none"> Unire le competenze in reti e creare sinergie; Produrre standard applicativi; Cooperare a livello internazionale; Supportare la creazione e lo sviluppo di start-up; Consentire la partecipazione
Sostenibilità		<ul style="list-style-type: none"> Numero di contatti con utenti di soluzioni sostenibili Numero di soluzioni per gli SDGs 3, 9, 11, 12 e 13 Riduzione/evitamento delle emissioni dannose per il clima Risparmio di risorse Effetti sull'assistenza sanitaria Grado di utilizzo economico/sociale 	<ul style="list-style-type: none"> impegnarsi nella comunicazione scientifica

Sviluppo di una forza lavoro qualificata	·	· indicatori relativi alla presenza nella nazione di lavoratori qualificati	· Promuovere i giovani talenti.
------------------------------------------	---	-----------------------------------------------------------------------------	---------------------------------

3. AUSTRALIA:

Pilastri	KPI senza Target	Misure
Ricerca	<ul style="list-style-type: none"> · Posizione in classifiche internazionali nelle pubblicazioni di ricerca a tema tecnologie quantistiche · Spesa per R&D a tema tecnologie quantistiche 	<ul style="list-style-type: none"> · Progettare nuovi programmi per incentivare la continua crescita dei casi d'uso quantistici in computing, communication e sensing; · Sostenere iniziative per guidare la crescita dell'ecosistema, sostenere la commercializzazione e migliorare i legami nazionali e internazionali con i partner strategici; · Far crescere una pipeline di aziende e tecnologie quantistiche per potenziali investimenti futuri attraverso il Fondo Nazionale per la Ricostruzione da 15 miliardi di dollari australiani
Infrastruttura e value chain	<ul style="list-style-type: none"> · Valore del contributo australiano alle catene globali del valore per la tecnologia quantistica · Numero di aziende quantum · Numero di startup quantum · Valutazione di mercato delle società quantistiche australiane · Adozione di soluzioni quantum da parte di aziende della domanda · vantaggi economici più ampi derivanti dall'applicazione delle tecnologie quantistiche · Percezione degli ostacoli alla crescita 	<ul style="list-style-type: none"> · Condurre un audit nazionale dell'infrastruttura quantistica che consente la ricerca quantistica. L'audit individuerà le lacune in termini di capacità e le aree in cui investire in modo specifico, compreso l'accesso alle capacità di calcolo quantistico; · Monitorare attivamente le sfide e le opportunità della value chain che interessano le industrie quantistiche australiane e muoversi per affrontarle ove possibile.

<p>Sviluppo di una forza lavoro qualificata</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Numero di dipendenti nelle aziende quantistiche australiane · Job vacancy rate per le aziende quantistiche australiane · Numero di domande e visti concessi per candidati qualificati idonei alla migrazione · Numero iscritti a programmi STEM e metriche delle performance · Awareness pubblica del quantum (da ricerche di mercato) 	<ul style="list-style-type: none"> · Erogare borse di dottorato per la National Quantum Collaboration Initiative e per i talenti della tecnologia quantistica; · Pubblicare un rapporto sulla forza lavoro quantistica, compresa la modellazione per identificare la forza lavoro e le esigenze educative per il nostro settore quantistico e le industrie adiacenti; · Integrare la scienza quantistica nei programmi che aumentano la consapevolezza STEM nelle scuole, nelle università e nell'IFP, in collaborazione con gli enti educativi federali, statali e territoriali; · Esplorare misure per attrarre talenti quantistici globali e posizionare l'Australia come destinazione principale per costruire una fiorente carriera quantistica.
<p>Regolamentazione e standardizzazione</p>	<ul style="list-style-type: none"> · Numero di accordi internazionali · Numero di progetti di ricerca collaborativa internazionale · Valore delle esportazioni di tecnologia quantistica · Collaborazione tra imprese e ricerca · Classifiche internazionali nelle pubblicazioni di ricerca e impatto per la tecnologia quantistica · Numero di brevetti delle tecnologie quantistiche australiane · Concessione di licenze e vendita di proprietà intellettuale da parte di società quantistiche australiane 	<ul style="list-style-type: none"> · Garantire che le misure e i quadri normativi siano adatti allo scopo di massimizzare le opportunità e gestire i rischi, proteggendo al contempo gli interessi nazionali dell'Australia; · Garantire che l'Australia sia attivamente rappresentata negli organismi internazionali di standardizzazione quantistica; · Esplorare le opzioni per rafforzare la collaborazione e le opportunità per l'industria con i partner consolidati attraverso accordi esistenti e potenziali accordi di partnership, tra cui United Kingdom, US, il Quad e altri accordi bilaterali regionali e speciali.



Sostenibilità	· Lavorare con l'industria, il mondo accademico e gli stati e i territori per sviluppare principi a sostegno dello sviluppo e dell'uso responsabile e inclusivo delle tecnologie quantistiche	
---------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

SCHEDA 2 - DETTAGLIO SULLO SCENARIO INTERNAZIONALE

Paese	Mercato attuale	Mercato futuro	Politiche pubbliche
Stati Uniti	Quantum Computing: 138,2 mln \$ nel 2022. Quantum Sensing: 41,72 mln \$ nel 2023.	Quantum Computing: da 178,3 mln \$ nel 2023 a 1.225,6 mln \$ entro il 2030 (CAGR del 31,7%). Quantum Sensing: 324,64 mln \$ entro il 2033 (CAGR del 24,94%).	National Quantum Initiative: 4 mld \$. Elevate Quantum: 128 mln \$. Costruzione di un impianto di fabbricazione su scala nanometrica per accelerare lo sviluppo di dispositivi quantistici: 20 mln \$.
Cina	Quantum Computing: 99,1 mln \$ nel 2023. Leader nelle comunicazioni quantistiche, ma in ritardo nel Quantum Computing e pari agli Stati Uniti nel Sensing.	Quantum Computing: 410,3 mln \$ entro il 2030 (CAGR del 22,5%). Sfide per il futuro: costi elevati, mancanza di talenti e lentezza nello sviluppo dell'hardware ostacolano.	15 mld \$ di investimenti pubblici. Rete QKD di Pechino-Shanghai lunga più di 2000 chilometri. Il satellite per comunicazione quantistica Micius.
Regno Unito	QT: 1,7 mld £ annuali di valore aggiunto. Attratto circa 12% degli investimenti globali di private equity in aziende quantum (2012-22) . I segmenti di mercato che hanno attratto più investimenti fino ad oggi: Quantum Computing (2,1 mld £), fotonica (2,5 mld £) e sviluppo di componenti e materiali quantistici (1,4 mld £). Detiene una quota di mercato globale stimata al 9% nelle QT (2021/22).	Entro il 2033, quota del 15% degli investimenti globali di private equity in aziende quantum. Entro il 2033, quota del 15% della quota di mercato di quantum technologies globale.	Nation Quantum Technologies Programme: 3,5 mld £ dal 2014 al 2034. Attratti investimenti privati per 715 mln £ e obiettivo di attrarre ulteriore 1 mld £ in 10 anni. National Quantum Computing Center: 143 mln £. 5 hub tematici QT: 106 mln £. Quantum Testbed: 30 mln £. Quantum Catalyst Fund: 15 mln £. Partnership Cleveland Clinic su sanità e QT: 210 mln £.
Repubblica di Corea	Quantum Computing: 30,1 mln \$ nel 2023.	Quantum Computing: 132,9 mln \$ entro il 2030 (CAG del 23,6% dal 2024 al 2030).	Piano strategico sulle QT: 2,3 mld \$ in 10 anni.

Giappone	Quantum Computing: 56,9 mln \$ nel 2023.	Quantum Computing: 261,6 mln \$ entro il 2030 (CAGR del 24,4% dal 2024 al 2030).	Espansione Cloud Quantum Computing: 31,7 mln \$. R&S: 276 mln \$ (2020).
Canada	Pioniere e leader in Quantum Computing: tra i primi al mondo per numero e densità di startup quantum; 2600 persone impiegate nell'industria.	Entro il 2045: industria da 139 mld \$, con oltre 200.000 posti di lavoro e 42 mld \$ di profitti.	Strategia nazionale QT: 360 mln C\$ (ricerca, commercializzazione, talenti). Quantum Industry Canada: 1,4 mln C\$. Quantum Stream presso i Creative Destruction Lab. Sherbrooke Quantum Innovation Zone: 435 mln C\$.
Germania	Quantum Sensing: 86,9 mln \$ nel 2023. Quantum Computing: 126,1 mln \$ nel 2023.	Quantum Sensing: 127,4 mln \$ entro il 2030 (CAGR del 5,6% dal 2024 al 2030). Quantum Computing: 357,4 mln \$ entro il 2030 (CAGR del 16% dal 2024 al 2030).	Piano d'azione tedesco per le QT: 3 mld € dal 2023 al 2026. Consorzio per sviluppo prototipi computer quantistico (2022): 740 mln € in 4 anni. Realizzazione primo computer quantistico ibrido (2022): 40 mln €.
Francia	Quantum Computing: 93,1 mln \$ nel 2023. Domanda proviene da: settore bancario, farmaceutico, spaziale, difesa e industria.	Quantum Computing: 233,8 mln \$ entro il 2030 (CAGR del 14,1% dal 2024 al 2030).	Strategia quantistica francese: 1,8 mld € (dal 2021 al 2024). PROQCIMA per realizzare due prototipi di computer quantistici di almeno 128 qubit logici entro 2032: 500 mln €.
Paesi Bassi	Investitori privati hanno contribuito tra 10 e 15 mln € in equity alle aziende quantistiche negli ultimi anni.	Colli di bottiglia principali per lo sviluppo dell'industria delle QT in futuro sono: capacità dell'infrastruttura (qualità di altissimo livello ma difficoltà ad accedervi); finanziamenti; accesso a competenze manageriali.	National Growth Fund per QT: 1,7 mld €.
Spagna	Stato avanzata nel Quantum Computing.	Necessità di: promuovere visibilità ecosistema spagnolo; migliorare coordinamento tra	Marenostrom 5: 22 mln € (dal 2022 al 2025).

		<p>stakeholder; sensibilizzazione e creazione della domanda; incentivi alla creazione di nuove imprese; creazione di ambienti sperimentali adeguati; supporto per ricerca e sviluppo; mantenimento e sviluppo talenti; consolidamento di reti aperte e ben connesse</p>	
--	--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Stati Uniti

Mercato attuale

Il mercato statunitense del Quantum Computing è stato valutato 138,2 mln \$ nel 2022⁷¹. Gli Stati Uniti godono di una forte leadership nel Quantum Computing grazie anche a lungimiranti investimenti privati di aziende come IBM, ed agli sforzi sostanziali di aziende come Google Quantum AI, Microsoft, IONQ, SandboxAQ, PsiQuantum, Rigetti, and Infleqtion.

Il mercato statunitense del Quantum Sensing è stato valutato a 41,72 mln \$ nel 2023⁷².

Mercato futuro

Si prevede che il mercato Quantum Computing crescerà da 178,3 mln \$ nel 2023 a 1.225,6 mln \$ entro il 2030, con un CAGR del 31,7%⁷³. Si stima inoltre che il mercato del Quantum Sensing raggiungerà circa 324,64 mln \$ entro il 2033, con un tasso di crescita del 24,94% dal 2024 al 2033⁷⁴.

Tuttavia, il mercato delle QT presenta molta competizione sia dalla Cina, che investe in modo massiccio attraverso il settore pubblico, che dall'Europa, che vede player alternativi come IQM crescere in modo significativo.

Inoltre, un ostacolo importante alla crescita del settore negli Stati Uniti è la mancanza di talenti. Infatti, per ogni tre posti di lavoro è disponibile solo un candidato qualificato, e si prevede che meno del 50% dei posti di lavoro nel campo Quantum Computing saranno occupati entro il 2025⁷⁵.

Politiche pubbliche

⁷¹ <https://www.fortunebusinessinsights.com/u-s-quantum-computing-market-107727>

⁷² <https://www.precedenceresearch.com/quantum-sensor-market>

⁷³ <https://www.fortunebusinessinsights.com/u-s-quantum-computing-market-107727>

⁷⁴ <https://www.precedenceresearch.com/quantum-sensor-market>

⁷⁵ <https://foreignpolicy.com/2023/07/31/us-quantum-technology-china-competition-security/>

Gli Stati Uniti hanno già stanziato almeno 4 mld \$, senza contare le iniziative del settore della difesa, attraverso soprattutto gli sforzi della National Quantum Initiative (NQI)⁷⁶, lanciata nel 2018. Infatti, le agenzie governative hanno dichiarato spese di bilancio per la R&S nelle QT pari a 449 mln \$ nell'anno fiscale 2019, 672 mln \$ nell'anno fiscale 2020, 855 mln \$ nell'anno fiscale 2021 e 1.031 mln \$ nell'anno fiscale 2022, seguiti da 932 mln \$ per l'anno fiscale 2023 e da 968 mln \$ richiesti per l'anno fiscale 2024.

Gli Stati Uniti hanno adottato una strategia nazionale sulle tecnologie quantistiche già nel 2018, presentando il rapporto “A National Strategic Overview for Quantum Information Science”⁷⁷, che ha gettato le basi per l’iniziativa governativa statunitense National Quantum Initiative⁷⁸ (NQI). L’NQI, approvato come legge nel dicembre 2018, ha stanziato 1,2 mld \$ dal 2019 al 2023, promuovendo azioni strategiche del National Institute of Standards and Technology (NIST), del Dipartimento di Energia, e della National Science Foundation (NSF). Esso contiene sei aree di intervento (scienza, forza lavoro, industria, infrastrutture, sicurezza economica e cooperazione internazionale) e presenta tre obiettivi principali:

- Comprendere le applicazioni e le tempistiche con cui le QT porteranno benefici alla società e gli ostacoli allo sviluppo;
- Aumentare la competitività accelerando lo sviluppo tecnologico verso applicazioni industriali e collaborando con partner internazionali, proteggendo al tempo stesso la sicurezza nazionale.;
- Abilitare i talenti costruendo i necessari percorsi formativi e garantendo che le QT creino nuove opportunità.

Inoltre, l’NQI ha portato alla creazione di tre enti: il National Quantum Coordination Office (NQCO), che si occupa di coordinate tutte le attività legate alle QT in ambito governativo, accademico e industriale; il National Quantum Initiative Advisory Committee (NQIAC), composto da esperti provenienti dal mondo dell’accademia, dell’industria e del governo, volto a fornire giudizio e guida relativi all’NQI⁷⁹; il consorzio per lo sviluppo economico del Quantum⁸⁰, formato e guidato da attori dell’industria delle QT.

Nell’ambito della suddetta strategia, gli Stati Uniti hanno stretto accordi di collaborazione scientifica sulle QT con diversi Paesi, tra cui Giappone, Regno Unito, Australia, Francia, Finlandia, Svezia⁸¹.

Nel frattempo, nel 2022, gli Stati Uniti si sono impegnati a stanziare ulteriori 1,8 mld \$ per le attività sulle QT⁸². In aggiunta, per far fronte alle crescenti carenze di competenze in campo quantistico è stato avviato un piano di sviluppo della forza lavoro, denominato National Strategic Plan for Quantum Information Science and Technology Workforce Development⁸³. Altre iniziative da menzionare sono l’investimento da 128 mln \$ per la realizzazione di

⁷⁶ <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2023/12/NQI-Annual-Report-FY2024.pdf>

⁷⁷ https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2020/10/2018_NSTC_National_Strategic_Overview_QIS.pdf

⁷⁸ <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227/text>

⁷⁹ <https://www2.datainnovation.org/2023-us-quantum-policy.pdf>

⁸⁰ <https://quantumconsortium.org/>

⁸¹ <https://www.quantum.gov/competitiveness/>

⁸² <https://thequantuminsider.com/2024/09/05/guest-post-the-u-s-quantum-initiative-act-time-for-an-update-in-a-rapidly-evolving-quantum-landscape>

⁸³ <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2022/02/QIST-Natl-Workforce-Plan.pdf>

un consorzio pubblico-privato (Elevate Quantum) che si stima possa attrarre circa 2 mld \$ in investimenti privati e creare 10,000 posti di lavoro; ed un investimento da 20 mln \$ per supportare la costruzione di un impianto di fabbricazione su scala nanometrica per accelerare lo sviluppo di dispositivi quantistici⁸⁴.

Cina

Mercato attuale

La Cina è leader nelle comunicazioni quantistiche, ma è in ritardo nel Quantum Computing (soprattutto in ambito hardware ed implementazione dei sistemi quantistici) ed è pari agli Stati Uniti nel Sensoring⁸⁵. Mentre i finanziamenti privati statunitensi sono più elevati (circa 10 volte più grandi), la Cina compensa il deficit del settore privato con massicci investimenti pubblici. Infatti, la Cina ha dichiarato di aver stanziato oltre 15 mld \$ per le QT, superando di gran lunga gli Stati Uniti. Ad esempio, l'azienda cinese Origin Quantum, leader nel Quantum Computing, ha ottenuto 148 mln \$ in finanziamenti di serie B guidati dal fondo di venture di proprietà statale Shenzhen Capital.

Sono circa 14 le aziende del settore privato che possono essere considerate in prima linea nella tecnologia quantistica, tra cui nove start-up e cinque grandi aziende tecnologiche. In testa ci sono start-up di spicco come Origin Quantum e QuantumCTek, oltre a giganti come Tencent.

Il mercato cinese del Quantum Computing ha generato un fatturato di 99,1 mln \$ nel 2023⁸⁶.

Mercato futuro

Si prevede che il mercato cinese del Quantum Computing raggiungerà un fatturato di 410,3 mln \$ entro il 2030, con un CAGR del 22,5%⁸⁷.

L'industria cinese appare isolata e si basa su risorse interne con una collaborazione globale limitata⁸⁸. Questo approccio consente di ottenere rapida crescita, ma comporta rischi a lungo termine nel sostenere il progresso tecnologico. Mentre quasi la metà della ricerca statunitense nel campo delle QT è in collaborazione con partner internazionali, le cifre della Cina sono molto inferiori, non raggiungendo neanche il 30%. L'immenso costo e la complessità dello sviluppo delle QT, così come la loro catena di approvvigionamento dispersa a livello globale, richiedono una cooperazione internazionale, cosa che l'approccio della Cina potrebbe faticare a sostenere. Tuttavia, la Cina beneficia strategicamente degli ambienti innovativi operanti all'estero, proteggendo al contempo i propri progressi quantistici, creando un ambiente asimmetrico di condivisione delle conoscenze.

Sfide come i costi elevati, la mancanza di talenti e la lentezza nello sviluppo dell'hardware ostacolano l'espansione della Cina nelle QT⁸⁹.

⁸⁴ <https://www.globalpolicywatch.com/2024/08/quantum-computing-developments-in-the-uk-and-us/>

⁸⁵ <https://itif.org/publications/2024/09/09/how-innovative-is-china-in-quantum/>

⁸⁶ <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/quantum-computing-market/china>

⁸⁷ <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/quantum-computing-market/china>

⁸⁸ <https://itif.org/publications/2024/09/09/how-innovative-is-china-in-quantum/>

⁸⁹ <https://newstatic.dukekunshan.edu.cn/ine/2023/11/07141433/2022-fall-The-Forum-QC.pdf>

Politiche pubbliche

Mentre l'approccio cinese si concentra sulla commercializzazione delle QT, con risultati notevoli come la rete QKD di Pechino-Shanghai lunga più di 2000 chilometri e il satellite Micius, esso si basa in larga misura su risorse nazionali e su una collaborazione globale limitata⁹⁰.

I poli industriali guidati dal governo, come la “Quantum Avenue” di Hefei, sono stati fondamentali per favorire l'industria quantistica cinese, creando un collegamento diretto tra ricerca accademica e industria. Hefei, inoltre, ospita la più grande struttura di ricerca quantistica del mondo, il National Laboratory for Quantum Information Sciences⁹¹.

Importanti investimenti sono stati realizzati per costruire una Quantum Communication Backbone (basata su QKD) tra Pechino e Shanghai, la più lunga al mondo (più di 2000 chilometri). Altro importante investimento riguarda il primo satellite quantum al mondo, Micius, con il quale si vuole creare una rete di comunicazione quantistica globale.

Infine il settore della difesa rappresenta un importante fonte di risorse economiche per la filiera della Quantum Communication.

Regno Unito

Mercato attuale

L'industria quantistica britannica contribuisce annualmente all'economia del Regno Unito con 1,7 mld £ di valore aggiunto⁹². Le imprese del settore sostengono già circa 20.000 dipendenti, e sono più produttive del 33% rispetto alla media nazionale, aggiungendo all'economia del Regno Unito 93.000 £ di valore aggiunto per ogni posto di lavoro. Il Regno Unito occupa nel Quantum Computing il 5° posto per brevetti internazionali pubblicati⁹³.

Il Regno Unito ha attirato circa il 12% degli investimenti globali di private equity in aziende quantum (2012-22)⁹⁴. I segmenti di mercato che hanno attratto più investimenti fino ad oggi sono il Quantum Computing (2,1 mld £), la fotonica (2,5 mld £) e lo sviluppo di componenti e materiali quantistici (1,4 mld £).⁹⁵ Attualmente il Regno Unito detiene una quota di mercato globale stimata al 9% nelle tecnologie quantistiche (2021/22).

Mercato futuro

Entro il 2033, il Regno Unito stima di avere una quota del 15% degli investimenti globali di private equity in aziende quantum⁹⁶.

⁹⁰ <https://thequantuminsider.com/2024/09/09/report-china-is-challenging-u-s-leadership-in-quantum/>

⁹¹ <https://thequantuminsider.com/2023/04/13/chinese-quantum-companies-and-national-strategy-2023/>

⁹² <https://www.cbi.org.uk/articles/what-s-the-value-of-the-quantum-economy/>

⁹³ https://commission.europa.eu/topics/strengthening-european-competitiveness/eu-competitiveness-looking-ahead_en

⁹⁴ <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-accessible-webpage>

⁹⁵ <https://thedatacity.com/rtics/quantum-economy-rtic0051/>

⁹⁶ <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-accessible-webpage>

Dall'altro lato, il governo britannico ha commissionato un report riguardante l'infrastruttura legata alle QT⁹⁷, il quale è arrivato alla conclusione che investimenti infrastrutturali saranno essenziali per garantire la crescita del mercato. Sulla base di una mappatura specifica dell'ecosistema industriale, il report fornisce importanti raccomandazioni, tra cui: rinforzare e rendere più accessibili all'industria le infrastrutture esistenti, e/o realizzare infrastrutture all'avanguardia nell'ambito design e prototipazione di nanofabbricazione (semiconduttori composti, superconduttori, *diamond*, *silicon photonics*, e packaging).

Politiche pubbliche

Il Regno Unito, dopo aver adottato il Programma nazionale per le tecnologie quantistiche (NQTP) nel 2014 per sostenere la ricerca e l'industrializzazione grazie ad un investimento di 1 mld £ in dieci anni, ha adottato la Strategia nazionale Quantum a marzo del 2023, definendo un piano decennale per realizzare il potenziale delle tecnologie quantistiche per il Paese⁹⁸. Per il piano sono stati stanziati 2,5 mld £ a partire dal 2024, con l'obiettivo di attrarre 1 mld £ di investimenti privati. In questi termini, ci si aspetta che l'NQTP attrarrà investimenti privati per 715 mln £ entro il 2025.

Il 25 ottobre 2024 è stato inaugurato il National Quantum Computing Centre (NQCC), fornito di 12 quantum computer e progettato per connettere accademia ed industria⁹⁹. Esso offrirà anche programmi di apprendistato, 30 borse di dottorato, tirocini estivi e corsi intensivi per gli operatori del settore. L'NQCC si focalizza su aree chiave in cui il Quantum Computing può offrire soluzioni di grande impatto, tra cui: ottimizzazione della rete energetica, farmaceutica, previsioni del clima, intelligenza artificiale. L'NQCC è stato realizzato grazie ad un investimento pubblico di circa 143 mln £.

A luglio 2024 il governo ha annunciato un investimento di 106 mln £ per la creazione di 5 hub tematici sulle QT, con lo scopo di connettere industria ed accademia nello sviluppo di applicazioni pratiche in diversi ambito, ad esempio la diagnosi precoce di malattie, i trasporti, il Quantum internet, il Quantum Computing, il Quantum Sensing¹⁰⁰.

Inoltre, nel febbraio 2024, il governo britannico ha annunciato investimenti per un totale di 45 mln £ per trasformare il Regno Unito in una "economia quantistica" entro il 2033¹⁰¹. 30 mln £ saranno assegnati ai vincitori della competizione "*Quantum Testbed*" e offriranno alle aziende l'opportunità di passare dalla ricerca teorica alla pratica, fornendo hardware per i test e le valutazioni iniziali. I restanti 15 mln £ sono destinati ai vincitori del "*Quantum Catalyst Fund*", progettato per accelerare le soluzioni quantistiche nel settore pubblico e in aree di interesse chiave, tra cui i trasporti (l'uso di tecnologie quantistiche per migliorare le indagini sotterranee e migliorare

⁹⁷ <https://raeng.org.uk/media/rrqjm2v3/quantum-infrastructure-review.pdf>

⁹⁸ <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy>

⁹⁹ <https://thequantuminsider.com/2024/10/26/uks-newly-opened-national-quantum-computing-centre-designed-to-push-the-boundaries-of-what-is-possible-with-quantum/>

¹⁰⁰ <https://www.ukri.org/news/five-hubs-launched-to-ensure-the-uk-benefits-from-quantum-future/>

¹⁰¹ <https://www.gov.uk/government/news/unlocking-the-potential-of-quantum-45-million-investment-to-drive-breakthroughs-in-brain-scanners-navigation-systems-and-quantum-computing>

la consegna dei progetti infrastrutturali), lo spazio, la salute, la criminalità (il rilevamento di anomalie nelle merci e nei pacchi), la difesa e la rete zero.

In ambito internazionale, a giugno 2024 la Cleveland Clinic ha annunciato una nuova partnership tra Regno Unito e Stati Uniti per le applicazioni sanitarie e biologiche delle QT. La partnership, che coinvolge IBM, riceverà un finanziamento di 210 milioni di sterline in cinque anni da utilizzare per lo sviluppo di tecnologie di intelligenza artificiale e di Quantum Computing.¹⁰²

Dettagli su NQTP

Il Programma Nazionale per le Tecnologie Quantistiche (NQTP) rappresenta una partnership da **1 miliardo di sterline** in 10 anni tra governo, mondo accademico e industria, che sta accelerando il trasferimento delle conoscenze quantistiche dal laboratorio alla società e all'impatto economico.

L'NQTP, che implementa la strategia sulle tecnologie quantistiche, sta creando l'ecosistema per rendere possibile la nuova era quantistica. Il programma mira a concretizzare idee, mantenere l'eccellenza del Regno Unito nella ricerca scientifica e nello sviluppo, attrarre e trattenere talenti, e sviluppare relazioni internazionali reciprocamente vantaggiose.

Questi sforzi stanno dando i loro frutti. Il Regno Unito è ora un polo di attrazione per gli investimenti esteri e per accordi di cooperazione intergovernativa in ambito quantistico, grazie a ciò che rappresenta l'NQTP: impegno nazionale, forti legami con l'industria, una base di ricerca dinamica e di livello mondiale, e il supporto da parte di agenzie statali focalizzate su scienza e ingegneria.

Il suo approccio integrato sta offrendo vantaggi quantistici pratici e commerciali in ambiti come la cura medica, la protezione ambientale, le comunicazioni, la difesa e la sicurezza. Questa leadership sta attirando investimenti da giganti tecnologici tanto diversi come Honeywell e Amazon, e da innovatori quantistici già avanzati come Rigetti Computing, con sede in California.

Attualmente, l'NQTP supporta 49 start-up quantistiche e coinvolge 120 partner industriali. E non si tratta solo di nuove aziende con potenziale straordinario e rivoluzionario. Grandi corporation di lunga data con portata globale, come Hitachi, Toshiba Research Europe, Teledyne e2v, BT, BP e BAE Systems, sono partner chiave all'interno dell'NQTP, sviluppando progetti quantistici in tutto il paese grazie alle loro risorse e competenze di mercato.

Questo ricco mondo di vivaci start-up e aziende consolidate impegnate all'interno del NQTP sta rendendo il Regno Unito competitivo a livello globale in diversi mercati: Quantum computing, Sensing e imaging, Quantum communication.

Il NQTP è anche focalizzato sui talenti, lavorando per creare interesse per le carriere nel settore quantistico, garantendo che il Regno Unito disponga delle competenze giuste per i lavori di alto valore che le tecnologie quantistiche creano e richiedono.

¹⁰² https://assets.publishing.service.gov.uk/media/66a94b00ab418ab05559300e/SIN_US_Impact_Story_Q1_2425.pdf

Start-up che hanno raggiunto valutazioni di centinaia di milioni di sterline sono nate dall'incubazione NQTP, come lo sviluppatore di computer quantistici PsiQuantum e la società di comunicazioni quantistiche KETS.

Partner dell'iniziativa

- Engineering and Physical Sciences Research Council (principale finanziatore)
- Innovate UK
- Science and Technology Facilities Council
- The Defence Science and Technology Laboratory
- The National Physical Laboratory
- Department for Business, Energy and Industrial Strategy
- Government Communications Headquarters (GCHQ)
- Innovate UK KTN

Durata e budget

Durata: 10 anni

Budget: 2,5 mld £, allocate per la National Quantum Strategy (che ha una durata di 10 anni)

Governance

- **Programme Board:** fornisce una strategia nazionale complessiva, a lungo termine e in continua evoluzione per le tecnologie quantistiche nel Regno Unito. Include dirigenti senior delle organizzazioni partner per garantire che la strategia nazionale per le tecnologie quantistiche sia allineata con le strategie di ciascun partner.
- **Strategic Advisory Board (SAB):** fornisce consulenza indipendente e qualificata al Governo del Regno Unito e alle sue agenzie autonome in merito alle tecnologie quantistiche.
- **NQTP Delivery Group:** si concentra sull'implementazione del programma, coordinando gli sforzi delle varie agenzie governative e delle organizzazioni chiave coinvolte nello sviluppo delle tecnologie quantistiche nel Regno Unito. Facilita un'implementazione efficace ed efficiente degli investimenti pubblici nelle tecnologie quantistiche a livello nazionale e individua opportunità di collaborazione e co-finanziamento di attività di ricerca e sviluppo (R&S) e bandi congiunti.

Aree strategiche del programma

- **Quantum Technology Hubs:** La strategia di commercializzazione delle tecnologie quantistiche si basa su quattro hub, ciascuno guidato da una università e focalizzato su aree chiave in cui il programma nazionale è suddiviso. Gli hub sono stati istituiti nel 2014 grazie a un investimento governativo di £214 milioni: Communication (Università di York), Sensoring (Università di Birmingham), Imaging (Università di Glasgow), Computing (Università di Oxford).
- **Creazione e coordinamento delle capacità:** le attività e le strutture combinate all'interno del programma creeranno una rete di capacità nazionali e internazionali per il mondo accademico, l'industria e il governo. Altre iniziative includono: Centro Nazionale per il Calcolo Quantistico,



Istituto di Metrologia Quantistica, SPEQTRE (Space Photon Entanglement Quantum Technology Readiness Experiment).

- **Ricerca di base:** programma da £40 mio “Quantum Technologies for Fundamental Physics”.
- **Facilitazione di commercializzazione e industrializzazione:**
 - Il Fondo per la Strategia Industriale (ISCF) per le tecnologie quantistiche ha stimolato lo sviluppo commerciale, offrendo il valore, mentoring e l'opportunità che sostengono il programma NQTP.
 - Le imprese sostenute dall'ISCF con £153 milioni hanno raccolto £425 milioni in finanziamenti dal settore privato dall'inizio del programma, superando il doppio delle stime previste. Si prevede che il supporto privato raggiungerà i £715 milioni entro il 2025.
 - Il programma ha incoraggiato aziende estere, come Rigetti, con sede in California, a investire e collaborare nel Regno Unito. Questo sta contribuendo a costruire l'infrastruttura, la filiera e l'expertise necessarie.
 - Il fondo aiuta le nuove imprese a collaborare con partner industriali e accademici, superando le sfide commerciali e tecniche. È una parte cruciale del NQT, che supporta le startup quantistiche di maggior successo nel passaggio dalla ricerca al mercato.
 - Il NQTP funge anche da piattaforma di lancio per le spin-out accademiche e come punto di ingresso per utenti finali interessati a esplorare opportunità commerciali e sviluppare dispositivi e prodotti prototipali.
- **Missioni della Strategia Quantum:** delineano le missioni da raggiungere e come intendono raggiungerle.
 - Missione 1: Entro il 2035, il Regno Unito disporrà di computer quantistici accessibili, in grado di eseguire 1 trilione di operazioni e di supportare applicazioni che offriranno benefici ben superiori rispetto ai supercomputer classici in settori chiave dell'economia.
 - Missione 2: Entro il 2035, il Regno Unito avrà implementato la rete quantistica più avanzata al mondo su larga scala, aprendo la strada al futuro internet quantistico.
 - Missione 3: Entro il 2030, ogni ente del NHS (SSN italiano) beneficerà di soluzioni basate sulla rilevazione quantistica, aiutando le persone con malattie croniche a vivere una vita più sana e lunga grazie a diagnosi e trattamenti precoci.
 - Missione 4: Entro il 2030, i sistemi di navigazione quantistica, inclusi gli orologi, saranno implementati sugli aerei, fornendo una precisione di nuova generazione indipendente dai segnali satellitari.
 - Missione 5: Entro il 2030, i sensori quantistici mobili e interconnessi sbloccheranno nuove capacità di consapevolezza situazionale, utilizzate nelle infrastrutture critiche nei settori dei trasporti, telecomunicazioni, energia e difesa.
- **Competenze:**
 - EPSRC Centres for Doctoral Training

- Hub per formazione e competenze
- Borse di studio e finanziamenti per PhD
- National Physical Laboratory skills programme
- Quantum City

Repubblica di Corea

Mercato attuale

Il mercato coreano del Quantum Computing ha generato un fatturato di 30,1 mln \$ nel 2023¹⁰³.

L'azienda coreana SDT ha ottenuto un investimento pre-IPO di 10 mld KRW (circa 7 mln €) da Shinhan Venture Investment per far progredire le proprie tecnologie di Quantum Computing¹⁰⁴. SDT prevede di commercializzare il primo computer quantistico della Repubblica di Corea e di sviluppare un data centre quantistico per servizi cloud. SDT ha l'obiettivo di sviluppare un computer quantistico basato su superconduttività a 64 qubit entro il 2026 e di accelerare nella realizzazione di computer quantistici a circuito integrato fotonico entro il 2027.

Diverse aziende coreane sono attivamente impegnate nel quantum computing¹⁰⁵. Il quantum computing ha suscitato l'interesse di aziende globali come Samsung, SK Telecom e LG Electronics. I loro sforzi di ricerca e sviluppo si concentrano sullo sviluppo di computer quantistici, algoritmi quantistici e sistemi di Quantum Communication. Tra le altre aziende coinvolte nell'industria troviamo: EYL fornisce un minuscolo chip generatore di numeri casuali quantistici che misura 5 millimetri; First Quantum offre soluzioni per le principali applicazioni di calcolo quantistico; QSIMPLUS offre un prodotto chiamato QSIMpro, un simulatore software per la comunicazione crittografica; Qunova Computing fornisce servizi software a clienti dell'industria farmaceutica e dei materiali. Pur non essendo un'azienda privata, SK Telecom ha investito nel Quantum Computing e ha istituito lo Spin Quantum Computing Center con la Korea University e il California Institute of Technology. Anche Samsung ha investito nel Quantum Computing e sta lavorando allo sviluppo di un proprio computer quantistico.

Mercato futuro

Si prevede che il mercato del Quantum Computing genererà un fatturato di 132,9 mln \$ entro il 2030 e crescerà con un CAGR del 23,6% dal 2024 al 2030¹⁰⁶.

Politiche pubbliche

Nel 2023 la Repubblica di Corea ha presentato un piano strategico per investire 2,3 mld \$ nelle QT in dieci anni, anche grazie a collaborazioni con aziende quali Samsung Electronics, Hyundai Motor., SK Telecom e LG

¹⁰³ <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/quantum-computing-market/south-korea>

¹⁰⁴ <https://quantuminkorea.org/2024/08/30/south-korean-quantum-computing-company-sdt-raises-7-5m-usd-to-commercialize-first-quantum-computer/>

¹⁰⁵ <https://thequantuminsider.com/2023/07/28/a-brief-overview-of-quantum-computing-in-south-korea-in-2023/>

¹⁰⁶ <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/quantum-computing-market/south-korea>

Electronics, con l'obiettivo di affermarsi come leader globale del settore¹⁰⁷. La strategia prevede i seguenti obiettivi da raggiungere entro il 2035:

- Lo sviluppo di un computer quantistico a 1000 qubit utilizzando la propria tecnologia.
- La creazione di un sistema di comunicazione quantistica tra città.
- Lo sviluppo di sensori quantistici allo stato dell'arte.
- La formazione di 2.500 professionisti del settore quantistico *core* e di 10.000 professionisti nel settore più ampio delle QT.
- L'aumento della quota di mercato nel settore quantum a circa il 10% e sviluppo di 1.200 aziende di tecnologia quantistica.

Una delle iniziative di maggior rilevanza è la realizzazione del Korea Quantum Industry Center (K-QI), che si pone come connettore tra ricerca e industria. Inoltre, il Korea Quantum Computing Hub offre soluzioni di accesso a computazione quantistica tramite il cloud attraverso una partnership con IBM¹⁰⁸.

Ad agosto 2024 IonQ, leader nel Quantum Computing, ha firmato un Memorandum of Understanding (MOU) con il Ministero della Scienza e dell'ICT della Repubblica di Corea del Sud per formare i professionisti delle QT e promuovere la creazione di un ecosistema quantistico locale offrendo le proprie risorse computazionali¹⁰⁹.

Giappone

Mercato attuale

Il mercato giapponese del Quantum Computing ha generato un fatturato di 56,9 mln \$ nel 2023¹¹⁰.

Il settore delle QT in Giappone, guidato da aziende come Fujitsu, NEC, Toshiba e Hitachi, sta dando priorità agli ambiti quantum annealing e simulation¹¹¹. Dall'altro lato, in ambito startup, Qolab, che si occupa di sviluppare computer quantistici su scala industriale, ha ottenuto 3,5 milioni di dollari dalla Development Bank of Japan¹¹².

Mercato futuro

Si prevede che il mercato giapponese del Quantum Computing raggiungerà un fatturato di 261,6 mln \$ entro il 2030, con un CAGR del 24,4% dal 2024 al 2030¹¹³.

Politiche pubbliche

Il Giappone ha adottato una strategia nazionale nel 2020, focalizzata sull'industrializzazione della tecnologia. Nel 2022, il Giappone ha formulato una nuova strategia per il 2030, denominata Vision of Quantum Future Society. Gli obiettivi principali della nuova strategia includono: raggiungere i 10 milioni di utenti delle QT in Giappone;

¹⁰⁷ <https://thequantuminsider.com/2023/06/29/south-korea-to-invest-2-33-billion-in-quantum-by-2035>

¹⁰⁸ <https://kqchub.com/About>

¹⁰⁹ <https://ionq.com/news/ionq-signs-agreement-with-south-koreas-ministry-of-science-and-ict-to>

¹¹⁰ <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/quantum-computing-market/japan>

¹¹¹ <https://www.cic.vc/quantum-computing-firms-urged-to-tap-into-1-74-billion-japan-market/>

¹¹² <https://thequantuminsider.com/2024/10/27/qolab-secures-3-5-million-investment-from-development-bank-of-japan-to-drive-quantum-computing-innovations/>

¹¹³ <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/quantum-computing-market/japan>

attraverso le QT, produzione per 50.000 mld di Yen (circa 307 mld €); promuovere la nascita di unicorni nel settore delle QT.

Anche Giappone si focalizza su hub tematici per favorire incontro tra ricerca e imprese¹¹⁴. I Quantum Technology Innovation Hubs sono stati inaugurati nel febbraio 2021. Gli hub riuniscono ricercatori provenienti dal Giappone e dall'estero, attirando investimenti da parte delle aziende e creando collaborazione tra università e industria. Allo stesso tempo, giocano un ruolo importante nello sviluppo di risorse umane nel campo delle QT, coordinando i collegamenti tra più università e scuole di specializzazione. I diversi hub tematici si occupano dei seguenti ambiti: quantum-AI, Quantum Computing, Quantum Sensing, materiale quantistico, Sicurezza, Applicazioni software.

A maggio 2024 l'Istituto nazionale giapponese di scienze e tecnologie industriali avanzate (AIST) e IBM hanno stipulato un memorandum d'intesa (MOU) per promuovere l'industrializzazione delle QT in Giappone¹¹⁵. La collaborazione mira a rafforzare l'industria giapponese dei componenti e delle apparecchiature per computer quantistici, sviluppando congiuntamente i computer quantistici di prossima generazione e migliorando le loro catene di fornitura. IBM prevede di integrare le industrie giapponesi nei processi di approvvigionamento dei futuri componenti dei sistemi di Quantum Computing e di collaborare con l'AIST per promuovere lo sviluppo dei fornitori. La collaborazione includerebbe lo sviluppo di una macchina da 10.000 qubit entro il 2029.

Nel maggio 2023, in occasione del vertice G7 di Hiroshima, IBM, l'Università di Tokyo e l'Università di Chicago hanno deciso di avviare una partnership nella ricerca quantistica. IBM fornirà 100 mln \$ nel prossimo decennio per far progredire l'innovazione tecnologica verso lo sviluppo di un supercomputer quantistico da 100.000 qubit¹¹⁶.

Canada

Mercato attuale

Il Canada ha assunto una posizione di leadership attraverso investimenti nelle QT per molti decenni, tra cui più di 1 mld C\$ tra il 2012 e il 2022¹¹⁷. Anche i governi provinciali hanno effettuato investimenti significativi in centri di ricerca quantistica. Inoltre, dal 2002, investitori privati e filantropi hanno stanziato più di 1 mld C\$ per la scienza, l'innovazione e le imprese quantistiche.

Come risultato, il Canada ha raggiunto risultati importanti tra cui:

- D-Wave ha lanciato il primo computer basato sulla tecnologia quantistica nel 2011;
- 1Qbit è stata riconosciuta dal World Economic Forum nel 2015 come la prima società di software dedicata alla produzione di applicazioni commerciali per i computer quantistici; e
- Xanadu ha lanciato PennyLane, il primo software di Machine Learning dedicato ai computer quantistici nel 2018, e ha dimostrato il Quantum Advantage nel 2022.
- Nord Quantique è la prima azienda a costruire un qubit logico oltre il *break even*.

¹¹⁴ <https://qih.riken.jp/en/>

¹¹⁵ <https://quantumcomputingreport.com/aist-and-ibm-sign-mou-to-advance-industrialization-of-quantum-technology-in-japan/>

¹¹⁶ https://www.japan.go.jp/kizuna/2024/03/100000_qubit_quantum_computer.html

¹¹⁷ <https://www.innovationnewsnetwork.com/rise-of-quantum-technology-in-canada/36126/>

Si stima che in Canada ci sono poco più di 2600 persone che lavorano nell'industria quantum¹¹⁸, ed è ai primi posti a livello globale sia per il numero assoluto di startup quantum sia per quanto riguarda la densità di startup quantum¹¹⁹.

Mercato futuro

Secondo uno studio commissionato dal National Research Council of Canada (NRC), il settore delle QT diventerà un'industria da 139 mld \$ in Canada, con oltre 200.000 posti di lavoro e 42 mld \$ di profitti entro il 2045¹²⁰. Tuttavia, alcuni analisti avvertono che la mancanza di sufficienti competenze nelle QT potrebbe ridurre la crescita del settore¹²¹.

Politiche pubbliche

Il Canada ha pubblicato la sua Strategia nazionale per le QT nel 2022, sostenuta da un investimento da 360 mln \$ ed è incentrata su tre missioni¹²²: fare del Canada un leader mondiale nelle QT; garantire la privacy e la sicurezza informatica; sostenere il governo e le industrie chiave come sviluppatori e utenti delle QT.

La strategia è divisa in tre pilastri: ricerca, commercializzazione, talento¹²³.

Il pilastro di ricerca fornisce un totale di 141 mln C\$ per supportare la ricerca di base e applicata per realizzare nuove soluzioni e nuove innovazioni nella QT. Ciò include: 132,5 mln C\$ per tre flussi di finanziamenti per generare nuove conoscenze nelle QT attraverso collaborazioni nazionali e internazionali; e 9 mln C\$ per la Quantum Research and Development Initiative (QRDI) volta ad accrescere le capacità e le competenze quantistiche del governo canadese riunendo dipartimenti e agenzie per lavorare su progetti di R&S quantistici collaborativi.

Il pilastro di commercializzazione investe un totale di 169 mln C\$ per tradurre la ricerca in prodotti e servizi commerciali scalabili. Questa cifra è suddivisa tra quanto segue: 50 mln C\$ ai programmi Challenge per riunire ricercatori e strutture di ricerca con il settore pubblico e privato in Canada e a livello internazionale; 35 mln C\$ per stimolare la ricerca, lo sviluppo e la commercializzazione delle innovazioni quantistiche; 14 mln C\$ ai Global Innovation Cluster per accelerare la crescita del settore delle QT in Canada incoraggiando i leader del settore, le piccole e medie imprese e gli istituti di ricerca a collaborare a progetti quantistici su larga scala; e 70 mln C\$ alle agenzie di sviluppo regionale per aiutare a supportare le aziende in crescita nei principali hub regionali per portare sul mercato prodotti e soluzioni innovativi.

Il pilastro dei talenti comprende un totale di 45 mln C\$ per sviluppare e mantenere competenze e talenti quantistici in Canada, nonché per attrarre esperti dal Canada e da tutto il mondo per costruire il settore quantistico. Ciò

¹¹⁸ <https://www.caninnovate.ca/p/a-blueprint-for-canadian-deep-tech>

¹¹⁹ <https://cca-reports.ca/reports/quantum-technologies/>

¹²⁰ <https://www.canada.ca/en/pacific-economic-development/news/2024/05/government-of-canada-supports-growth-and-innovation-in-british-columbias-quantum-technology-industry.html>

¹²¹ <https://researchmoneyinc.com/article/lack-of-quantum-talent-in-canada-threatens-to-slow-progress-on-quantum-computing-report>

¹²² <https://ised-isde.canada.ca/site/national-quantum-strategy/en/canadas-national-quantum-strategy>

¹²³ <https://www.innovationnewsnetwork.com/rise-of-quantum-technology-in-canada/36126/>

include: 5,4 mln C\$ per le sovvenzioni Collaborative Research and Training Experience (CREATE) per supportare la formazione e il tutoraggio di team di studenti altamente qualificati e borsisti post-dottorato; e 40 mln C\$ per supportare l'attrazione, la formazione, il mantenimento e l'impiego di personale altamente qualificato nelle QT attraverso esperienze di tirocinio e sviluppo di competenze professionali per studenti e borsisti post-dottorato.

A marzo 2023, il governo ha annunciato un investimento di 1,4 milioni di dollari nel Quantum Industry Canada (QIC), nell'ambito della Strategia Quantistica Nazionale¹²⁴. Il ruolo principale del QIC, un consorzio di aziende canadesi che si occupano di QT, è quello di facilitare le opportunità di incontro tra i rappresentanti delle principali industrie canadesi e le aziende quantistiche per esplorare soluzioni tecnologiche ai problemi dei clienti. Il QIC metterà inoltre in contatto le aziende canadesi con i partner strategici internazionali, concentrandosi sul Quantum Computing e sul software quantistico, sulla Quantum Communication e crittografia quantistica, e sul Quantum sensing. Per promuovere la collaborazione internazionale, il QIC ha recentemente firmato un memorandum d'intesa per istituire formalmente l'International Council of Quantum Industry Associations, che riunisce il Canada, gli Stati Uniti, il Giappone e l'UE.

Inoltre, a maggio 2024, il governo ha annunciato oltre 11 mln di C\$ in finanziamenti a tre organizzazioni che guidano l'innovazione nel campo del Quantum Computing¹²⁵. Ciò include: oltre 3,4 mln C\$ a 1QBit per sviluppare e commercializzare il loro Topological Quantum Architecture Design (TopQAD™); 4,3 mln C\$ alla Simon Fraser University per istituire il Quantum Fabrication Centre presso la struttura 4D LABS dell'università; e oltre 3,2 mln C\$ all'Università della British Columbia per aumentare la loro capacità di commercializzare tecnologie quantistiche presso lo Stewart Blusson Quantum Matter Institute.

Il Quantum Stream presso i Creative Destruction Lab (CDL) di Toronto e Montreal è un'iniziativa degna di nota. Esso riunisce imprenditori, investitori, scienziati in QT e partner (IBM Q e Xanadu) per creare imprese nel Quantum computing, nell'ottimizzazione quantistica, nel Quantum Sensing ed in altre applicazioni delle QT¹²⁶. Il Quantum Stream CDL prevede un intensivo bootcamp quantistico tecnico e manageriale di 4 settimane tenuto da leader del settore e del mondo accademico in QT e Machine Learning, seguito da cinque sessioni di definizione degli obiettivi nell'arco di 10 mesi.

Infine, un'altra iniziativa significativa è la Sherbrooke Quantum Innovation Zone, sostenuta da oltre 435 mln C\$, che mira a sfruttare le QT per le aziende manifatturiere e tecnologiche locali¹²⁷.

Unione Europea

Posizionamento competitivo

¹²⁴ <https://canada.ca/en/innovation-science-economic-development/news/2023/03/government-of-canada-investing-in-quantum-industry-canada-to-ensure-businesses-achieve-commercial-success.html>

¹²⁵ <https://thequantuminsider.com/2024/05/31/government-of-canada-supports-growth-and-innovation-in-british-columbias-quantum-technology-industry/>

¹²⁶ <https://createdestructionlab.com/streams/quantum/>

¹²⁷ <https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/state-of-quantum-report-2024>

Nella corsa alle QT, l'UE può contare su punti di forza cruciali come grandi investimenti pubblici, eccellenti competenze e sostanziale capacità di ricerca¹²⁸. Con 7 mld € stanziati finora, l'UE si classifica seconda solo alla Cina a livello mondiale per investimenti pubblici in QT. Inoltre, l'UE ha il numero assoluto più alto (oltre 100.000) e la più grande concentrazione di esperti pronti per le QT (231 esperti per milione di abitanti) a livello mondiale, un'eccellente ricerca nelle pubblicazioni scientifiche quantistiche, con molteplici premi Nobel, nonché una solida infrastruttura accademica e di ricerca focalizzata sulle QT. Infine, tra il 2000 e il 2023, l'UE si è classificata seconda a livello mondiale (con circa il 16%) nella brevettazione, sulla base di famiglie di brevetti internazionali, dietro gli Stati Uniti (32%) ma davanti al Giappone (13%) e alla Cina (10%).

Direzione strategica

L'Unione Europea ha identificato le tecnologie quantistiche come una delle aree chiave per il futuro, sia in termini di innovazione tecnologica che di indipendenza strategica. Il programma strategico per il decennio digitale dell'UE¹²⁹, lanciato per guidare la trasformazione digitale dell'Europa, prevede che entro il 2025 l'Europa disponga del suo primo supercomputer con accelerazione quantistica. Questo traguardo rappresenta un punto di partenza per proiettare l'UE all'avanguardia nelle tecnologie quantistiche globali entro il 2030. Inoltre, la Commissione Europea ha recentemente incluso le QT tra le tecnologie critiche per la sicurezza europea¹³⁰, insieme a semiconduttori avanzati, intelligenza artificiale, e biotecnologie, suggerendo di svolgere attività di valutazione del rischio in queste aree.

Il rapporto Draghi sulla competitività europea¹³¹ cita il Quantum Computing un'opportunità unica per accelerare la produttività in Europa. Secondo Draghi, l'Europa avrebbe come maggiori punti di forza le competenze specifiche e la ricerca accademica, oltre che gli importanti finanziamenti pubblici. Tuttavia, gli investimenti privati rimangono nettamente inferiori rispetto ad altre aree come gli Stati Uniti e la Cina. In generale, anche se il Chips Act risulta essere un'iniziativa importante, sembra che l'UE sia lontana dal raggiungere l'obiettivo di ottenere il primo computer ad accelerazione quantistica entro il 2025 e tre supercomputer quantistici entro il 2030. Sulla base di ciò, Draghi invita l'UE a stabilire un piano di lungo termine per le QT. **Errore. Il segnalibro non è definito.** che possa coordinare gli sforzi dei vari attori a livello europeo ed efficientare gli investimenti.

Un passaggio significativo in questa direzione è avvenuto nel marzo 2024, quando 21 Stati membri hanno firmato la Dichiarazione Europea sulle Tecnologie Quantistiche¹³², impegnandosi a fare dell'Europa la "Quantum Valley" mondiale. Tale dichiarazione è strettamente legata all'iniziativa Quantum Flagship¹³³, un programma decennale con un finanziamento di un 1 mld, il cui scopo è promuovere la ricerca e lo sviluppo industriale nel settore quantistico.

¹²⁸ https://commission.europa.eu/topics/strengthening-european-competitiveness/eu-competitiveness-looking-ahead_en

¹²⁹ https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/europes-digital-decade-digital-targets-2030_it

¹³⁰ https://defence-industry-space.ec.europa.eu/document/download/31c246f2-f0ab-4cdf-a338-b00dc16abd36_en?filename=C_2023_6689_1_EN_ACT_part1_v8.pdf

¹³¹ https://commission.europa.eu/topics/strengthening-european-competitiveness/eu-competitiveness-looking-ahead_en

¹³² <https://digital-strategy.ec.europa.eu/it/library/european-declaration-quantum-technologies>

¹³³ <https://qt.eu/about-quantum-flagship/>

Nel febbraio 2024, il Quantum Flagship ha presentato la Strategic Research and Industry Agenda 2030¹³⁴, delineando una roadmap per rafforzare la sovranità economica e tecnologica europea. Questa strategia mira a creare un ecosistema quantistico autonomo, con l'obiettivo di consolidare e ampliare la leadership scientifica europea e di promuovere lo sviluppo di un'industria quantistica competitiva.

I cinque pilastri della strategia sono:

7. Incentivi per startup e PMI nel settore quantistico.
8. Promozione di progetti di ricerca innovativi per mantenere l'Europa all'avanguardia.
9. Aumento delle risorse finanziarie disponibili per supportare la crescita delle tecnologie quantistiche.
10. Collaborazioni con attori globali per accelerare il progresso tecnologico.
11. Assicurare una stretta collaborazione tra le istituzioni europee e nazionali per evitare duplicazioni e massimizzare l'efficienza.

In definitiva, la strategia punta a costruire il "Quantum Web", un sistema in cui computer, simulatori e sensori quantistici siano interconnessi tramite reti quantistiche, consentendo lo scambio di informazioni e risorse quantistiche come la coerenza e l'entanglement. Questo ecosistema quantistico rappresenterà una rivoluzione tecnologica, con impatti in settori che vanno dalla sicurezza informatica alla scienza dei materiali.

Politiche pubbliche

L'UE ha introdotto un insieme di politiche e normative per supportare la diffusione delle tecnologie quantistiche in modo sicuro ed efficiente. Tra i più importanti interventi normativi vi è il Chips Act¹³⁵, un'iniziativa fondamentale che mira a potenziare la capacità produttiva europea nel settore dei chip, compresi quelli quantistici. Questa normativa promuove la produzione a basso costo e su larga scala di chip quantistici in Europa, essenziali per alimentare i futuri dispositivi innovativi basati su queste tecnologie.

Un altro pilastro delle politiche europee riguarda il European High Performance Computing Joint Undertaking (EuroHPC JU)¹³⁶, che guida lo sviluppo di computer quantistici pilota di ultima generazione. Questi dispositivi, integrati con i supercomputer tradizionali, formeranno macchine ibride che sfrutteranno le migliori tecnologie di calcolo quantistico e classico. Nel 2022, l'EuroHPC **Errorre. Il segnalibro non è definito.** ha selezionato sei siti in Europa per ospitare i primi computer quantistici europei, con un investimento di 100 mln €, sostenuto per il 50% dall'UE e per il restante 50% da 17 Paesi membri¹³⁷.

In base allo stesso principio, l'UE ha recentemente stanziato 200 mln € per il periodo 2023-2027 per accelerare la costruzione di chip quantistici in Europa. Il primo round del programma Chips-JU¹³⁸, da 65 mln €, ha lo scopo di realizzare linee pilota di chip quantistici, incentrate sulla stabilità e sugli ioni intrappolati.

¹³⁴ https://qt.eu/news/2024/2024-02-14_new-roadmap-to-position-europe-as-the-quantum-valley-of-the-world

¹³⁵ https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-chips-act_en

¹³⁶ https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/search-all-eu-institutions-and-bodies/european-high-performance-computing-joint-undertaking-eurohpc-ju_en

¹³⁷ https://eurohpc-ju.europa.eu/one-step-closer-european-quantum-computing-eurohpc-ju-signs-hosting-agreements-six-quantum-computers-2023-06-27_en

¹³⁸ https://qt.eu/news/2024/2024-09-11_chips-ju-first-calls-for-quantum-chip-pilot-lines-announced

Un'iniziativa centrale è anche la European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI) Initiative¹³⁹, lanciata nel 2019, che punta a sviluppare una rete di comunicazione quantistica sicura in tutto il continente.

Infine, attraverso il programma Horizon Europe¹⁴⁰, l'UE ha stanziato 40 mln € per promuovere lo sviluppo di tecnologie quantistiche di prossima generazione. Di questi fondi, 25 milioni di euro sono destinati alla creazione di una rete di gravimetri quantistici, mentre 15 mln € sono dedicati a stimolare la ricerca transnazionale e creare sinergie tra gli attori europei.

Germania

Mercato attuale

Il mercato dei sensori quantistici in Germania presenta un fatturato previsto di 86,9 mln \$ nel 2023¹⁴¹. Per quanto riguarda il mercato del Quantum Computing, il fatturato si attesta attorno ai 126,1 mln \$ nel 2023¹⁴².

In ambito Quantum computing, IQM ha recentemente aperto in Germania un data centre quantum per supportare le applicazioni industriali, contenente due computer quantistici e con la capacità di ospitarne 12¹⁴³. Allo stesso tempo, a ottobre 2024, IBM ha aperto il suo primo data centre quantistico in Europa, nel sud della Germania (Ehningen), per soddisfare le esigenze di sicurezza dei suoi clienti¹⁴⁴. Grazie ad un investimento di 290 mln €, il centro permetterà l'accesso a Quantum Computing su cloud.

Mercato futuro

Si prevede che il mercato dei sensori quantistici in Germania raggiungerà un fatturato di 127,4 mln \$ entro il 2030¹⁴⁵, con un CAGR del 5,6% dal 2024 al 2030. Per quanto riguarda il mercato del Quantum Computing, si prevede che raggiungerà un fatturato di 357,4 mln \$ entro il 2030, con un CAGR del 16% dal 2024 al 2030¹⁴⁶.

Politiche pubbliche

Il piano d'azione tedesco per le Q, annunciato nell'aprile del 2023, prevede un investimento totale di 3 mld € per lo sviluppo di un computer quantistico universale entro il 2026¹⁴⁷. Dei 3 mld €, il Ministero della Ricerca riceverà 1,37 mld €, mentre altri 800 mln € saranno destinati agli istituti di ricerca pubblici.

Importante sottolineare il ruolo abilitante del Fraunhofer (istituto di ricerca), che, ospitando l'infrastruttura e le competenze scientifiche adeguate, e connettendo queste con l'industria¹⁴⁸, facilita l'industrializzazione e attira

¹³⁹ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>

¹⁴⁰ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/it/news/new-horizon-europe-funding-boosts-european-research-ai-and-quantum-technologies>

¹⁴¹ <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/quantum-sensor-market/germany>

¹⁴² <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/quantum-computing-market/germany>

¹⁴³ <https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/iqm-opens-quantum-data-centre-in-germany>

¹⁴⁴ <https://www.euronews.com/next/2024/10/09/inside-ibms-first-european-quantum-data-centre-euronews-tech-talks>

¹⁴⁵ <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/quantum-sensor-market/germany>

¹⁴⁶ <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/quantum-computing-market/germany>

¹⁴⁷ <https://qbn.world/wp-content/uploads/2023/04/Action-Plan-Quantum-Technologies-by-German-Government-2023-2026.pdf>

¹⁴⁸ Attraverso il servizio [Match](#), ad esempio.

domanda e investimenti. Questo circolo virtuoso ha portato allo sviluppo di una vera e propria *Quantum Valley* nei pressi di Monaco di Baviera (MQV), di cui il Franhauser è il perno centrale¹⁴⁹.

Nel 2022 il governo tedesco ha stanziato 740 mln € per realizzare un consorzio che possa costruire diversi prototipi di quantum computer in 4 anni¹⁵⁰. Circa l'80 per cento dei finanziamenti è ulteriormente distribuito tra i partner industriali, mentre il restante 20% dei finanziamenti sarà utilizzato per R&S.

Nello stesso anno, la Germania ha realizzato il suo primo computer quantistico ibrido presso il Centro di supercalcolo Leibniz¹⁵¹ (nei pressi della MQV), integrando in un supercomputer, il SuperMUC-NG presso l'LRZ, un sistema, basato su circuiti superconduttori, da 20 qubit realizzato da IQM Quantum Computers (Finlandia). L'investimento totale si aggirerebbe attorno ai 40 mln €.

Francia

Mercato attuale

Si stima che il mercato del Quantum Computing in Francia abbia raggiunto un fatturato di 93,1 mln \$ nel 2023¹⁵². Il mercato francese vede come maggiori clienti il settore bancario, farmaceutico, spaziale, la difesa e l'industria.

Oltre ad ospitare leader nel Quantum Computing come Atos, la Francia presenta 6 start-up di hardware quantistico, tra cui¹⁵³: Quandela, che sta realizzando computer quantistici fotonici modulari; Pasqal, che sta sviluppando un computer quantistico basato su atomi neutri, con l'obiettivo nel breve termine di costruire un computer quantistico da 1000 qubit, ed ha raccolto 100 mln € nel 2023; Quobly, che sta lavorando su un computer quantistico basato sul silicio; Alice & Bob, che adottando un approccio basato sulla correzione degli errori per costruire un primo qubit logico ed ha raccolto 27 mln € nel 2022; C12 Quantum Electronics, che sta sviluppando un computer quantistico basato su elettroni intrappolati in nanotubi di carbonio; Crystal Quantum Computing, che punta a costruire un computer quantistico a ioni intrappolati.

La Francia è anche la casa di Quantonation, il primo fondo di Venture Capital dedicato alla quantistica in Europa. Fondata nel 2018, la società gestisce circa 170 mln € di asset¹⁵⁴.

Mercato futuro

Si prevede che il mercato del Quantum Computing in Francia raggiungerà un fatturato di 233,8 mln \$ entro il 2030, con un CAGR del 14,1% dal 2024 al 2030¹⁵⁵.

Politiche pubbliche

¹⁴⁹ <https://www.mpq.mpg.de/6644502/munich-quantum-valley-strategiepapier.pdf>

¹⁵⁰ <https://qci.dlr.de/en/dlr-teams-up-with-industry-to-develop-german-quantum-computers/>

¹⁵¹ <https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/germany-launches-its-first-hybrid-quantum-computer>

¹⁵² <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/quantum-computing-market/france>

¹⁵³ <https://www.francequantum.fr/>

¹⁵⁴ <https://www.quantonation.com/>

¹⁵⁵ <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/quantum-computing-market/france>

La strategia quantistica francese è sostenuta da 1,8 mld € da investire nel quadriennio dal 2021 alla fine del 2024¹⁵⁶. I finanziamenti pubblici nazionali rappresentano 1 mld € del totale, compresi 650 mln € provenienti dal piano Francia 2030. I restanti 800 mln € provengono da investitori privati.

Il governo ha lanciato il programma PROQCIMA per realizzare due prototipi di computer quantistici di progettazione francese con almeno 128 qubit logici entro il 2032. Un obiettivo successivo sarebbe quello di avere computer quantistici fault tolerant con almeno 2048 qubit logici entro il 2035. Il programma è strutturato come una competizione che si svolgerà in tre fasi (concetto, maturazione e industrializzazione) nei prossimi anni. Il programma inizierà con cinque imprese che svilupperanno la loro tecnologia per i primi quattro anni. Le imprese selezionate includono Alice & Bob, C12, Pasqal, Quandela e Quobly con un finanziamento totale di 500 mln €. Al termine del primo step, tre imprese saranno selezionate per continuare nei successivi quattro anni della seconda fase. Successivamente, due imprese saranno selezionate per lo sviluppo e la commercializzazione.

Un pilastro fondamentale di questa strategia è lo sviluppo di partenariati internazionali. Nel novembre 2022, Francia, Paesi Bassi e Germania hanno firmato un accordo trilaterale per incoraggiare la cooperazione nella ricerca accademica nel campo della tecnologia quantistica e per far crescere un ecosistema internazionale di startup attorno allo sviluppo dei computer quantistici¹⁵⁷. Come parte di questa iniziativa, si lavorerà su un campus quantistico europeo e finanziamenti alle collaborazioni industria-ricerca. Sempre nel novembre 2022, Francia e Stati Uniti hanno firmato una dichiarazione congiunta sulla scienza e tecnologia dell'informazione quantistica per facilitare le connessioni e le collaborazioni necessarie per portare le tecnologie quantistiche dal laboratorio al mercato.

Paesi Bassi

Mercato attuale

Il governo olandese ha riconosciuto la tecnologia quantistica come un bene strategico e sta investendo centinaia di milioni in questa tecnologia. Ciononostante, il settore si trova ad affrontare una sfida cruciale in termini di finanziamenti, in quanto gli investitori privati non sostengono ancora in modo sostanziale le aziende quantistiche olandesi¹⁵⁸. Invest-NL (agenzia di promozione investimenti) ha avvertito che le 18 società quantistiche olandesi, già esistenti o in via di costituzione, necessitano di un importo compreso tra 1 e 2 mld € per raggiungere la redditività.

Nonostante ciò, gli investitori privati hanno contribuito solo tra 10 e 15 mln € in equity alle aziende quantistiche olandesi negli ultimi anni. Per superare questa sfida, il governo olandese sta lavorando per aumentare la consapevolezza tra gli investitori privati ed esplorare modelli di finanziamento innovativi. All'inizio di quest'anno, è stato lanciato il fondo QDNL Participations da 15 milioni di euro per aggirare questa sfida per le startup di tecnologia quantistica in fase iniziale nel paese. Inoltre, Quantum Delta Netherlands ha raccolto 60,2 milioni di euro di finanziamenti dal National Growth Fund (NGF) come contributo olandese all'accordo trilaterale con Francia e Germania.

¹⁵⁶ <https://world.businessfrance.fr/nordic/the-rise-of-quantum-technologies-in-france/>

¹⁵⁷ <https://www.francequantum.fr/>

¹⁵⁸ <https://thequantuminsider.com/2023/10/31/the-netherlands-is-putting-call-out-for-quantum-investors/>

Tra le startup più rilevanti nei Paesi Bassi troviamo: OrangeQS (raccolto 1,5 mln € nel 2023), che realizza attrezzature per testare chip quantistici; Delft Circuits (6,3 mln €), che opera in ambito hardware; QuantaMap (1,4 mln €), che sviluppa strumenti per la metrologia e l'ispezione dei difetti nei chip quantistici e in altri hardware quantistici; QuantWare (1,4 mln €), che progetta e produce processori quantistici superconduttivi.

Mercato futuro

I colli di bottiglia principali identificati da Invest-NL¹⁵⁹ per lo sviluppo dell'industria delle Q in futuro sono: capacità dell'infrastruttura (qualità di altissimo livello ma difficoltà ad accedervi); finanziamenti; accesso a competenze manageriali.

Politiche pubbliche

Nel 2019 i Paesi Bassi hanno pubblicato la propria Agenda nazionale sulle QT. L'Agenda sarà attuata principalmente attraverso il programma Quantum Delta NL, che cerca di sostenere quattro aree principali della strategia quantistica: commercializzazione delle tecnologie quantistiche, educazione quantistica, sviluppo e uso etico delle tecnologie quantistiche e sviluppo di una comunità quantum.

Il governo ha investito nelle QT almeno 1,7 mld € attraverso il National Growth Fund. Di questi, 1,1 mld € sono stati investiti nella startup PhotonDelta, che mira a costruire microchip fotonici avanzati, mentre altri 615 mln € sono stati stanziati per il Quantum Delta NL, con l'obiettivo di creare un ecosistema nazionale per le QT nei Paesi Bassi. Inoltre, i Paesi Bassi ospiteranno un nuovo computer quantistico di minimo 16 qubit grazie ad un investimento di almeno 20 mln € attraverso l'EuroHPC¹⁶⁰.

Anche i Paesi Bassi hanno creato hub tematici NL con l'obiettivo di incentivare collaborazioni tra pubblico e privato¹⁶¹. Quantum Delta NL coordina il lavoro in cinque hub focalizzati sulle diverse QT, tra cui l'House of Quantum a Delft che si specializza in Quantum Computing¹⁶². Tra i membri e partner della House of quantum figurano Fujitsu, Qutech, TNO, TUDelft, OrangeQS, Qblox, Qphox, QuantWare, Delft Circuits, Single Quantum, Q Bird, Bluefors, Microsoft, Quantum Delft e Quantum Delta NL. Il centro offre infrastrutture per valutare la funzionalità, la fattibilità, l'affidabilità e la scalabilità delle soluzioni realizzate da startup e ricercatori.

Spagna

Mercato attuale

La Spagna è uno dei Paesi più avanzati nel campo del Quantum Computing¹⁶³. Il Paese ha università molto rinomate e alcune delle istituzioni accademiche più lungimiranti per quanto riguarda le tecnologie quantistiche, come l'ICFO, l'IFAE, il DIPC o il CSIC. Barcellona ospita anche il BSC, che presto ospiterà il primo (e il secondo)

¹⁵⁹

https://www.invest-nl.nl/media/attachment/2023/11/1/de_rol_van_nederland_in_quantum_tecnologie_invest_nl.pdf

¹⁶⁰ https://eurohpc-ju.europa.eu/new-eurohpc-quantum-computer-be-hosted-netherlands-2024-10-22_en

¹⁶¹ <https://investinholland.com/doing-business-here/industries/high-tech-systems/>

¹⁶² <https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/state-of-quantum-report-2024>

¹⁶³ <https://www.kfund.vc/post/understanding-quantum-computing-spains-opportunity-and-our-areas-of-interest>

computer quantistico dell'Europa meridionale e coordinerà Quantum Spain, l'ecosistema nazionale di calcolo quantistico.

Tra le startup di successo nelle QT troviamo Multiverse, Quantum Mads e Inspiration Q che stanno esplorando l'applicazione di algoritmi quantistici per risolvere problemi complessi in finanza, logistica e altri settori. Quside e LuxQuanta lavorano sulla sicurezza informatica e sulla crittografia quantistica, mentre iPronics e Nanogap orbitano attorno a materiali e componenti. In campi specifici come farmaceutica e chimica, si trovano DevsHealth o Pharmacelera. Infine, Qilimanjaro sta costruendo una soluzione full-stack hardware/software.

Inoltre, le grandi aziende spagnole come Telefónica, BBVA, Santander, CaixaBank, Repsol o Acciona hanno avviato PoC (*proof of concept*) e stanno sviluppando divisioni interne focalizzate sulle QT.

Mercato futuro

Un recente report di AMETIC (l'associazione industriale per il digitale spagnola) ha identificato come potenziali aree di intervento per lo sviluppo dell'industria delle QT¹⁶⁴: promuovere la visibilità dell'ecosistema spagnolo sulla scena mondiale e, in particolare, europea; migliorare il coordinamento tra gli stakeholder esistenti sul territorio; sensibilizzazione e creazione della domanda; incentivi alla creazione di nuove imprese; creazione di ambienti sperimentali adeguati; supporto per ricerca e sviluppo; mantenimento e sviluppo dei talenti; consolidamento di reti aperte e ben connesse.

Politiche pubbliche

Quantum Spain mira a promuovere e finanziare un'infrastruttura di calcolo quantistico competitiva e completa, basata principalmente su tecnologia europea (Marenostrum 5) e localizzata nel Centro di Supercalcolo di Barcellona (BSC)¹⁶⁵. Per la realizzazione del progetto sono stati stanziati 22 mln € nell'arco temporale 2022 – 2025, da spendere per i seguenti step¹⁶⁶:

- Acquistare e installare un computer quantistico basato sui superconduttori.
- Acquistare e installare dispositivi HPC da usare in progetti relativi le tecnologie quantistiche.

Fornire l'accesso **ai** computer ed ai dispositivi HPC attraverso la rete spagnola.

- Supportare università e istituti di ricerca e sviluppare algoritmi quantistici e relative applicazioni in IA.
- Creare programmi, seminari, scuole e altri programmi di formazione sul quantum.

In collaborazione con IBM, il BSC ha lanciato l'“IBM Q Hub Spain” nel 2021, entrando a far parte della rete quantistica globale di IBM¹⁶⁷. Questa partnership consente ai ricercatori e alle imprese spagnole di accedere ai computer quantistici di IBM e di collaborare con la più ampia comunità quantistica.

¹⁶⁴ <https://www.investinspain.org/content/dam/icex-invest/documentos/publicaciones/sectores/tic/SPAIN-QUANTUM-INDUSTRY-REPORT-English.pdf>

¹⁶⁵ <https://www.investinspain.org/content/dam/icex-invest/documentos/publicaciones/sectores/tic/SPAIN-QUANTUM-INDUSTRY-REPORT-English.pdf>

¹⁶⁶ <https://quantumspain-project.es/en/about-us/>

¹⁶⁷ <https://thequantuminsider.com/2023/08/04/a-brief-overview-of-quantum-computing-in-spain-in-2023/>

SCHEDA 3 - INIZIATIVE DELL'UNIONE EUROPEA IN AMBITO QT

Di seguito sono riportate le iniziative portate avanti dall'Unione Europea per sviluppare il settore delle QT.

Tabella 6 – Descrizione iniziative realizzate dall'Unione Europea sulle QT.

INIZIATIVA	DESCRIZIONE - OBIETTIVO	TIMELINE	BUDGET
Chips Act	Focalizzato sul potenziamento dell'industria dei semiconduttori in UE per garantire la sovranità tecnologica nella produzione di chip avanzati, vitali per numerose tecnologie, incluso, ma non esclusivamente, il quantum computing.	Entrato in vigore il 21 settembre 2023	Non chiaro quanto allocato per quantum computing.
Quantum Flagship	Lanciata nel 2018, questa iniziativa decennale mira a far progredire la ricerca quantistica in Europa.	2018 - 2030	1 mld €
OpenSuperQPlus ¹⁶⁸	Diviso in due fasi progettuali di 3,5 anni, OpenSuperQPlus ha l'obiettivo finale di un sistema di calcolo quantistico a 1.000 qubit realizzato in Europa. Lanciata da Quantum Flagship.	2023 – 2030	20 mln €
Quantum Internet Alliance ¹⁶⁹	Il progetto è finalizzato alla creazione di un'Internet quantistica multinodo e paneuropea.	2018 - 2022	10 mln €
PASQuanS2 ¹⁷⁰	PASQuanS2 si propone di far progredire e scalare le piattaforme di simulazione quantistica basate su atomi e ioni e di stimolare un ecosistema vivace per la	2023 – 2027 (1° fase)	16,6 mln €

¹⁶⁸ <https://opensuperqplus.eu/project>

¹⁶⁹ <https://qt.eu/projects/communication/qia>

¹⁷⁰ <https://pasquans2.eu/>

	simulazione quantistica in Europa.		
Qombs ¹⁷¹	Mira a creare una piattaforma di simulazione quantistica fatta di atomi ultrafreddi in reticoli ottici.	2018 – 2022	9,4 milioni €
European High Performance Computing Joint Undertaking (EuroHPC JU) ¹⁷²	Sei nuovi computer quantistici EuroHPC saranno integrati nei supercomputer esistenti in Repubblica Ceca, Francia, Germania, Italia, Polonia e Spagna. EuroQCS-Italy sarà ospitato nel data center del CINECA, e dovrebbe fornire almeno 50 qubit fisici in modalità digitale, o 140 qubit in modalità analogica	Il 5 settembre 2024 è stato chiuso il bando di gara.	100 mln € totali. 13 mln € per EuroOCS-Italy.
European Quantum Communication Infrastructure Initiative ¹⁷³	Sarà un'infrastruttura di comunicazione quantistica sicura che abbraccerà tutta l'UE.	2019 - 2030	90 mln € (2021 – 2027) ¹⁷⁴
Horizon Europe ¹⁷⁵	Programma di accelerazione di progetti di ricerca, incluso nel quantum computing.	2023 - 2024	40 mln €
QuantERA ¹⁷⁶	QuantERA è una rete europea di organizzazioni di finanziamento della ricerca che sostiene e sovvenziona lo sviluppo delle tecnologie quantistiche.	2016 – 2022 (ad oggi l'organizzazione è ancora in funzione, mentre il progetto iniziale è stato completato)	117 mln €
Chips JU	Costruire e accelerare lo sviluppo di chip quantistici in	2023 - 2027	20 mln € ¹⁷⁷

¹⁷¹ <https://cordis.europa.eu/project/id/820419/reporting>

¹⁷² https://eurohpc-ju.europa.eu/eurohpc-ju-launches-procurement-new-quantum-computer-italy-2024-08-01_en

¹⁷³ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>

¹⁷⁴ https://hadea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility/about/quantum-communication-infrastructure-euroqci_en?prefLang=fr

¹⁷⁵ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/new-horizon-europe-funding-boosts-european-research-ai-and-quantum-technologies>

¹⁷⁶ <https://quantera.eu/funding/>

¹⁷⁷ Slide “Ricognizione fondi europei”

	Europa.		
Quantum pact	Creare in Europa un ecosistema competitivo a livello globale in grado di supportare un'ampia gamma di applicazioni scientifiche e industriali, identificare i settori industriali in cui le tecnologie quantistiche avranno un elevato impatto economico e sociale e promuovere l'innovazione quantistica sia nelle piccole che nelle grandi imprese.	Siglatto nel 2023.	Non ci sono aggiornamenti. ¹⁷⁸
EQUO ¹⁷⁹	Progetta, sviluppa e sperimenta nodi QKD di alto livello integrabili all'interno delle infrastrutture di telecomunicazioni.	2023 - 2025	8,8 mln €
Advanced, Disruptive and Emerging QUAntum technologies for DEfense (ADEQUADE) ¹⁸⁰	Sviluppare soluzioni innovative negli ambiti di rilevamento quantistico nel campo della difesa.	2022 - 2025	27 mln €
Quantum technology for Defence with application to Optronics (QUANDO) ¹⁸¹	Promuove iniziative e progetti legati allo sviluppo di tecnologie di rilevamento quantistico per l'optronica nel campo della difesa.		Per ulteriori informazioni valutare la possibilità di contattare il referente CNR.
Multiscale Quantum Bio-Imaging and Spectroscopy (MUQUABIS) ¹⁸²	Sviluppa strumenti per il biorilevamento e la bioimmagine quantistica.	2022 - 2026	6,6 mln €
QUDICE ¹⁸³ (finanziato da Horizon)	Sviluppo di componenti e sottosistemi per la comunicazione quantistica e	2023 - 2025	4,3 mln €

¹⁷⁸ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/european-declaration-quantum-technologies>

¹⁷⁹ <https://www.polito.it/ricerca/una-ricerca-integrata/anagrafe-della-ricerca?progetto=1967/2023>

¹⁸⁰ https://defence-industry-space.ec.europa.eu/system/files/2022-07/Factsheet_EDF21_ADEQUADE.pdf

¹⁸¹ <https://www.cnr.it/en/research-projects/project/48499/quando-quantum-technologies-for-defence-with-application-to-optronics-dfm-ad002-146>

¹⁸² <https://cordis.europa.eu/project/id/101070546/it>

¹⁸³ <https://cordis.europa.eu/project/id/101082596/results>

	sistemi ottici per la QKD basata sullo spazio che consentano la realizzazione di una rete europea di satelliti.		
QU-PILOT ¹⁸⁴ (finanziato da Horizon)	Mira a sviluppare e fornire l'accesso alle prime strutture di produzione per le QT in Europa.	2023 - 2026	19 mln €
QUBIP (finanziato da Horizon)	Semplifica il processo di transizione al PQC e creare un modello replicabile.	2023 - 2026 ¹⁸⁵	5 mln €
DIANA (Defence Innovation Accelerator for the North Atlantic)	Salvaguardare il vantaggio tecnologico dei Paesi alleati attraverso un meccanismo civile-militare di cooperazione transatlantica nel campo dell'innovazione tecnologica, in particolare per quanto riguarda le aree chiave per difesa e alla sicurezza.	Nato nel 2023.	50 mln €/anno

¹⁸⁴ <https://cordis.europa.eu/project/id/101113983/it>

¹⁸⁵ <https://cordis.europa.eu/project/id/101119746>